

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Донецький національний університет економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського

Кафедра загальноінженерних дисциплін

І.Б. Левіт, В.О.Сукманов, Д.С. Афенченко

РЕОЛОГІЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Підручник

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів

ДонНУЕТ
ДОНЕЦЬК
2014

УДК 663/664:532.135(075.8)

ББК 35я73+22.251я73

Л 36

Рецензенти:

Заплетніков І.М. – завідувач кафедри обладнання харчових виробництв Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган–Барановського, докт. техн. наук, професор;

Шевченко О.Є. – завідувач кафедри процесів і апаратів харчових виробництв факультету хлібопекарських і кондитерських виробництв Національного університету харчових технологій, Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, докт. техн. наук, професор;

Сухенко Ю.Г. - завідувач кафедри процесів і обладнання продукції АПК Національного університету біоресурсів і природодокористування України, докт. техн. наук, професор;

Дейниченко Г.В. - завідувач кафедри устаткування харчової і готельної індустрії імені М.І. Беляєва Харківського державного університету харчування і торгівлі, Заслужений діяч науки і техніки України, докт. техн. наук, професор.

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів
(лист № 1/11-3766 від 19.03.2014р.)*

Левіт І.Б.

Л36 Реологія харчових продуктів: підручник/ І.Б. Левіт, В.О. Сукманов, Д.С. Афенченко. – Донецьк: ДонНУЕТ, 2014. – 559 с.

ISBN

У підручнику наведено енциклопедичний охват всіх сторін реології, як навчальної дисципліни – від теоретичного описання законів та розглядання фізики головних реологічних властивостей і показників, до описання наукових досліджень та результатів практичного втілення та використання знань з реології харчових продуктів на практиці в харчовій промисловості. Також наведені результати які спрямовані на розробку та практичне втілення нових технологічних процесів отримання продуктів харчування.

Підручник призначено для студентів інженерно - технологічних спеціальностей, аспірантів, викладачів ВНЗ, наукових та практичних співробітників установ та підприємств харчової галузі.

УДК 663/664:532.135(075.8)

ББК 35я73+22.251я73

ISBN

© Левіт І.Б., Сукманов В.О., Афенченко Д.С., 2014

© ДонНУЕТ ім. Михайла Туган – Барановського, 2014

ВСТУП

Реології харчових продуктів присвячені десятки підручників та навчальних посібників, які написані провідними вченими університетів України, близького та далекого зарубіжжя, але зміст даного підручника свідчить не тільки про доцільність його видання, але й про необхідність і своєчасність виходу в світ даного видання.

Реологічні показники, які відображають властивості продуктів харчування, використовуються: на етапі переробки продуктів харчування; при розрахунках відповідного технологічного обладнання; при оцінці і контролі якості готових продуктів харчування, як безпосередньо після їх виробництва, так і в процесі нормативних термінів зберігання; при розробці нормативно – технологічних документів, як на процес виробництва продуктів, так і на умови їх зберігання.

Питаннями реології харчових продуктів людство займалося більше сотні років, але вимоги людства до якості продуктів харчування висувають необхідність удосконалення та створення прогресивних технологічних процесів з застосуванням фізичних методів обробки; створення нового обладнання, яке забезпечує підвищення ефективності виробництва; розробки об'єктивних методів оцінки якості сировини та готових продуктів. При вирішенні цих питань суттєве значення мають реологічні методи як науковий фундамент для практичних та теоретичних розробок.

Даний підручник може претендувати на універсальний енциклопедичний охват всіх сторін реології, як навчальної дисципліни – від теоретичного описання законів та розглядання фізики головних реологічних властивостей і показників, якими вони характеризуються, до описання наукових досліджень в даній галузі та результатів практичного втілення та використання знань з реології харчових продуктів на практиці в харчовій промисловості.

У країнах близького та далекого зарубіжжя існують потужні школи вчених – реологів, фамілії яких відомі всім фахівцям, що працюють в галузі дослідження реології харчових продуктів, тому природно, що їх роботи були використані при підготовці даного підручника.

Актуальність видання даного підручника обумовлена декількома обставинами. Наявністю великої кількості досліджень, які не увійшли до існуючих підручників з реології харчових продуктів, але які спрямовані на розробку та практичне втілення нових технологічних процесів, включаючи комбіноване діяння декількох зовнішніх факторів, діючих на харчові продукти, і потребуючих нових даних про властивості цих продуктів. Розробкою рецептур функціональних продуктів нового покоління, які передбачають введення до продуктів нових добавок та наповнювачів, що природно, веде до змінення їх реологічних властивостей.

Автори висловлюють глибоку подяку ректору університету, професору Шубіну О.О. за постійну увагу і підтримку роботи, професорам – рецензентам підручника – Завідувач кафедри устаткування харчової і готельної індустрії імені М.І. Беляєва Харківського державного університету харчування і торгівлі, доктор технічних наук, професор Г.В. Дейниченко, Завідувач кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України доктор технічних наук, професор Ю.Г. Сухенко, Завідувач кафедри процесів і апаратів харчових виробництв, декан факультету хлібопекарських і кондитерських виробництв Національного університету харчових технологій, Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор О.Е. Шевченко за їхні зауваження та корисні поради, а також своїм колегам за поради та практичну допомогу.

Зауваження та побажання з приводу даного підручника просимо надсилати за адресою: 83055, м. Донецьк, вул. Щорса, 31, ДонНУЕТ, кафедра загальноінженерних дисциплін.

ПЕРЕДМОВА

Велика кількість продуктів харчової промисловості відносяться до пластично – в'язких матеріалів, які володіють іншими, ніж ньютонівські рідини, механічними властивостями. Деформаційною поведінкою пластично – в'язких середовищ займається наука, яка зветься реологією. Класична реологія – наука о деформації та течії різноманітних тіл, вона вивчає способи визначення структурно - механічних властивостей сировини, напівфабрикатів та готових продуктів, прибори для регулювання технологічних процесів і контролю якості на всіх стадіях виробництва.

За допомогою інженерної реології, на основі біохімічних, біофізичних, фізико-хімічних та органолептичних показників вирішують наступні задачі:

- вивчення суттєвості процесів, які приймають участь у структуроутворенні харчових продуктів;
- визначення нормативних структурно-механічних властивостей, які характеризують якість виробів, для їх використання в технологічній документації;
- отримання необхідних даних для розрахунку та створення спеціалізованого технологічного обладнання.

Харчові продукти складні за хімічним складом та володіють комплексом різноманітних властивостей, які створюють якість продукції, і повинні бути ураховані при розрахунках процесів та апаратів і їх удосконаленні. Для наукового обґрунтованого урахування цих властивостей в харчовому виробництві необхідна інформація о структурно-механічних характеристиках продуктів.

Найбільш повне уявлення о деяких суттєвих аспектах якості продукту дає група фізичних властивостей, які проявляють залежність від біологічного і хімічного складу (рецептури) та внутрішньої будови (структури продукту). Незначні змінення цих визначаючих характеристик повинні викликати значні змінення величин властиво-

стей, які реєструються приборами. При цьому характеристики сировини визначають основні показники готової продукції. К однієї з груп таких властивостей відносяться структурно-механічні.

Питаннями реології харчових продуктів людство займалося більше сотні років, але вимоги людства до якості продуктів харчування, які зростають, висувають необхідність удосконалення існуючого та створення прогресивних технологічних процесів з застосуванням фізичних методів обробки; створення нових видів обладнання, яке забезпечує підвищення ефективності виробництва; розробки об'єктивних методів оцінки якості сировини та готових продуктів. При вирішенні цих питань суттєве значення мають реологічні методи як фундамент для практичних і теоретичних розробок.

Успіхи реології харчових продуктів, які досягнуті дослідниками нашої країни та за її межами, обумовлюють широке застосування реологічних методів в промисловості. Головною задачею є визначення значень структурно-механічних характеристик в широкому діапазоні змінення технологічних, механічних та інших параметрів.

Класична реологія ставить своєю задачею вивчення властивостей існуючих продуктів та розробку методів розрахунку процесів течії їх в робочих органах машин.

Фізико-хімічна механіка, як наука про способи та закономірності формування структур дисперсних систем, маючих задані властивості, має задачі: а) встановлення закономірностей створення та руйнування структур в дисперсних системах у залежності від сукупності фізико-хімічних, біохімічних, механічних та інших факторів; б) дослідження, обґрунтування та оптимізацію шляхів отримання структур заздалегідь заданими технологічними властивостями.

Фізико – хімічна механіка тісно пов'язана з реологією, фізичною та колоїдною хімією і гідродинамікою, займаючи при цьому більш високу ступінь. Головна її ціль - встановлення суттєвості утворювання та руйнування структур в дисперсних системах у залежності від сукупності фізико – хімічних та механічних факторів. Це забезпечує обґрунтування шляхів отримання структур з заданими властивостями та дозволяє розробляти способи оптимізації процесів обробки харчових продуктів. В таких процесах механічні властивості вважають основними серед інших фізичних властивостей (термічних, електричних та інших).

В задачу управляючої реології входить дослідження та обґрунтування такого сполучення різноманітних видів впливу, при яких за-

безпечується заданий рівень реологічних характеристик протягом всього технологічного процесу.

Інженерна фізико-хімічна механіка вирішує всі перелічені вище задачі, та розробляє способи прикладення встановлених закономірностей для розрахунку машин і оперативного контролю основних показників якості за значеннями реологічних характеристик.

Реалізація досліджень методами інженерної фізико-хімічної механіки дозволяє стабілізувати вихід виробів, отримувати продукти постійної, заздалегідь заданої якості, науково обґрунтовувати якість продуктів, розраховувати, удосконалювати технологічні процеси.

Одним з найважливіших показників якості харчових продуктів, є консистенція, яка характеризується структурно-механічними властивостями, що визначаються реологічними методами. Вони характеризують поведінку продукту в умовах напруженого стану.

Будь-який процес, як безперервну зміну явищ у часі, слід розглядати не тільки комплексно, але і по більш характерним ознакам. При цьому описанні явищ, які виражають зовнішню форму внутрішньої природи матеріалу, повинні об'єктивно відображати характерні внутрішні зв'язки. Для отримання рівнянь для розрахунків, та висновків з них базуються на гіпотезах, що розглядають матеріал з макроскопічної точки зору в якості суцільного середовища, яке деформується. Такий підхід дозволяє не розглядати складні молекулярні рухи в тілах та використовувати для опису процесів математичний аналіз, який застосовується для безперервних функцій. Але, незважаючи на признання феноменологічного способу реалізації обробки продуктів фізичними методами, не можливо не вивчати молекулярних взаємодій в реальних системах. Класифікація харчових дисперсних систем враховує ряд головних факторів: дисперсність, агрегатний стан та тип контакту між дисперсними фазами. Значну роль при цьому грають фундаментальні положення органічної, фізичної і колоїдної хімії.

При переробці харчових мас питання змінення деформацій у часі та збереження форми виробів мають важливе практичне значення. Для отримання продуктів високої якості значне місце займають реологічні дослідження, оскільки вони якісно і кількісно визначають поведінку продукту в умовах напруженого стану, дозволяють пов'язати між собою напруження та деформації в процесі прикладення зусиль, отримати характеристики процесу.

Реологічні характеристики залежать від форми та розмірів тіла, швидкості навантаження, стану поверхні, впливу навколишнього се-

редовища, температури, структури та інших факторів. Різниця в реологічних властивостях харчових продуктів у залежності від їх складу чітко проявляється при деформації змінення форми.

В інженерної реології широко використовують наступні основні методи дослідження: диференційний, інтегральний, аналогій та моделей, аналізу розмінностей, експериментальний [21]. При цьому звичайно базуються на гіпотезах, які розглядають матеріал з макроскопічної точки зору в якості суцільного середовища, яке деформується. Мірами рухомості часток цього середовища служать амплітуда та швидкість зміщення з безперервним розподіленням основних фізичних властивостей та деформацій. Такий підхід дозволяє не розглядати складні молекулярні рухи в тілах та використовувати для опису процесів апарат математичного аналізу, який застосовується до безперервних функцій. Кожний з перелічених методів, за виключенням експериментального, можна здійснювати теоретико – феноменологічними та експериментальними способами. В границях одного дослідження можливі комбінації методів.

Диференціальним методом користуються при вивченні нескінченно малих величин у феноменологічних дослідженнях при складанні диференціальних рівнянь; в експериментальних роботах часто вивчають змінення параметрів окремих елементів тіла у якомусь процесі. Диференціальний метод дозволяє визначити в теоретичних і експериментальних дослідженнях стан змінних величин у часі та просторі (для будь – яких моменту часу та точці простору).

Інтегральний метод служить для вивчення кінцевих величин. Він дає змогу оцінювати сумарний ефект змінення параметрів у системі під дією тих або інших факторів. Звичайно теоретичні розрахункові формули отримують шляхом інтегрування диференціальних рівнянь, емпіричні – в результаті сумарного врахування диференціальних змінень в системі. Ті та інші рівняння дозволяють описати процес від початкового до кінцевого стану змінення параметрів.

Методом аналогій користуються достатньо широко в багатьох якісних та кількісних дослідженнях. У загальному випадку цей метод дозволяє складати рівняння для реальних об'єктів по аналогії з рівняннями для ідеальних об'єктів. Базуючись на спільності диференціальних рівнянь можна вивчати складні явища за допомогою більш простих.

В реології широко розповсюджений метод механічних моделей. Наприклад, для отримання наочної картини поведінці матеріалу під

дією напружень, кожному з його властивостей (пружність, в'язкість, пластичність) замінюють пружиною, поршнем або парою тертя ковзання. В реології також широко використовують геометричне, математичне, фізичне моделювання. Фізичне моделювання ефективне для отримання якісних та кількісних відповідностей об'єкту, який досліджується, натурному.

Метод аналізу розмінностей застосовують для складання критеріальних рівнянь при обробці експериментальних даних. При розробці методики експерименту, визначивши залежні та незалежні змінні та функціональну залежність між критеріям, можна встановити необхідні границі вимірювань.

Експериментальний метод дозволяє отримати розрахункові залежності. Тільки в результаті експерименту можна визначити границі застосування диференційного або інтегрального рівняння, знайти для теоретичних та емпіричних рівнянь коефіцієнти, які характеризують специфічність об'єкту, що досліджується, перевірити теоретичні положення на практиці та пов'язати теорію з практикою. Загальнопризнана теорія експериментальних досліджень – це теорія подібності, яка трактує умови подібності фізичних явищ та методи визначення цих умов. Теорія подібності дозволяє розробити методику експерименту. Подібні явища повинні мати однакові та чисельно рівні критерії, у тому числі і отримані з граничних та початкових умов. Часткова подібність може бути у випадку, коли однакові критерії, які враховують найбільш суттєві риси об'єкту в даному процесі.

До основних процесів, у вивчення яких реологія призвана внести суттєвий вклад, відносяться: нагнітання харчових мас, таких, як тісто для хлібопечення, бубличне та макаронне тісто, кондитерські маси, фарші, пасти та інші, різноманітними робочими органами: шнеками, валками, плунжерами, шестернями; пресування мас через отвори матриць для придання виробам необхідної форми; штампування пружно – пластично – в'язких мас для придання виробам форми, яка потрібна, або нанесення рельєфного малюнка; транспортування в'язких та в'язко – пластичних мас по каналам різного профілю; змішування двох або декількох компонентів для отримання однорідних сумішей; різання напівфабрикатів та готових продуктів; роздроблювання, сепарування, брикетування, таблетування та деякі інші процеси.

Вперше реологічні властивості розчину желатину вивчав В.Н. Шведов, використовуючи ротаційний віскозиметр. Подальшому розвитку реології послужили теоретичні труди Д. Максвелла (рівняння

поведінки пружно - в'язкого середовища, яке релаксує, в процесі деформування, Е. Бінгама (теорія пластичного потоку, яка забезпечила отримання аналітичних рівнянь для розрахунку деформації пластично – в'язких матеріалів, Б.П. Вайберга (інтегрування диференціального рівняння В. Н. Шведова для віскозиметра з циліндрами, які обертаються) та Е. Букінгама (інтегрування диференціального рівняння Е. Бінгама). Важливим етапом становлення реології як науки послужило створення у 1928 році Американського реологічного суспільства.

Фундаментальні труди по реології дисперсних систем П.А. Ребіндера, Г.В. Виноградова, М.П. Воларовича, М. Рейнера, І. Олройда, Ф. Р. Эйриха, а також труди по теорії та практиці течії пластично – в'язких середовищ Л.Я. Ауермана, В. А. Арета, А. В. Горбатова, В. Д. Косого, С.Н. Туменова, Г.Е. Лимонова, Л.Н. Луніна, А. М. Маслова, С. А. Мачихина, Ю. А. Мачихина, Н. И. Назарова, Б. А. Ніколаєва, І. А. Рогова та інших авторів сприяли розв'язанню питань, пов'язаних із пластичністю, в'язкістю та пружністю цих середовищ та послужили базою для удосконалення технологічних процесів та обладнання для переробки харчових продуктів.

Велика роль у розповсюдженні методів реології належить М. П. Воларовичу, який одним з перших почав застосовувати їх для різноманітних досліджень. Ротаційні віскозиметри системи М. П. Воларовича – найбільш розповсюдженні прилади, а фундаментальне теоретичне обґрунтування, яке виконав автор, робить їх придатними для вимірювання властивостей самих різноманітних дисперсних систем. Труди П. А. Ребіндера в області «пограничної» науки фізико-хімічної механіки значно визначили дослідження авторів далекого зарубіжжя.

Головна роль у використанні реологічних методів у м'ясній промисловості належить А. В. Горбатову. Він розробив методи удосконалення процесів і апаратів, технологічних прийомів обробки продукції тваринного походження на основі результатів, отриманих методами інженерної реології. А. В. Горбатовим створена наукова школа по реалізації та розробці методів реології в цілях оптимізації виробництва на основі створення нової техніки та технології [12-14].

Важливе місце у подальшому розвитку та застосуванні методів інженерної реології в харчовій промисловості належить Ю. А. Мачихину та С. А. Мачихину, які у своїх наукових трудах значно розширили уявлення о процесах, що відбуваються при обробці продуктів хлібопекарної, кондитерської та інших галузях харчових виробництв [29-33]. Розвитку інженерної реології в молочній промисловості при-

священні роботи А. М. Маслова, В. К. Ніколаєва, В. П. та інших вчених. Суттєвий вклад в розвиток реології в рибної промисловості вніс Г. В. Маслова [26-28, 34,].

У країнах близького та дальнього зарубіжжя існують потужні школи вчених - реологів, фамілії яких відомі всім фахівцям, що працюють в області дослідження реології харчових продуктів.

У даному підручнику наведений охват всіх сторін реологічної науки - від теоретичного описання реологічних законів та розглядання фізики головних реологічних властивостей, якими вони характеризуються, до описання результатів експериментальних реологічних досліджень різноманітних харчових продуктів.

Питання для самоконтролю

1. Які вирішують задачі та досягають цілі за допомогою інженерної реології?

2. Яка головна ціль фізико – хімічної механіки і що забезпечує реалізація цієї цілі?

3. На яких гіпотезах базуються для отримання рівнянь для розрахунків та висновків з них?

4. Чому реологічні дослідження займають значне місце для отримання продуктів високої якості?

5. Які основні методи використовуються у реологічних дослідженнях?

6. До вивчення яких технологічних основних процесів обробки харчових продуктів реологія призвана внести суттєвий вклад?

7. Які вчені стали основоположниками інженерної реології харчових продуктів?

5. Що виражають реологічні параметри при оцінці властивостей продуктів?

Розділ 1

НАУКОВІ ОСНОВИ ІНЖЕНЕРНОЇ РЕОЛОГІЇ

1.1 Класифікація реальних тіл

Місце реології як одного з розділів технічної механіки суцільного середовища серед інших її розділів наведено в таблиці 1.1 [14].

Таблиця 1.1 - Класифікація реальних тіл

Ідеально тверде тіло, Евклідове	Пружне тіло, Гукове	Пластичне тіло, Сен-Венанове	Реологічне тіло	В'язка рідина, ньютонівська	Ідеальна рідина, паскалевська
1	2	3	4	5	6
При будь-яких нормальних та дотичних напруженнях деформація дорівнює нулю	Напруження пропорційне деформації	При досягненні граничного напруження зсуву починаються пластичні деформації	Лінійні складові з Гукового, Сен-Венанового тіл та в'язкої ньютонівської рідини, нелінійні - емпіричні	Напруження пропорційне градієнту швидкості в першому ступеню	В'язкість та стисливість дорівнюють нулю
Теоретична механіка	Теорія пружності	Теорія пластичності	Реологія	Гідравліка	

Реологічні рівняння за своїм характером є найбільш загальними. Більшість рівнянь теорії пружності, пластичності, гідравліки можуть бути отримані у вигляді приватних випадків з реологічних.

Дослідження різноманітних видів деформації у залежності від супроводжуючих їх напружень і складає предмет реології.

Феноменологічна реологія вивчає однорідні або квазіоднорідні матеріали у припущенні, що вони є суцільними середовищами.

Макрореологія розглядає всі матеріали в тому вигляді, в якому їх бачить спостерігач при поверхневому огляді неозброєним оком, тобто, як однорідні, що не мають структури. Але феноменологічне однорідними є тільки чисті рідини та досконалі мікрочастинки. Більша частина матеріалів, які досліджуються реологією, є дисперсними системами, що складаються з двох або більше фаз. Мікрореологія розглядає реологічну поведінку двох або багатofазних систем в залежності від реологічних властивостей їх компонентів.

Питання для самоконтролю

1. Яке місце займає реологія серед інших розділів технічної механіки?
2. Який зв'язок між напруженнями і деформацією мають ідеально тверде тіло, пружне тіло, пластичне тіло?
3. Дайте характеристику реологічному тілу.
4. Який зв'язок між напруженнями та градієнтом швидкості має в'язка рідина?
5. Дайте характеристику ідеальної рідині.
6. Що складає предмет реології?
7. В якому вигляді макрореологія розглядає всі матеріали?

1.2 Класифікація дисперсних систем та їх структур

Класичними об'єктами інженерної реології є дисперсні системи, які складаються з двох або більш фаз [12, 50]. В них дисперсним середовищем є безперервна фаза, дисперсною фазою – роздроблена фаза, що складається з часток, які не контактують між собою. Фаза – це сукупність гомогенних часток системи, які обмежені від інших часток фізичними поверхнями розділу.

Дисперсні системи з рідинним дисперсійним середовищем можуть містити частки у вільному стані (золь), коли їх окремі елементи не пов'язані або слабо пов'язані один з одним, а частки дисперсійної фази вільно беруть участь у броунівському русі.

Дисперсні системи, в яких окремі елементи пов'язані один з одним молекулярними силами (гель), утворюють структуру, тобто просторовий каркас. До таких структур відноситься більшість харчових

середовищ (кисле молоко, кефір, фарш та інші). Гель – це дисперсна система, яка має просторову структуру та властивості твердих тіл (здібна зберігати форму, міцність, пружність) [21].

Спрощена класифікація дисперсних харчових продуктів, яка не враховує дисперсності та типу контактів між фазами, наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація харчових дисперсних систем

Дисперсне середовище	Дисперсна фаза	Назва системи	Приклади
Газ	Тверда	Пил, дим	Сухий порошок (молоко, мука) у повітрі
	Рідинна	Туман	Дисперсія крові, молока у розпилювальній сушарці
	Газообразна	-	-
Рідина	Тверда	Суспензія	Овочеві соки з м'якоттю, бульйон, розплавлений жир з білковими частками, ковбасний фарш, сиркова маса
	Рідинна	Емульсія	Масло у воді, молоко при високих температурах
	Газообразна	Піна	Крем, збитті сливки
Тверде тіло	Тверда	Тверда суспензія, сплав	Заморожена м'язова тканина
	Рідинна	Тверда емульсія	Вершкове масло, м'язова тканина
	Газообразна	Пористе тіло	Сир, кість

Наведені в таблиці дані дозволяють при визначенні реологічної поведінці продуктів відносити їх до тієї або іншої групи: сипучим, рідиннообразним і твердообразним (у залежності від концентрації дисперсної фази) або твердим.

В якості прикладів у таблиці наведені тільки деякі продукти. Продукт віднесений до тієї або іншої системи за головними ознаками.

Наприклад, ковбасний фарш після обробки у куттері є суспензією, яка насичена пухирчиками повітря, тобто являється трьохфазною системою. Один і той же продукт (тваринний жир, вершкове масло) у залежності від температури може бути віднесений до різних систем. Механічне втручання (різання, збивання, перемішування) також може викликати перехід з одного виду дисперсій у другий.

Структура, тобто внутрішня будова продукту, та характер взаємодії між окремими її елементами (частками) визначаються хімічним складом, біохімічними показниками, температурою дисперсністю, агрегатним станом та рядом технологічних факторів.

Більшість харчових продуктів у різній кількості містять воду [52]. Вона, являючись в більшості систем дисперсійним середовищем, у значному ступеню визначає структуру продукту. Тому вид або форма зв'язку вологи з продуктом визначають технологічні показники продукту та його структурно-механічні характеристики [9, 13]. Виділяють три основні форми зв'язку: хімічну, фізико-хімічну і фізико-механічну [51].

Хімічний зв'язок обумовлений іонними або молекулярними взаємодіями в точних кількісних співвідношеннях; вилучається ця волога з продукту пропіканням або в результаті хімічних реакцій. Вона різко відрізняється за своїми властивостями від вільної вологи.

Фізико-хімічний зв'язок обумовлений адсорбцією вологи в гідратних оболонках або осмотичним утримуванням в клітинах у не суворо визначених співвідношеннях; вилучається з матеріалу випаруванням, десорбцією (адсорбційна) або в наслідок різності концентрацій (осмотична). Адсорбційна волога може мати інші, ніж вода, властивості та сприяє диспергуванню часток і пластифікації системи, вона притаманна зазвичай структурам коагуляційного типу, але може існувати в структурах інших типів.

Фізико-механічний зв'язок обумовлений утримуванням вологи в комірках структури (імобілізаційна), в мікрокапілярах і макрокапілярах та налипанням її до поверхні часток або тіла (змочування) у невизначених співвідношеннях; вилучається з матеріалу випаруванням або механічними способами (віджимання та інші). Основна маса води знаходиться у вільному стані та не змінює своїх властивостей.

При збільшенні вмісту вологи її надлишок перестає бути пов'язаним з продуктом і спонтанно відділяється від нього (відстоювання, розшарування та інші).

За переваженням форми зв'язку вологи продукти можна поділити на колоїдні (фізико-хімічна пов'язана волога), капілярно-пористі (фізико-механічна пов'язана волога) та колоїдні капілярно-пористі, які мають якості, що притаманні першим та другим, наприклад м'ясний фарш і т. д. [44].

За класифікацією акад. П.А. Ребіндера [18, 38] структури харчових продуктів поділяються на коагуляційні та конденсаційно-

кристалізаційні.

Коагуляційні структури створюються в дисперсних системах при взаємодії між частками і молекулами через прошарки дисперсійного середовища завдяки Ван-дер-Ваальсових сил зчеплення. Товщина прошарку відповідає мінімуму вільної енергії системи. Термодинамічно стабільні системи, у яких з поверхнею часток міцно пов'язані фрагменти молекул, здібні без втрати цієї в'язі розчинюватися в дисперсійному середовищі. В свою чергу дисперсійне середовище знаходиться в пов'язаному стані. Ці структури володіють здібністю самодовільному відновленню після руйнування (тиксотропія). Зростання міцності після руйнування відбувається поступово, як правило, до першої початкової міцності. Товщина прошарок у визначеній мірі залежить від вмісту дисперсійного середовища. При збільшенні її вмісту значення властивостей зсуву звичайно зменшуються, а система з твердообразної переходить в рідиннообразну. При цьому ступінь дисперсності, тобто переважний розмір часток, навіть при постійній концентрації фази оказує вплив на стан системи та її міцність.

При зневодненні коагуляційних структур (при збільшенні вмісту дисперсної фази) міцність їх підвищується, після визначеної границі вони залишаються оборотно-тиксотропними. Відновлення структури зберігається в пластично-в'язкому середовищі, коли руйнування просторового каркасу відбувається без порушення суцільності.

При найбільшому ступеню ущільнення структури та найменшій товщині прошарок рідинного середовища відновлення і пластичність зникають, крива міцності у залежності від вологості дає злам. При цьому контакти часток ще залишаються точечними, вони можуть переходити в фазові шляхом спікання або з'єднання при значному підвищенні температур.

При утворенні коагуляційних структур у багатьох продуктах харчової промисловості суттєву роль грають поверхнево-активні речовини та розчинені у воді білки, які виступають у якості емульгаторів та стабілізаторів систем, що утворюються, та можуть суттєво змінювати їх структурно-механічні характеристики.

Кондесційно - кристалізовані структури притаманні натуральним продуктам, але вони можуть утворюватися з коагуляційних при усуванні дисперсного середовища або при з'єднанні часток дисперсної фази в розплавах або розчинах. В процесі утворення ці структури можуть мати ряд перехідних станів: коагуляційно-кондесційні, коагуляційно – кристалізовані; їх утворення характери-

зується безперервним зростанням міцності. Основні ознаки, які відрізняють структури такого типу наступні: велика в порівнянні з коагуляційними міцність, яка обумовлена високою міцністю самих контактів; відсутність тиксотропії та необоротний характер руйнування; висока хрупкість та пружність внаслідок жорсткого скелета структури; наявність внутрішніх напружень, що виникають в процесі утворення фазових контактів; внутрішні напруження визивають у наступному перекристалізацію та зменшення міцності впритул до порушення суцільності.

Таким чином, вид структури продукту обумовлює його якісні та технологічні показники і поведінку в процесах деформування. Для їх опису використовують криві течії або деформування, які пов'язують між собою напруження та швидкість деформації. Характер кривих течії дає змогу віднести даний реальний продукт до того або іншого виду реологічних тіл.

Питання для самоконтролю

1. Що являється класичними об'єктами інженерної реології?
2. Скільки фаз мають дисперсні системи?
3. Що таке фаза дисперсних систем?
4. На які групи поділяються продукти у залежності від їх реологічної поведінці?
5. Чи може механічне втручання викликати перехід з одного виду дисперсій у другий?
6. Чим визначаються структура та характер взаємодії між окремими її елементами?
7. Чим обумовлені хімічний, фізико-хімічний та фізико-механічний зв'язки вологи з продуктом?
8. Як можна поділити продукти у залежності від переваження форми зв'язку вологи і продукту?
9. Як створюються коагуляційні структури в дисперсних системах?
10. Як утворюються кондесаційно - кристалізовані структури в дисперсних системах?
6. Який вплив мають поверхнево-активні речовини та розчинені у воді білки при утворюванні коагуляційних структур в продуктах харчування?

1.3 Основні терміни та визначення реології

Розглянемо деякі основні фізико-механічні та математичні поняття, які використовуються в реології [13, 15, 50, 53].

Механічні властивості продукту оцінюються по механічній поведінці при різних зовнішніх умовах, тобто зміненню у часі деформації при заданому напруженні або зміненні напруження при заданій деформації. Харчові матеріали при технологічній обробці піддаються діянню зовнішніх навантажень, які викликають їх деформацію, внаслідок чого у матеріалі виникають внутрішні напруження.

Деформація - це змінення форми або лінійних розмірів тіла під дією зовнішніх сил, зміненні вологості, температури та інших факторів, при яких частки або молекули зміщуються одна відносно другої без порушення суцільності тіла. Розрізняють деформації зсуву, одноосні (лінійні) та об'ємні деформації.

Деформація зсуву аналогічна лінійної і відрізняється від неї спрямованістю дії напружень. При деформаціях зсуву виникають дотичні напруження, при одноосних (лінійних) та об'ємних – нормальні напруження.

Відносна деформація ε при одноосному розтягу - стиску (вільному або в формі) це відношення абсолютної деформації до первісних розмірів тіла, тобто:

$$\varepsilon = \Delta l / l . \quad (1.1)$$

Відносна деформація при зсуві γ - це відношення абсолютної величини зміщення зсуву шару під дією дотичних напружень до його товщини.

Оборотна деформація повністю зникає після зникнення причин, які її викликали. Ця деформація зветься пружною. Матеріал називається ідеально пружним, якщо має тільки пружну деформацію.

Пружна деформація може бути миттєвою або запізнілою [10].

Миттєва пружна деформація – це абстракція, оскільки в реальних тілах деформація і напруження розповсюджуються з кінцевою швидкістю. Але швидкість розповсюдження деформації настільки велика, що для зразків, які досліджуються, час розповсюдження деформації можна вважати дорівнюючим нулю.

Пружна деформація запізнювання відбувається з течію часу. Швидкість зростання цієї деформації при постійному напруженні мо-

нотонно зменшується. Після зняття напруження запізніла деформація зникає зі швидкістю, яка монотонно зменшується. Це явище називається запізнілим пружним відновленням.

Необоротна деформація (в'язка та пластична) повністю залишається після зникнення причин, які її викликали. Необоротна деформація – це течія матеріалу, тобто вона не може бути миттєвою. Ця деформація має два види: в'язка течія та пластична деформація. При в'язкої течії швидкість деформації пропорційна напруженню, яке прикладається (ньютонівська в'язкість). Цьому малому напруженню відповідає необмежене зростання деформації з часом, а після зняття напруження деформація не відновлюється. Пластична деформація виникає тільки тоді, коли напруження досягає деякої критичної величини. До досягнення цього значення напруження матеріал веде себе як ідеально пружне тіло.

Повзучістю називається явище зростання деформації при постійному напруженні, а відповідна деформація називається деформацією повзучості. Зменшення напруження при постійній деформації називається релаксацією. Вважається, що деформація створюється миттєво, а потім утримується постійною.

Навіть при малих напруженнях співвідношення між пружною, в'язкою та пластичною складовими деформації не зберігається постійним, і в матеріалі відбувається процес релаксації напружень.

Релаксація – це процес поступового розсіювання енергії пружної деформації, яка накопичилася у тілі, шляхом переходу її в тепло. У результаті релаксації напружень знижуються пружні та підвищуються пластичні властивості матеріалу, що веде до зменшення навантажень і енергії, яка витрачається на його переробку. Тому вивчення процесу релаксації напружень в масі з визначенням його констант має не тільки теоретичне, але і практичне значення.

Швидкість деформації (градієнт швидкості) враховують якщо деформації змінюються з часом t (с) при невстановленому процесі; при встановленому процесі деформування змінення деформації в одиницю часу постійне. Це описується поняттям «швидкість деформації» $\dot{\varepsilon}$ (с⁻¹) при розтягу - стиску та $\dot{\gamma}$ (с⁻¹) при зсуві:

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt ; \dot{\gamma} = d\gamma/dt . \quad (1.2)$$

Якщо деформація при зсуві під дією кінцевих сил збільшується безперервно та необмежено, тоді матеріал починає текти. Режим те-

чії, що встановився, характеризується градієнтом швидкості, який за сенсом аналогічний швидкості деформації:

$$\dot{\gamma} = du/dz, \quad (1.3)$$

де u - лінійна швидкість елементарного шару, м/с; z - координата по нормалі до вектору швидкості, м.

В залежності (1.3) не конкретизоване поняття «градієнт швидкості». Це може бути середній градієнт – консистентна змінна.

Наприклад, при ламінарному руху в прямій трубі:

$$\dot{\gamma} = 8\omega/d = 4\omega/R = 32V_c/(\pi d^3) = 4V_c/(\pi R^3), \quad (1.4)$$

де $\omega = 4V_c/(\pi d^2) = V_c/(\pi R^2)$ - середня об'ємна швидкість, м/с; V_c - об'ємна подача рідини крізь живий переріз труби, м³/с; $d = 2R$ - внутрішній діаметр і радіус труби, м.

При ламінарному руху в коаксіальному зазорі ротаційного віскозиметру:

$$\dot{\gamma} = 2\Omega/[1 - (R_B/R_H)^2], \quad (1.5)$$

де $\Omega = \omega/R_B = 2\pi N$ - кутова швидкість обертання ротору, рад/с;

R_B, R_H - внутрішній та зовнішній радіуси кільцевого зазору віскозиметру, м; ω - окружна швидкість віскозиметру, м/с; N - частота обертання ротору віскозиметру, об/с.

У загальному випадку градієнт швидкості та швидкість пов'язані співвідношенням [13]:

$$\dot{\gamma} = \alpha\omega, \quad (1.6)$$

де α - коефіцієнт, який залежить від товщини градієнтного шару та способу розрахунку градієнту швидкості, 1/м.

При опису процесів течії в диференціальній формі зазвичай враховують значення градієнту швидкості для будь-якого шару, який знаходиться на відстані r від осі ротору віскозиметру або труби. Тоді істинне значення градієнту швидкості:

$$\dot{\gamma}_{ICT} = -du/dr . \quad (1.7)$$

Найбільше значення градієнт швидкості набуває на стінці труби або у поверхні ротору, який обертається.

Напруження σ (Па) – міра внутрішніх сил P (Н), що виникають в тілі під впливом зовнішніх діянь на одиницю площі F (m^2), яка нормальна до вектору прикладення сили:

$$\sigma = P/F . \quad (1.8)$$

Напруження в точці:

$$\sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} (\Delta P / \Delta F) . \quad (1.9)$$

Формально дотичні напруження, або зсуву θ , нормальні напруження σ , тиск або гідростатичний тиск p , адгезія або тиск прилипання p_0 описуються залежністю (1.8), де сила та площа будуть мати відповідний фізичний сенс.

Гідростатичний тиск це відношення сили, яка рівномірно розподілена по нормальній поверхні, до площі цієї поверхні. Тиск в точці істинно - в'язких рідин або в рідинообразних системах не залежить від орієнтації площадки, в пластично - в'язких системах, які мають структурний каркас, - залежить. Якщо на тіло, що знаходиться у замкнутому визначеному об'ємі, діє гідростатичний тиск p , то в нормальному напрямку буде діяти менший тиск p_r . Їх відношення характеризується коефіцієнтом бокового тиску ζ :

$$\zeta = p_r / p . \quad (1.10)$$

Коефіцієнт бокового тиску для істинно - в'язкої рідини дорівнює одиниці, для абсолютно твердого тіла – нулю.

У випадку, коли неідеальне тіло, у якого $0 < \zeta < 1$ не знаходиться у замкнутої жорсткої об'ємі і піддається дії одноосного напруження розтягу або стиску, відбувається зміна його форми. При умові постійного об'єму, наприклад при одноосному стиску, відбувається зменшення висоти тіла та збільшення його поперечних розмірів, що характеризується відносними деформаціями ε і ε_r . Відношення цих ве-

личин дорівнює коефіцієнту Пуассона μ :

$$\mu = \varepsilon_r / \varepsilon. \quad (1.11)$$

При одноосному стиску пластично – в'язких тіл, які не знаходяться в жорсткої формі, поряд з пружними деформаціями можливі необоротні пластичні деформації, що пов'язані зі зменшенням об'єму. Тоді об'ємна деформація ε_V буде дорівнювати відношенню змінення об'єму тіла $\Delta V = V - V_k$ до його первісного об'єму V :

$$\varepsilon_V = \Delta V / V. \quad (1.12)$$

Об'ємна деформація є сумою відносних деформацій по трьом перпендикулярним осям:

$$\varepsilon_V = \varepsilon - 2\varepsilon_r = \varepsilon(1 - 2\mu). \quad (1.13)$$

Початковий та кінцевий стан системи при об'ємному стиску в формі можна пов'язати першим началом термодинаміки:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A, \quad (1.14)$$

де ΔQ - кількість тепла, яке підведене до системи або відведене від неї, Дж; ΔU - зміна внутрішньої енергії системи, Дж; ΔA - механічна робота, яка здійснюється системою проти зовнішніх сил, Дж.

Для адіабатичного процесу $\Delta Q = 0$; $\Delta U = -\Delta A$, а робота зовнішніх сил дорівнює роботі внутрішніх сил з протилежним знаком, тобто:

$$\Delta A = p\Delta V + V\Delta p, \quad (1.15)$$

де p - тиск, Па; V - об'єм продукту, м³.

Залежність для розрахунку питомої роботи при постійному тиску $\Delta p = 0$:

$$A_{\text{пит}} = \frac{\Delta A}{V} = p \frac{\Delta V}{V} = p \frac{V - V(p,t)}{V} = p\varepsilon(p,t), \quad (1.16)$$

де V - початковий об'єм системи, м³; $V(p, t)$ - об'єм при дії тиску p у будь – який момент часу t ; $\varepsilon(p, t)$ - відносна об'ємна деформація у будь – який момент часу.

Для багатьох пластично – в'язких тіл можна застосовувати кінетичне рівняння деформації:

$$\varepsilon(p, t) = \alpha_\varepsilon p^{\alpha_1} (1 + \alpha_2 \lg t), \quad (1.17)$$

де $\alpha_\varepsilon, \alpha_1, \alpha_2$ - коефіцієнти, які залежать від механічних факторів, фізико-хімічного стану продукту, складу та особливостей сировини.

Кінетичне рівняння є головним для розрахунків, пов'язаних з визначенням енергії деформації та величини деформації.

Це рівняння застосовується також для опису процесу деформування зсуву:

$$\gamma(\theta, t) = \alpha_\gamma \theta^{\alpha_1} (1 + \alpha_2 \lg t), \quad (1.18)$$

Гідростатичний стиск при одноосному стиску продукту по висоті форми або труби змінюється [40]. Це явище необхідно враховувати, наприклад, при набитті в гільзу пластично – в'язкого продукту.

При стиску продукту поршнем з одного торцю у вузької трубі діаметром d тиск p , який прикладений до поверхні, по висоті буде зменшуватися і на відстані h буде мати значення p_h . Для розрахунку осового та бокового тисків рівняння мають вигляд:

$$p_h = p e^{-a_1 d - a_2 h}; \quad p_{rh} = \xi p_h, \quad (1.19)$$

де a_1, a_2 - емпіричні коефіцієнти.

Для порошкових матеріалів:

$$p_h = p e^{-4\xi d^{-1} f h}, \quad (1.20)$$

де f - коефіцієнт тертя.

Ці рівняння показують, що чим більше діаметр циліндра, тим менше зменшення тиску по висоті.

Пружність – це здібність тіла після деформування повністю відновлювати свою первісну форму або об’єм, тобто робота деформування дорівнює роботі відновлення. Пружність тіл характеризується модулем пружності першого роду E (Па) при розтягу – стиску, або другого роду G (Па) при зсуві.

Величини деформацій визначаються законом Гука:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad \theta = \gamma G. \quad (1.21)$$

При об’ємному стиску напруження σ та деформації пов’язані об’ємним модулем пружності K (Па):

$$\sigma = K\varepsilon_V, \quad (1.22)$$

де ε_V - об’ємна деформація.

Об’ємний модуль пружності дорівнює:

$$K = E/[a(1 - 2\mu)]. \quad (1.23)$$

При одноосному деформуванні тіла у замкнутому об’ємі $a=1$, при трьохосному деформуванні, коли прикладені однакові напруження, $a=3$.

Об’ємний модуль пружності може бути розрахований також за формулою:

$$K = EG/(E + G). \quad (1.24)$$

Часто для опису властивостей продуктів у різних зонах деформування не достатньо класичних понять про модулі пружності. Тоді використовуються модулі пружності, які отримали розповсюдження в реології, умовно – миттєвий, еластичний та інші.

Коефіцієнт об’ємного стиску β (1/Па) може бути використаний як деяка інтегральна характеристика стиску продукту в формі:

$$\beta(p, t) = \Delta V / (V \Delta p) = \varepsilon(p, t) / \Delta p, \quad (1.25)$$

де Δp - змінення тиску.

Коефіцієнт об'ємного стиску характеризує відносне змінення об'єму продукту при змінні тиску на одиницю його вимірювання. Для ньютонівських рідин коефіцієнт об'ємного стиску практично не залежить від величини тиску і часу його дії; для пластично – в'язких систем зі збільшенням тиску він зменшується.

Коефіцієнт бокового стиску ξ - це відношення бокового стиску p_δ до осьового p_0 при дії нормальних напружень в замкнутому об'ємі:

$$\xi = p_\delta / p_0 . \quad (1.26)$$

Адгезія p_0 (Па) – злипання різнорідних твердих або рідинних тіл, які стикаються своїми поверхнями. Адгезія визначається як питома сила нормального відриву пластини від продукту:

$$p_0 = P_0 / F_0 , \quad (1.27)$$

де P_0 - сила відриву, Н; F_0 - геометрична площа пластини, м².

Аутогезія - самочинне злипання однорідних тіл.

Відрив може бути трьох видів: по границі контакту – адгезійний, по шару продукту – когезійний та змішаний – адгезійно – когезійний. Часто адгезійний відрив не відбувається, тому питому силу при будь-якому виді відриву називають липкістю, адгезійним тиском або тиском прилипання [34, 41].

Зовнішнє тертя – це взаємодія між тілами на границі їх зіткнення, яка перешкоджає відносному переміщенню тіл вздовж поверхні зіткнення. Зовнішнє тертя залежить від зусилля нормального контакту та липкості, визначається за законом Б.В. Дерягіна:

$$P_{TEP} = f(P_K + P_0 F_0) , \quad (1.28)$$

де f - коефіцієнт зовнішнього тертя; P_K - сила, нормальна до поверхні зсуву (зусилля контакту).

Або, якщо величини цього рівняння поділити на площу, отримуємо:

$$p_{TEP} = f(p_K + p_0), \quad (1.29)$$

Ефективний коефіцієнтом зовнішнього тертя:

$$f_{E\Phi} = \frac{p_{TP}}{p_K}, \quad (1.30)$$

пов'язаний з коефіцієнтом тертя

$$f_{E\Phi} = f(1 + p_0/p_K). \quad (1.31)$$

Пластичність – здібність тіла під дією зовнішніх сил необоротно деформуватися без порушення суцільності. Пластична течія починається при величині напруження, яке дорівнює границі текучості. В реології при деформаціях зсуву використовують поняття «граничне напруження зсуву» θ_0 .

В'язкість – здібність тіла оказувати опір відносному зміщенню його шарів. В'язка течія відбувається в істинно – в'язких, ньютонівських рідинах при будь яких малих напруженнях зсуву θ . Ця течія описується рівнянням Ньютона:

$$\theta = \eta \dot{\gamma} \quad \text{або} \quad P = \eta F du/dz, \quad (1.32)$$

де η - коефіцієнт динамічної або абсолютної в'язкості (Па·с), який характеризує величину зусиль, що виникають між двома елементарними шарами рідини при їх відносному зміщенні; $\dot{\gamma}$ - швидкість деформації (s^{-1}); P - сила опору між двома елементарними шарами (Н); F - площа поверхні зіткнення цих шарів (m^2); du/dz - градієнт швидкості, тобто інтенсивність змінення швидкості по нормалі до її вектору (s^{-1}).

Повна в'язкість складається з ламінарної (ньютонівської), турбулентної та об'ємної в'язкостей.

При течії неньютонівських (аномально – в'язких) рідин в'язкість не залишається постійною величиною, а залежить від напруження зсуву та градієнту швидкості. Тоді використовується поняття «ефективна в'язкість», яка для зафіксованих значень напруження та градієнта швидкості розраховується за формулою:

$$\eta_{E\Phi} = \frac{\theta}{\dot{\gamma}}. \quad (1.33)$$

Напруження зсуву та швидкість деформації можуть бути наведені в диференціальній або інтегральній формі, наприклад, як константні змінні для циліндричної труби, кільцевого зазору коаксіального віскозиметру. Ефективна в'язкість є підсумковою характеристикою, яка описує рівноважний стан між процесами відновлення та руйнування структури в усталеному потоці.

Питання для самоконтролю

1. Як оцінюються механічні властивості продукту?
2. Що таке деформація, під дією яких факторів вона відбувається. Які бувають види деформації?
3. Яка деформація зветься пружною; що таке миттєва пружна деформація і що таке пружна деформація запізнювання?
4. Яка деформація зветься необоротною, які види вона має?
5. Наведіть поняття повзучості та релаксації.
6. При яких умовах враховують швидкість деформації?
7. Що таке напруження і які види напруження бувають?
8. Сформулюйте поняття «гідростатичний тиск».
9. Чому дорівнює об'ємна деформація?
10. Для яких розрахунків кінетичне рівняння є головним?
11. Яку здібність тіла характеризує пружність?
12. Які модулі пружності отримали розповсюдження в реології?
13. Що означають поняття «адгезія», «аутогезія»?
14. Які здібності тіла визначають пластичність і в'язкість?

1.4 Класифікація неньютонівських систем

Ламінарна течія ньютонівської рідини описується законом Ньютона $\theta = \eta\dot{\gamma}$. Ньютонівська поведінка притаманна рідинам, у яких в'язка дисипація енергії обумовлена зіткненням невеликих молекул. Всі гази, рідини та розчини входять в цю категорію. Виключенням є колоїдні суспензії та розчини зі значними молекулярними масами.

До неньютонівських систем відносяться системи, крива течії яких не є лінійною, тобто в'язкість не залишається постійною при заданих температурі та тиску, а залежить від інших факторів: швидкість

деформації зсуву, конструктивні особливості апаратури, в якій знаходиться продукт, складу продукту.

Реальні системи з нелінійною кривою течії можна поділити на три численні групи [48, 54]: 1) системи, для яких швидкість зсуву в кожній точці являє деяку функцію тільки напруження зсуву в тієї же точці; 2) більш складні системи, в яких зв'язок між напруженням та швидкістю зсуву залежить від часу дії напруження; 3) системи, які володіють властивостями як твердого тіла, так і рідини, вони частково проявляють пружне відновлення форми після зняття напруження.

Неньютонівські системи з реологічними характеристиками, які не залежать від часу. Системи першого типу, властивості яких не залежать від часу, можуть бути описані реологічним рівнянням:

$$\dot{\gamma} = f(\theta), \quad (1.34)$$

з якого слідує, що швидкість зсуву в кожній точці є простою функцією напруження зсуву в цій точці.

Такі речовини зветься неньютонівськими в'язкими матеріалами. Їх зручно підрозділяти на три групи у залежності від виду функції в рівнянні (1.34): а) бінгамовські пластичні тіла; б) псевдо-пластичні матеріали; в) ділатантні рідини.

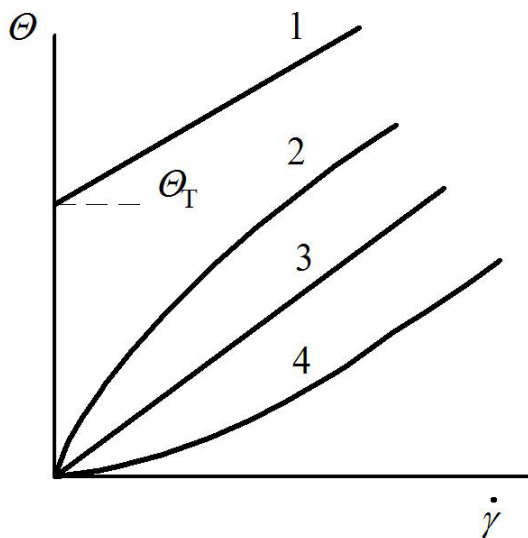


Рисунок 1.1 – Криві течії для різних типів неньютонівських систем:

- 1 – бінгамовський пластик;
- 2 – псевдо пластична система;
- 3 – ньютонівська рідина;
- 4 – ділатантна система

Криві течії, які характерні для цих трьох груп речовин, наведені на рисунку 1.1; для порівняння зображений також графік лінійної залежності для ньютонівських рідин. Крива течії бінгамовських пластичних тіл є прямою лінією, яка перетинає вісь напруження зсуву на відстані θ_T від її початку.

Напруження текучості θ_T є границею, перевищення якої приводить до виникнення в'язкої течії. Реологічне рівняння для цих тіл:

$$\theta - \theta_T = \eta_{II} \dot{\gamma}; \quad \theta > \theta_T, \quad (1.35)$$

де η_{II} - пластична в'язкість або коефіцієнт жорсткості при зсуві, який чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу кривої течії.

Поняття ідеалізованого бінгамовського пластичного тіла зручно для практики, оскільки багато реальних продуктів харчування відносяться до цього типу. Пояснення поведінці бінгамовських тіл виходить з припущення про наявність у тіла достатньо жорсткої просторової структури, щоб чинити опір будь – якому напруженню, що не перевищує θ_T .

Якщо напруження перевищує θ_T , то структура повністю руйнується, і система поводить ся як ньютонівська рідина. Коли напруження зсуву стає менш, ніж θ_T , структура знову відновлюється.

Псевдопластичні матеріали не виявляють границі текучості, і крива течії стає лінійною тільки при дуже великих швидкостях деформації зсуву. Граничний нахил графіка, який отримав назву в'язкості при нескінченно великому зсуві, позначається η_{∞} .

Графік залежності між напруженням зсуву та швидкістю в логарифмічних координатах у псевдопластичних матеріалів, як правило, оказується лінійним з тангенсом кута нахилу між нулем та одиницею. Тоді для опису матеріалів цього типу можна встановити емпіричну функціональну залежність у вигляді степеневого закону. Ця залежність, вперше запропонована Оствальдом і потім удосконалена Рейнером [39], має вигляд:

$$\theta = k\dot{\gamma}^n, \quad (1.36)$$

де k і n - постійні величини ($n < 1$) для даного матеріалу; k - міра консистенції матеріалу (чим більше в'язкість, тим більше k); n - характеризує ступінь неньютонівської поведінки матеріалу.

Чим більше n відрізняється від одиниці, тим виразніше проявляються неньютонівські властивості матеріалу.

Ефективну в'язкість $\eta_{E\Phi}$ для степеневого закону надають у вигляді

$$\eta_{E\Phi} = k\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (1.37)$$

Оскільки $\eta_{E\Phi} = \theta/\dot{\gamma}$, для псевдопластичних матеріалів $n < 1$, то ефективна в'язкість зменшується зі зростанням швидкості зсуву. Вва-

жають, що фізичне обґрунтування псевдопластичності полягає в тому, що зі зростанням швидкості зсуву асиметричні частки або молекули поступово орієнтуються. Молекули замість випадкових (хаотичних) рухів великими осями орієнтуються вздовж спрямованості потоку. Ефективна в'язкість буде зменшуватися зі збільшенням швидкості зсуву, доки зберігається можливість подальшого орієнтування часток вздовж лінії потоку, а потім крива течії стає лінійною. Вважається, що орієнтування молекул відбувається миттєво, як тільки зростає швидкість зсуву.

Емпіричні рівняння для опису псевдопластичних матеріалів.

Рівняння Прайдтля:
$$\theta = A \arcsin\left(\frac{\dot{\gamma}}{C}\right).$$

Рівняння Ейрінга:
$$\theta = \frac{\dot{\gamma}}{B} + C \sin\left(\frac{\theta}{A}\right). \quad (1.38)$$

Рівняння Пауелла - Ейрінга:
$$\theta = A\dot{\gamma} + B \operatorname{Arsh}(C\dot{\gamma}).$$

Рівняння Уильямсона:
$$\theta = A\dot{\gamma}/(B + \dot{\gamma}) + \eta_{\infty}\dot{\gamma}.$$

В рівняннях A , B , C є постійними величинами, які визначаються для конкретних матеріалів.

Ділатантні рідини схожі з псевдопластичними матеріалами, оскільки вони також мають границю текучості, але їх ефективна в'язкість підвищується зі зростанням швидкості зсуву. Степеневий закон у даному випадку також застосовують, але показник ступеню n буде перевищувати одиницю. Такий тип течії вперше виявив Рейнольдс в суспензіях при великому вмісті твердої фази. Він вважав, що ці суспензії мають мінімальний об'єм прошарок між твердими частками, і рідини достатньо тільки для заповнення цих прошарок. Якщо такі матеріали піддаються зсуву з невеликою швидкістю деформації, рідина являється мастилом, яке зменшує тертя часток, і напруження невеликі. При великих зсувах матеріал розбухає, збільшується в об'ємі, і розміри рідинних прошарок зростають. При новій структурі рідини недостатньо для змазування часток, які труться, і напруження значно зростають. Процес структуроутворення є причиною швидкого зростання ефективної в'язкості при збільшенні швидкості зсуву.

Термін «ділатантна» застосовується для рідин, ефективна в'язкість

яких зі збільшенням швидкості зсуву підвищується.

Для неньютонівських систем, реологічні характеристики яких залежать від часу, ефективна в'язкість залежить не тільки від швидкості зсуву, але і від тривалості зсуву. Ці системи відповідно тому зменшується або зростає з часом напруження зсуву, якщо тіло деформується з постійною швидкістю зсуву, поділяються на два класи: а) тиксотропні; б) реопексні.

Тиксотропними називаються матеріали, консистенція яких залежить від тривалості та величини швидкості зсуву. При деформуванні цього матеріалу з постійною швидкістю зсуву структура буде поступово руйнуватися, а ефективна в'язкість зменшуватися протягом часу. Швидкість руйнування структури при визначеній швидкості зсуву залежить від кількості зв'язків до початку руйнування структури і повинна зменшуватися протягом часу. Одночасно буде зростати швидкість відновлення структури, оскільки кількість можливих нових зв'язків збільшується. Коли швидкості структуроутворення і руйнування структури будуть дорівнювати одна однієї, настає динамічна рівновага. Тиксотропія є оборотнім процесом, оскільки, якщо напруження знімається, структура матеріалу поступово відновлюється. Така особливість веде до того, що крива течії утворює гістерезисну петлю.

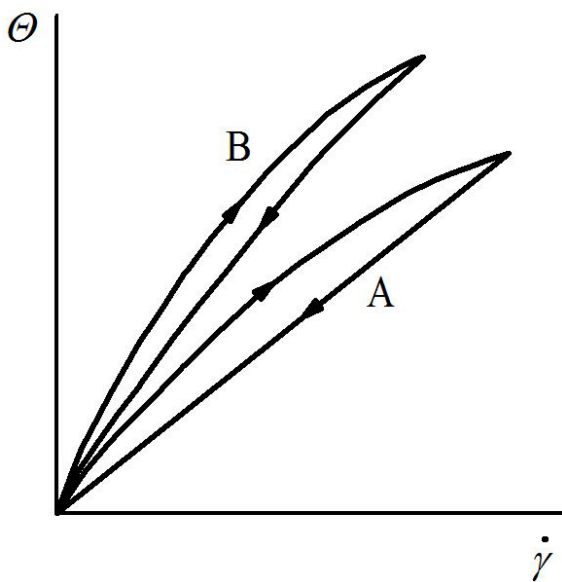


Рисунок 1.2 – Гістерезисні петлі тиксотропних матеріалів

На рисунку 1.2 наведені криві *A* та *B*, побудовані для тиксотропних матеріалів ньютонівського та псевдопластичного типів. Висхідна гілка кривої течії отримана при дії поступово зростаючого з часом напруження зсуву. Термін «псевдотіло» був введений Прайс – Джонсом, щоб розрізнити тиксотропію бінгамовських пластичних систем.

Істинно тиксотропні матеріали повністю руйнують свою структуру під дією великих напружень зсуву і поводять себе подібно чистим рідинам після зняття напружень до відновлення структури.

Псевдотіла не утрачають повністю властивостей твердого тіла та проявляють текучість при невеликих навантаженнях.

Реопексні матеріали мають властивість поступово утворювати

структуру при зсуві. При критичній величині зсуву, після перевищення якої відновлення структури не відбувається.

В'язко - пружним називається матеріал, який проявляє як пружне відновлення форми, так і в'язку течію. В такому матеріалі енергія пружної деформації накопичується в процесі течії завдяки міжфазовому натягу, яке викликає появу сили, що протидіє зміненню форми часток. В'язко - пружний матеріал не може бути охарактеризований простим реологічним рівнянням $\dot{\gamma} = f(\theta)$. Основна різниця в тому, що його реологічне рівняння у загальному випадку містить похідні за часом від напруження зсуву та деформації зсуву:

$$f_1(D)\theta = f_2(D)\gamma, \quad (1.39)$$

де D - диференціальний оператор d/dt .

Це рівняння є загальним, і при конкретних граничних умовах його розв'язання описує реакцію матеріалу при будь-якому напруженні або деформації. Розв'язання подібних рівнянь для реальних матеріалів викликає труднощі, але можна отримати багато якісних відомостей, якщо вивчати ідеалізовані механічні моделі, призначені для близького відтворення реологічної залежності реального матеріалу.

Питання для самоконтролю

1. Яким законом описується ламінарна течія ньютонівської рідини?
2. Яким рідинам притаманна ньютонівська поведінка?
3. Які системи відносяться до неньютонівських?
4. На які групи поділяються реальні системи з нелінійною кривою течії?
5. При яких умовах крива течії стає лінійною у псевдопластичних матеріалів?
6. Яким реологічним рівнянням можуть бути описані системи, властивості яких не залежать від часу?
7. Якими емпіричними рівняннями користуються для опису псевдопластичних матеріалів?
8. Для яких рідин застосовується термін «ділатантна»?
9. На які класи поділяються неньютонівські системи з реологічними характеристиками, які залежать від часу відповідно тому змен-

шується або зростає з часом напруження зсуву?

10. Які матеріали називаються тиксотропними?

11. Які матеріали відносяться до в'язко – пружних?

1.5 Основні рівняння напружень та деформацій реальних тіл

Структурно-механічні властивості характеризують поведінку продукту в умовах напруженого стану і дозволяють пов'язати між собою напруження, деформації або швидкості деформацій в процесі прикладення зусиль. Вони не є «чистими» константами матеріалу та суттєво залежать від форми і розмірів тіла, швидкості навантаження, стану поверхні, впливу навколишнього середовища, температури, структури і множини інших факторів.

При відомих характеристиках можна визначити значення напружень або деформацій та отримати необхідні параметри процесу або апарату, тобто виконати розрахунки міцності та технологічні розрахунки. Окрім того, властивість продукту як об'єктивна реальність дозволяє характеризувати його якість. Тому особисте значення в реології має вид рівняння, яке пов'язує між собою за допомогою постійних величин властивості, напруження та деформації для кожного конкретного продукту [42]. Вибір такого рівняння з множини інших обумовлений відповідністю теоретичної або емпіричної залежності течії продукту реальної кривої течії, тобто реальним умовам. Нерідко помилки при визначенні властивостей та їх використання для розрахунків містяться в тому, що для узагальнення дослідницьких даних обирають моделі, які не відповідають течії реального об'єкту.

Будь - який процес як безперервну зміну явищ у часі можна розглядати не тільки комплексно, але і по найбільш характерним ознакам. Реологічні характеристики не однакові у різних процесах деформування: рух в одних робочих органах машин супроводжується великими значеннями градієнту швидкості та напруження, в інших – невеликими. Тому для розрахунків процесів необхідно використовувати властивості, визначені у відповідних інтервалах напружень та деформацій. Якість продукту також необхідно оцінювати по найбільш істотним для даного процесу властивостям.

По способу прикладення зусиль або напруження к продукту реологічні властивості підрозділяються на три пов'язані між собою групи: властивості зсуву, компресійні та поверхневі властивості.

Властивості зсуву визначають поведінку продукту при дії на нього дотичних напружень зсуву. Основними властивостями зсуву пластично - в'язких продуктів є гранична напруга зсуву, пластична та ефективна в'язкості. Вони дозволяють оцінювати якість продукту, ступінь його обробки.

Компресійні (об'ємні) властивості характеризують поведінку об'єму продукту при дії нормальних напружень у замкненої формі або між двома пластинами. Параметри, які визначають об'ємні властивості: модуль пружності, рівноважний модуль, період релаксації деформації і напруження, відносна об'ємна деформація.

Поверхневі властивості характеризують поведінку продукту на границі розділу з іншим твердим матеріалом при дії нормальних (адгезія або липкість) та дотичних (зовнішнє тертя) напружень.

Для об'єктивного оцінювання якості виробів визначають різноманітні механічні характеристики.

Лінійні рівняння напружень та деформацій широко використовуються для опису деформаційної поведінці харчових продуктів при напруженнях зсуву та при нормальних напруженнях [13, 50].

Процеси у рідиннообразному середовищі, яке релаксує, (Максвеллова в'язко – пружна рідина), коли напруження, які викликані зовнішнім діянням, зменшуються у часі описуються рівнянням Максвелла. Під дією напруження θ в тілі виникає деформація γ , яка має визначену у часі швидкість $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$, що складається з пружної $\dot{\gamma}_{PP}$ та в'язкої $\dot{\gamma}_{ВЯЗ}$ складових. Пружну складову знаходять диференціюванням за часом закону Гука:

$$(d\gamma/dt)_{PP} = d\theta/(Gdt) = \dot{\theta}/G, \quad (1.40)$$

В'язку складову визначають з рівняння Ньютона:

$$(d\gamma/dt)_{ВЯЗ} = \theta/\eta. \quad (1.41)$$

Сумуючи дві складові, отримуємо рівняння Максвелла, яке можна інтегрувати для приватних випадків:

$$d\gamma/dt = d\theta/(Gdt) + \theta/\eta, \quad \eta\dot{\gamma} = \eta\dot{\theta}/G + \theta, \quad (1.42)$$

Якщо деформація постійна, тобто $\dot{\gamma} = 0$, то відбувається процес

розсмоктування, релаксації напружень, при чому при $t = 0$ напруження дорівнює якому – то початковому значенню $\theta = \theta_1$. При інтегруванні в границях від θ_1 до θ та від 0 до τ отримують рівняння:

$$\theta = \theta_1 e^{-Gt/\eta} . \quad (1.43)$$

Це рівняння називається експоненціальним законом релаксації напружень. Якщо обозначити в цьому рівнянні $\eta/G = t_p$, то рівняння приймає вигляд:

$$\theta = \theta_1 e^{-t/t_p} , \quad (1.44)$$

де t_p - період релаксації, с.

Період релаксації характеризує швидкість процесу переходу системи з нерівноважного термодинамічного стану, який викликаний зовнішнім діянням, у стан термодинамічної рівноваги. За цей період напруження зменшується у 2,7 рази.

В багатофазній реальній системі може відбуватися одночасно декілька процесів з різними періодами релаксації. Після завершення процесів з найменшим періодом настає неповна статична рівновага. Поведінку тіла можна описати кривою розподілення періодів релаксації [15, 50].

При складанні пружних та в'язких напружень для пружно – в'язкого твердого тіла Фогта – Кельвіна отримують наступне рівняння:

$$\theta = \gamma G + \eta d\gamma/dt \quad \text{або} \quad \theta = G[\gamma + (\eta/G)\dot{\gamma}] . \quad (1.45)$$

При знятті напруження $\theta = 0$ та інтегруванні в границях від γ_{\max} до γ і від 0 до t отримують експоненціальну функцію для релаксації деформації:

$$\gamma = \gamma_{\max} e^{-Gt/\eta} \quad \text{або} \quad \gamma = \gamma_{\max} e^{-t/t_p} . \quad (1.46)$$

Якщо середовище, яке підпорядковане рівнянню Фойгта – Кельвіна, навантажити постійним напруженням θ_2 при $t > 0$, то інтегрування дає результат:

$$\gamma = \theta_2 / G [1 - e^{-t/t_p}] , \quad (1.47)$$

тобто деформація у часі поступово збільшується, прямуючи до значення $\gamma_{\infty} = \theta_2/G$ при $t \rightarrow \infty$.

Комбінація рівнянь для моделей Максвелла та Фойгта – Кельвіна приводить до математичної залежності для моделі стандартного лінійного тіла [13, 41]:

$$\theta + t_{\gamma} \dot{\theta} = G_R (\gamma + t_0 \dot{\gamma}), \quad (1.48)$$

де G_R - релаксаційний модуль пружності, який визначається співвідношенням між пружними та пластичними характеристиками продукту; t_{γ} - період релаксації напруження при постійній деформації; t_0 - період релаксації деформації при постійному напруженні.

Модифікація цього рівняння для малих швидкостей зсуву була отримана Олройдом:

$$\theta + t_{\gamma} \dot{\theta} = \eta_0 (\dot{\gamma} + t_0 \ddot{\gamma}), \quad (1.49)$$

де η_0 - найбільша в'язкість практично незруйнованої структури, Па·с; $\ddot{\gamma} = d^2\gamma/d\tau^2$ - друга похідна відносної деформації за часом, $1/c^2$.

При складенні напружень, відповідних пластичної та в'язкої течіям, отримують рівняння Шведова – Бінгама для пластично – в'язкого середовища:

$$\theta = \theta_0 + \eta d\gamma/dt. \quad (1.50)$$

Це рівняння використовували для опису деформаційної поведінки багатьох харчових продуктів (ковбасний фарш, маси праліне для цукерок та інших).

У більшість наведених рівнянь входить величина періоду релаксації, яка має велике значення при дослідженні фізико – механічних властивостей, особливо при малих напруженнях і часу дії напруження того ж порядку, як період релаксації.

Для тиксотропних систем напруження звичайно не релаксує до нуля. Тому Д.С. Великовський [8] вважає, що процеси старіння, які є слідством коагуляції та зміцнення структурної сітки внаслідок зли-

пання близько розташованих часток, збільшують міцність структурного каркасу. Тривале вимірювання розвитку процесу релаксації не можливе, оскільки кінцеві умови не будуть відповідати початковим.

Нелінійні емпіричні рівняння напружень та деформацій широко використовуються в реології, оскільки нерідко лінійні рівняння не дозволяють достатньо точно описати криву течії.

Нижче наведені два основних рівняння, які використовуються для опису течії харчових мас; Ряд інших можна отримати з них у вигляді приватних випадків.

Рівняння Шульмана [53]:

$$\left(\theta^{\frac{1}{a}} - \theta_0^{\frac{1}{a}} \right)^b = \eta \dot{\gamma}, \quad (1.51)$$

де a, b - коефіцієнти, які визначаються експериментально; при $a=b=2$ це рівняння перетворюється в рівняння Кассона:

$$\theta^{\frac{1}{2}} = \theta_0^{\frac{1}{2}} + (\eta \dot{\gamma})^{\frac{1}{2}} \quad \text{або} \quad \theta^{\frac{1}{2}} = a_0 + a_1 \dot{\gamma}^{\frac{1}{2}}. \quad (1.52)$$

Рівняння Гершеля – Балкли [13]:

$$\theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\gamma}^n, \quad (1.53)$$

де B_1^* - коефіцієнт, пропорціональний в'язкості при градієнті швидкості, який дорівнює одиниці, Па·сⁿ; n – індекс течії.

При $\theta_0 = 0$ рівняння набуває вигляд степеневого рівняння Освальда де Вале:

$$\theta = B_1^* \dot{\gamma}^n, \quad (1.54)$$

При $n = 1$ - Шведова – Бінгама, тоді B_1^* являє собою пластичну в'язкість.

Наведені залежності дозволяють описати поведінку харчових продуктів в різних умовах деформування при прикладенні нормальних та дотичних напружень.

Питання для самоконтролю

1. Що визначають властивості зсуву продукту? Які параметри дозволяють оцінювати якість продукту та ступінь його обробки при зсуві?
2. Що визначають компресійні (об'ємні) властивості зсуву продукту? Які параметри дозволяють оцінювати об'ємні властивості продукту?
3. Що характеризують поверхневі властивості продукту? Які є види поверхневих властивостей?
4. Яке середовище описується рівнянням Максвелла, а яке підпорядковане рівнянню Фойгта – Кельвіна?
5. Що характеризує період релаксації?
6. Чому в реології використовуються не тільки лінійні, а також нелінійні емпіричні рівняння напружень та деформацій?
7. Які основні нелінійні рівняння використовуються для опису течії харчових мас?

1.6 Реологічні механічні моделі

Механічні випробування поділяються на квазістатичні, при яких напруження або деформація залишаються постійними в деякому інтервалі часу, та динамічні.

До квазістатичних випробувань відносяться: випробування на повзучість, випробування на релаксацію, випробування змішаного типу на релаксацію і повзучість.

При випробуваннях на повзучість задана величина – напруження, величина, яка вимірюється, - деформація. У початковий момент часу прикладене постійне напруження σ_0 , яке знімається у момент часу t_1 . В момент прикладення напруження виникає миттєва пружна деформація ϵ_0 , яка залишається постійною. Потім з течію часу розвивається запізніла пружна деформація та в'язка течія. В кожний момент часу загальна деформація дорівнює сумі трьох деформацій: миттєвої пружної деформації, запізнілої пружної деформації та в'язкої течії. Після зняття напруження миттєва пружна деформація миттєво зникає, пружна деформація запізнювання монотонно зменшується, наближаючись до нуля, а деформація в'язкої течії залишається постійною і дорівнює величині, яку вона досягла в момент часу t_1 .

При випробуваннях на релаксацію задана величина – деформація, величина, яка вимірюється, - напруження. У початковий момент часу при $t=0$ створюється миттєва пружна деформація ϵ_0 , яка залишається постійною до моменту часу t_1 , після якого деформація знімається. Напруження, яке виникло в початковий момент часу, монотонно зменшується, наближаючись до нуля, якщо матеріал має в'язку течію, або до деякої граничної величини, якщо в'язка течія відсутня. В момент часу t_1 , коли деформація знімається, виникає напруження, яке протилежне за знаком початковому напруженню. Протягом часу напруження, яке виникло в момент зняття деформації, монотонно зменшується, наближаючись до нуля.

При випробуваннях змішаного типу на релаксацію і повзучість в початковий момент часу створюється миттєва пружна деформація ϵ_0 , яка залишається постійною до моменту часу t_1 , при цьому напруження, що виникло, зменшується з течію часу. При деформації напруження, що залишилось, знімається, а пружна деформація запізнювання, яка накопичилася до моменту t_1 , монотонно зменшується, наближаючись до нуля. Деформація в'язкої течії залишається постійною і дорівнює величині, яку вона досягла до моменту t_1 .

До динамічних випробувань відносяться: випробування методом вільних коливань, випробування методом вимушених коливань, випробування методом вимушених коливань при резонансі.

При випробуваннях методом вільних коливань в початковий момент задається деяка деформація, а потім надається можливість системі вільно коливатися. Завдяки внутрішньому тертю амплітуда коливань швидко затухає.

При випробуваннях методом вимушених коливань в початковий момент задається деформація або напруження, яке змінюється за синусоїдним законом. Вимірюються напруження або деформація. Якщо залежність між напруженням, деформацією і часом може бути описана лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами, то величина, яка вимірюється, змінюється за синусоїдним законом з частотою, що дорівнює заданій частоті, і амплітудою, пропорційною амплітуді заданої величини, але з різницею фаз. Вважається, що процес коливань усталений, тобто вплив початкових умов зникає. При резонансі змінення напруження або деформації задається синусоїдним законом. Частоту вимушених коливань змінюють та визначають залежність амплітуди коливань величини, яка вимірюється (деформа-

ції або напруження), від частоти вимушених коливань. Найбільша амплітуда відповідає резонансу коливань.

Перевагою механічних моделей є їх наочність.

Механічна модель з малою кількістю елементів не може описати залежність між напруженням, деформацією і часом для реальних харчових продуктів. Але велике збільшення кількості елементів моделі не дає якісного зміння механічної поведінки моделі.

Залежність між деформацією, напруженням і часом визначається лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами:

$$\alpha_0 \sigma + \alpha_1 \frac{d\sigma}{dt} + \dots + \alpha_m \frac{d^m \sigma}{dt^m} = b_0 \varepsilon + b_1 \frac{d\varepsilon}{dt} + \dots + b_n \frac{d^n \varepsilon}{dt^n}, \quad (1.55)$$

де $\alpha_0, \dots, \alpha_m, b_0, \dots, b_n$ - постійні коефіцієнти, які визначають механічні властивості продукту, який досліджується; σ - напруження; ε - деформація функції часу t .

В рівнянні повинно бути задане напруження $\sigma(t)$ або деформація $\varepsilon(t)$. Задану функцію називають вхідною функцією. Вихідна функція – це реакція продукту на вхідну функцію.

Вхідні функції можуть бути двох типів: одинична функція, яка визначається рівнянням:

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.56)$$

і гармонічна функція

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t. \quad (1.57)$$

З загальних властивостей неоднорідних лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами слідує, що вихідні функції мають бути лінійними комбінаціями експоненціальних та гармонічних функцій. Задача полягає в тому, щоб за заданою вхідною функцією та експериментально визначеною вихідною функцією визначити структуру продукту, тобто визначити коефіцієнти рівняння 1.1.

Досліднику треба визначити порядок рівняння, тобто знайти числа m та n . Поведінка реального матеріалу описується рівнянням

(1.55) тільки приблизно. Перед дослідником виникає задача обрати частинний вигляд рівняння, який достатньо добре описує експериментально знайдену залежність напруження –деформація-час, та визначити коефіцієнти рівняння за експериментальними даними. Вважають, що збіг теоретичної та експериментальної залежностей є задовільняючим, якщо різниця не перевищує $\pm 10\%$ від експериментальної величини.

Тип рівняння обирають в наступному порядку, починаючи з простіших видів, що визначають залежності напруження-деформація-час, які якісно описують експериментально знайдену залежність. Якісний збіг знаходять по наявності або відсутності миттєвої пружної деформації, деформації запізнювання, залишкової деформації та релаксації.

Механічні моделі є аналогами диференціальному рівнянню. Метод механічних моделей базується на поведінці деяких простих механічних систем. Різним частинним видам рівняння відповідають різноманітні типи механічних моделей.

Харчові суміші характеризуються складним хімічним складом та володіють одночасно пружністю, в'язкістю, пластичністю у різних співвідношеннях в залежності від об'ємного співвідношення дисперсної фази та дисперсного середовища, характеру та міцності зв'язку між середовищем і дисперсними частками, від характеру та міцності в'язів часток між собою. Уявлення про поведінку продукту під дією навантаження дозволяють отримати механічні моделі, які застосують для близького відтворення реологічної залежності реального продукту. Вивчення моделей дозволяє розробити кількісний метод опису продукту за допомогою параметрів елементів моделі, оскільки моделі вичерпують все різноманіття механічної поведінці продукту.

Загальний аналіз пружно-пластично-в'язких властивостей продукту дозволяє віднести його до тієї або іншої реологічної моделі. Дійсну поведінку продукту описує складна комбінація основних елементів моделей, які враховують миттєву пружну деформацію, пружну деформацію запізнювання, в'язку течію та релаксацію.

Всі механічні моделі складаються з твердого тіла Гука, в'язкого або ньютонівського тіла, тіла Сен-Венана, яке володіє границею текучості, при напруженнях нижче якого воно пружно деформується та пластично тече при постійному напруженні, що дорівнює границі текучості. Всі інші «реологічні тіла» можуть розглядатися як комбінації цих трьох основних тіл.

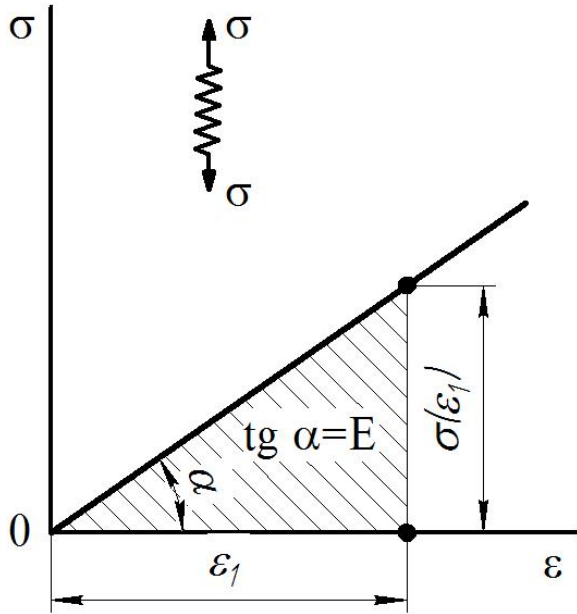


Рисунок 1.3 – Пружний елемент.
Залежність напруження від деформації

Пружний елемент. Залежність напруження від деформації для цього елемента визначається законом Гука:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.58)$$

де E - модуль пружності; ε - деформація.

Гуковський елемент та графік залежності $\sigma = f(\varepsilon)$ наведені на рисунку 1.3. Рівняння (1.58) не містить часу, оскільки вважається, що миттєвої деформації відповідає миттєве напруження.

В'язкий елемент. Залежність напруження від швидкості деформації для ньютонівського елемента визначається законом течії Ньютона:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1.59)$$

де η - коефіцієнт ньютонівської в'язкості.

Ньютонівський елемент та графік залежності закону Ньютона наведені на рисунку 1.4.

Розглянемо частинний випадок течії при постійному напруженні σ_0 . З рівняння (1.59) інтегруючи, отримаємо:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta}, \quad \varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta} t. \quad (1.60).$$

На рисунку 1.5 наведений графік цієї залежності. Рівняння (1.60) показує, що при будь-якому кінцевому значенні σ_0 миттєвої деформації ньютонівський елемент не має.

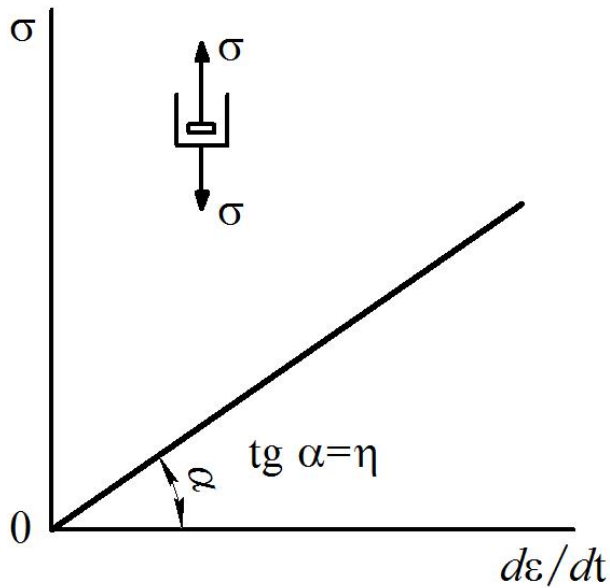


Рисунок 1.4 – В'язкий елемент. Залежність напруження від швидкості деформації

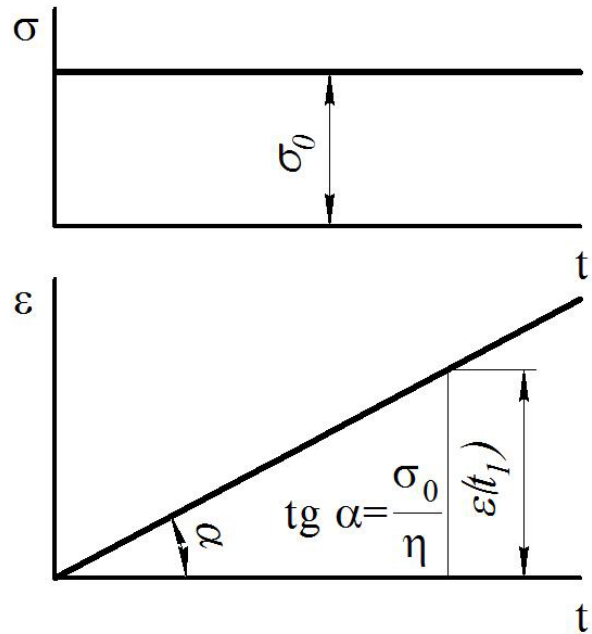


Рисунок 1.5 – В'язкий елемент. Залежність деформації від часу при постійному напруженні

Якщо в момент часу $t = t_1$ напруження знімається, то течія закінчується, оскільки $d\varepsilon/dt = 0$ при $\sigma = 0$, але деформація залишається. Ця деформація називається залишковою деформацією і дорівнює:

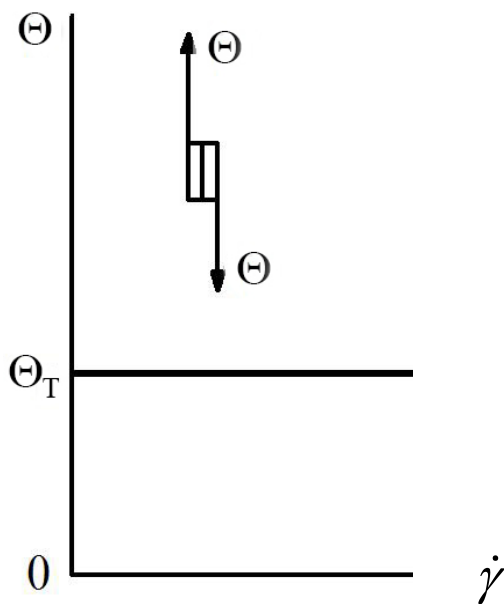


Рисунок 1.6 – Пластичний елемент. Залежність напруження від швидкості зсуву

$$\varepsilon(t_1) = \frac{\sigma_0}{\eta} t_1, \quad (1.61)$$

де t_1 - тривалість прикладення напруження σ_0 .

Ідеально пластичне тіло (тіло Сен – Венана), наведене на рисунку 1.6, може бути наведене у вигляді елемента, який складається з двох притиснутих одна до однієї пластин. При відносному переміщенні пластин між ними виникає постійна сила тертя, яка не залежить від нормальної сили. Тіло Сен – Венана не починає рухатися до тих пір, доки напруження

зсуву не перевищує деякого критичного значення – границі текучості (граничного напруження зсуву), після чого елемент може рухатися з будь – якою швидкістю.

При $\theta < \theta_T$ - немає деформації, $\theta = \theta_T$ - течія; θ_T - границя текучості при зсуві, Па.

Прості тіла визначають три фундаментальні властивості: пружність, пластичність, в'язкість.

Ці елементи з'єднуються паралельно або послідовно. Харчові продукти володіють всіма властивостями, які виражені у різному ступеню. За допомогою цих тіл у різних сполученнях та комбінаціях можна моделювати деформаційні характеристики більшості реальних харчових продуктів.

При послідовному з'єднанні деформації основних елементів додаються, а напруження на кожному елементі дорівнює загальному напруженню на моделі:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n; \quad \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n. \quad (1.62)$$

При паралельному з'єднанні елементів загальне напруження на моделі дорівнює сумі напружень на кожному елементі, а загальна деформація моделі дорівнює деформації кожного елемента. Тобто, умови паралельного з'єднання мають вигляд:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_n; \quad \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_n. \quad (1.63)$$

Створення моделі виконується наступним чином [23].

1. Проводяться експериментальні дослідження структурно-механічних характеристик харчової маси. За кривими кінетики деформації, які отримані при вимірюваннях віскозиметром, визначаються числові значення основних реологічних характеристик харчових мас і залежність швидкості деформації від напруги. Аналіз пружно-пластично-в'язких властивостей продукту, що досліджується, дозволяє віднести його до тієї або іншої реологічної моделі.

2. При проведенні теоретичних розрахунків об'ємної деформації матеріалів під дією навантаження комбінуються у різних сполученнях моделі найпростіших ідеальних тіл, підбирається їх кількість та спосіб з'єднання.

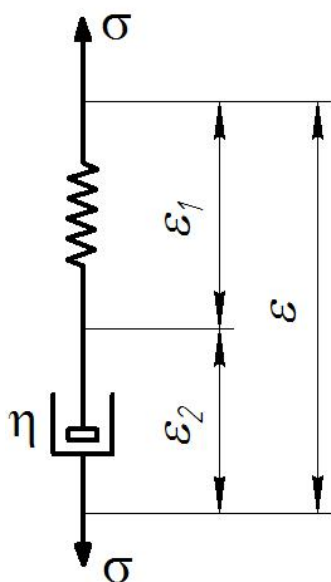
3. Зіставляючи збіжність дослідницьких даних з теоретичними, розрахованими по рівнянням теорій пружності, пластичності та пов-

зучості, можна розробити реологічну модель, яка найбільш точно відобразить поведінку конкретного харчового матеріалу під дією навантаження.

Переважна кількість харчових сумішей належить до пружно-в'язких середовищ. У цьому випадку розрахунки проводять для моделей Кельвіна, Максвелла, узагальненого лінійного середовища та трьохелементних моделей.

Модель Максвелла. Можна вважати, що частки харчових сумішей складаються з пружних та в'язких елементів, які з'єднанні послідовно, як наведено на рисунку 1.7.

Рівняння основних елементів:



$$\frac{\sigma}{E} = \varepsilon_1, \quad (1.64)$$

$$\frac{\sigma}{\eta} = \frac{d\varepsilon_2}{dt}. \quad (1.65)$$

Диференціюється рівняння (1.64) та складається з рівнянням (1.65). Враховуючи умови з'єднання елементів, отримують рівняння середовища Максвелла, яке має релаксацію:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}, \quad (1.66)$$

Рисунок 1.7 – Схема простої моделі Максвелла

або

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\varepsilon}{\eta} \sigma = E \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

При введенні позначення

$$\tau = \eta/E, \quad (1.67)$$

рівняння (1.66) приймає вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau} = E \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1.68)$$

Розглянемо поведінку моделі Максвелла при основних видах

деформації та напруження.

Постійна деформація. У початковий момент часу $t = 0$ моделі, що раніше була вільна від деформації та напруження, надається миттєва деформація ε_0 , яка в подальшому залишається постійною. При цій умові $d\varepsilon/dt = 0$, і рівняння (1.66) приймає вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E}{\eta} \sigma = 0.$$

Розв'язання цього рівняння знаходять у вигляді:

$$\sigma = A e^{-\frac{E}{\eta} t}, \quad (1.69)$$

де A – довільна стала, яка визначається з початкової умови при $t = 0$.

Миттєва деформація ε_0 дорівнює деформації $\varepsilon_1(0)$, оскільки демпфер не може отримати миттєвої деформації. За законом Гука:

$$\sigma(0) = E\varepsilon_0 = E\varepsilon_1(0) = \sigma_0. \quad (1.70)$$

При $t = 0$

$$A = \sigma_0 = E\varepsilon_0,$$

тобто

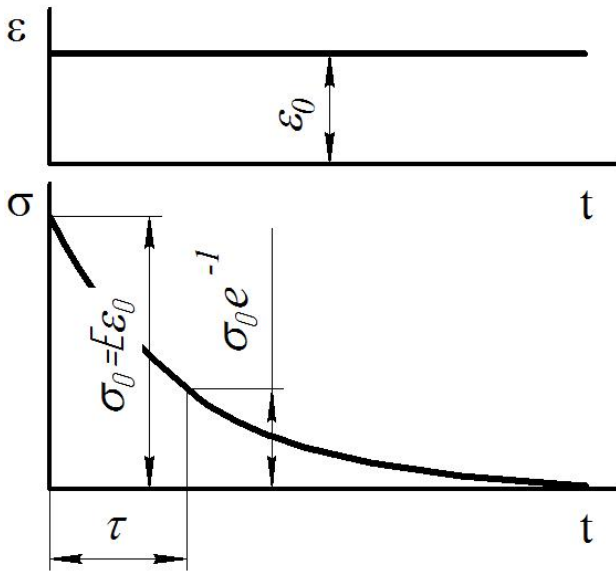
$$\sigma = E\varepsilon_0 e^{-\frac{E}{\eta} t} = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta} t}, \quad (1.71)$$

Таким чином, при постійній деформації напруження монотонно зменшується від початкової величини σ_0 , наближаючись до нуля при $t \rightarrow \infty$ (рисунок 1.8).

Рівняння (1.71) можна записати у вигляді:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.72)$$

Тоді при $t = \tau$ отримано:



$$\sigma(\tau) = \sigma_0 e^{-1}.$$

Час τ , при якому початкове напруження σ_0 зменшується в e разів, називається часом релаксації, або періодом релаксації. Нехай в деякий момент часу t_1 деформація миттєво знімається. Деформація визначається умовою:

Рисунок 1.8 - Проста модель Максвелла. Залежність напруження від часу при постійній деформації.
Крива релаксації

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \varepsilon_0, & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0, & t > t_1 \end{cases}.$$

В початковий момент при $t = 0$ пружина деформується на величину ε_0 , а деформація демпфера дорівнює нулю. Потім починається деформація демпфера, яка наближається до ε_0 . Оскільки деформація пружини пропорційна прикладеному напруженню і зменшується з течією часу, а сума деформацій пружини та демпфера дорівнює ε_0 , то для кожної деформації існує відповідне рівняння:

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_0 e^{-\frac{E}{\eta}t}; \quad \varepsilon_{в'язк} = \varepsilon_0 \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right).$$

Миттєве змінення деформації можливе тільки для пружини, оскільки демпфер миттєво не деформується. Таким чином, миттєве зняття деформації в момент часу t_1 можливе тільки внаслідок деформації пружини на величину $-\varepsilon_0$. Але пружина в цей момент має де-

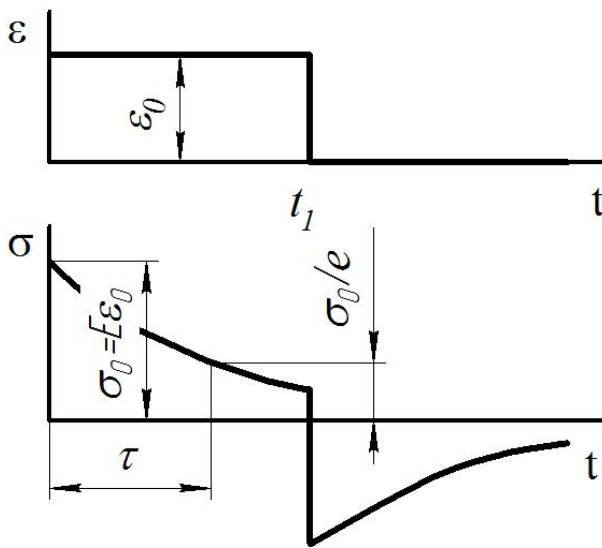
формацію $\varepsilon_0 e^{-\frac{E}{\eta}t_1}$, яка миттєво знімається, оскільки зняте напруження, яке її викликало. Залишається також зняти деформацію

$-\varepsilon_0 \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t_1} \right)$, для цього треба прикласти напруження:

$$\sigma(t_1) = -E\varepsilon_0 \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t_1} \right) = -\sigma_0 \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t_1} \right).$$

Це напруження, протилежне за знаком с початку прикладеному напруженню, в свою чергу зменшується, як наведено на рисунку 1.9, тобто:

$$\sigma(t) = \sigma(t_1) e^{-\frac{E}{\eta} t} = \sigma_0 \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t_1} \right) e^{-\frac{E}{\eta} t}, \quad t > t_1. \quad (1.73)$$



Постійна швидкість деформації. Вважаємо, що в початковий момент часу при $t = 0$ створюється миттєва деформація ε_0 , потім деформація іде з постійною швидкістю V_0 . Тобто:

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_0; \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = V_0.$$

Рисунок 1.9 - Проста модель Максвелла. Залежність напруження від часу. Постійна деформація прикладена в інтервалі часу $0 \leq t < t_1$ та знята при $t > t_1$.

Рівняння (1.66) приймає вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = EV_0.$$

Розв'язання цього рівняння:

$$\sigma = Ae^{-\frac{E}{\eta} t} + \eta V_0. \quad (1.74)$$

де A – довільна стала.

Були введені позначення $E\varepsilon_0 = \sigma(0) = \sigma_0$. З рівняння (1.74) при $t = 0$ отримаємо:

$$\sigma_0 = A + \eta V_0.$$

Виразивши значення A і підставивши в рівняння (1.74), отримаємо:

$$\sigma = (\sigma_0 - \eta V_0)e^{-\frac{E}{\eta}t} + \eta V_0 = (E\varepsilon_0 - \eta V_0)e^{-\frac{E}{\eta}t} + \eta V_0. \quad (1.75)$$

Характер змінення напруження σ за часом залежить (при заданих E і η) від величини швидкості деформації V_0 . Якщо швидкість деформації задовольняє умові $V_0 < \sigma_0/\eta$, напруження $\sigma(t)$ зменшується, і при $t \rightarrow \infty$ $\sigma(t) \rightarrow \eta V_0$. Якщо швидкість деформації задовольняє умові $V_0 > \sigma_0/\eta$, напруження $\sigma(t)$ зростає, прямуючи до границі ηV_0 . Якщо швидкість деформації $V_0 = \sigma_0/\eta$, напруження залишається постійним $\sigma(t) = \sigma_0$.

На рисунку 1.10 наведена релаксація для всіх трьох випадків.

Постійне напруження. Нехай в початковий момент часу при $t = 0$ прикладене напруження σ_0 , яке далі залишається постійним. Рівняння (1.66) приймає вигляд:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta}, \quad t \geq 0.$$

Інтегруючи це рівняння, отримали: $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta}t + A$.

При $t = 0$, з урахуванням (1.70), отримали

$$A = \varepsilon(0) = \varepsilon_0 = \sigma_0/E.$$

Тобто:

$$\varepsilon = \sigma_0 \left(\frac{t}{\eta} + \frac{1}{E} \right) = \frac{\sigma_0}{\eta} t + \varepsilon_0. \quad (1.76)$$

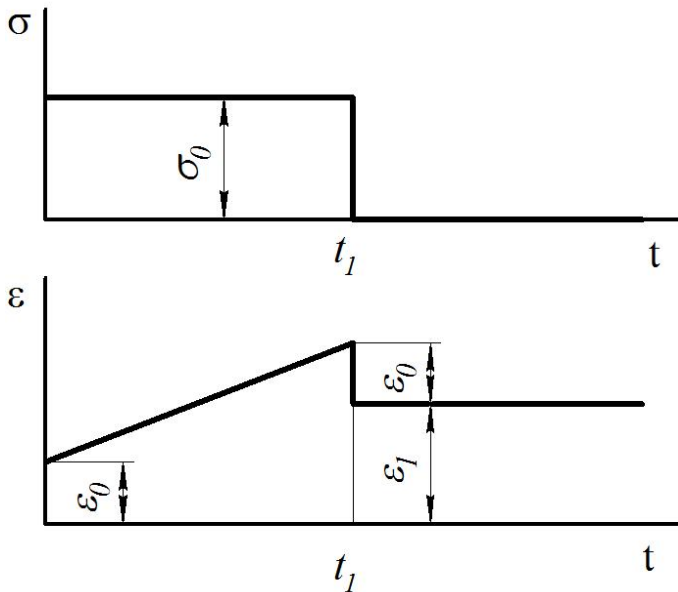


Рисунок 1.10 - Проста модель Максвелла.

Залежність деформації від часу. Постійне напруження прикладене в інтервалі часу $0 \leq t < t_1$ та зняте при $t > t_1$. $\varepsilon_0 = E\sigma_0$; $\varepsilon_1 = \sigma_0 t_1 / \eta$

В деякий момент часу $t = t_1$ напруження знімається. При цьому пружина стискається на величину миттєвої деформації ε_0 . Деформація відповідно рівнянню (1.76) дорівнює:

$$\varepsilon(t_1) = \frac{\sigma_0}{\eta} t_1 + \varepsilon_0.$$

Залишкова деформація після зняття напруження:

$$\varepsilon_{\text{зал}} = \frac{\sigma_0}{\eta} t_1.$$

Таким чином, модель Максвелла має миттєву деформацію та в'язку течію, і не має пружної деформації запізнювання.

Модель Кельвіна. Розглянемо модель Кельвіна, вважаючи, що кожна частка тіла складається з пружного та в'язкого елементів, які з'єднані паралельно (рисунок 1.11). Тоді напруження буде складатися з напруження, яке визначається пружною деформацією, та напруження, яке викликає в'язкий опір.

Рівняння основних елементів

$$\sigma_1 = E\varepsilon, \quad \sigma_2 = \eta d\varepsilon/dt,$$

де σ_1 - напруження в пружині; σ_2 - напруження в демпфері.

Склавши ці рівняння і враховуючи умови паралельного з'єднання, отримали рівняння моделі Кельвіна:

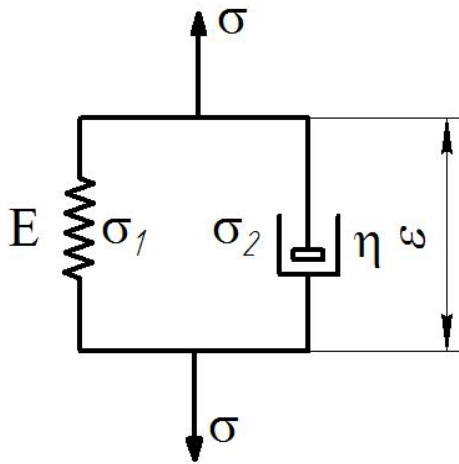


Рисунок 1.11 – Схема простої моделі Кельвіна

$$\eta \frac{d\varepsilon}{dt} + E\varepsilon = \sigma, \quad (1.77)$$

або

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{\eta} \varepsilon = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (1.78)$$

Рівняння моделі Кельвіна можна також навести у вигляді:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\varepsilon}{\tau} = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (1.79)$$

Постійне напруження. Маємо умову:

$$\sigma = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \sigma_0, & t \geq 0. \end{cases}$$

Рівняння (1.78) приймає вигляд:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{\eta} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta}, \quad t \geq 0.$$

Розв'язання цього рівняння знаходять у вигляді:

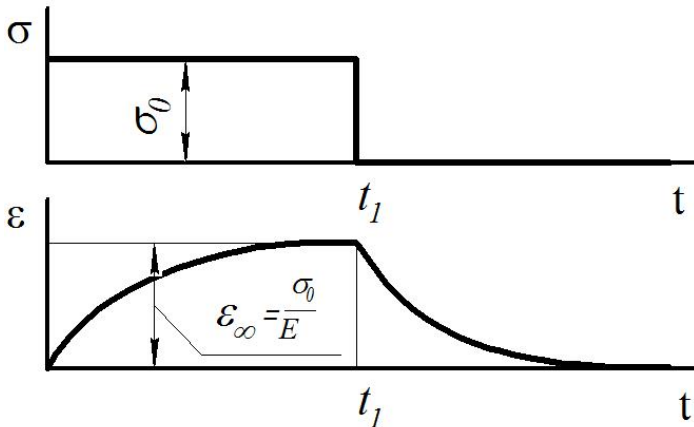
$$\varepsilon = A e^{-\frac{E}{\eta} t} + \frac{\sigma_0}{E}, \quad t \geq 0. \quad (1.80)$$

Довільну постійну A визначають з початкових умов при $t = 0$. Напруження σ_0 , яке прикладене в початковий момент, не може викликати миттєвої деформації моделі Кельвіна, оскільки демпфер, з'єднаний паралельно з пружиною, не дає їй миттєво деформуватися. Тому початкова умова:

$$\varepsilon(0) = 0. \quad (1.81)$$

Тоді

$$A = -\frac{\sigma_0}{E}.$$



З рівняння (1.80)

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right). \quad (1.82)$$

Деформація зростає з часом, асимптотичне прямує до гуковської деформації, як наведено на рисунку 1.12.

Рисунок 1.12 – Проста модель Кельвіна. Залежність деформації від часу.

Постійне напруження σ_0 прикладене в інтервалі часу $0 \leq t < t_1$ та зняте при $t > t_1$

$$\varepsilon_\infty = \varepsilon(\infty) = \frac{\sigma_0}{E}.$$

Якщо в деякий момент часу $t = t_1$, напруження знімається, тобто $\sigma_0 = 0$ при $t > t_1$, рівняння (1.78) приймає вигляд:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{\eta} \varepsilon = 0, \quad t > t_1.$$

Розв'язання цього рівняння:

$$\varepsilon = A_1 e^{-\frac{E}{\eta}t}, \quad t > t_1.$$

Миттєве скорочення деформації, як і миттєве виникнення деформації відсутнє, тому при знятті напруження при $t = t_1$ деформація повинна бути безпервною. Отримали умову:

$$\varepsilon(t_1) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t_1} \right) = A_1 e^{-\frac{E}{\eta}t_1},$$

звідкіля

$$A_1 = \frac{\sigma_0}{E} \left(e^{-\frac{E}{\eta} t_1} - 1 \right).$$

Отримаємо:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(e^{-\frac{E}{\eta} t_1} - 1 \right) e^{-\frac{E}{\eta} t}, \quad t > t_1. \quad (1.83)$$

З рівняння (1.82) слідує, що деформація $\varepsilon(t_1)$, яка залишилася після зняття напруження, зникає при $t = \infty$, тобто в будь-який скінченний час існує деяка залишкова деформація, що постійно зменшується. Тому деформація моделі Кельвіна є уповільненою пружною деформацією.

Постійна швидкість деформації. Постійна деформація для моделі Кельвіна не можлива, оскільки ця модель не допускає миттєвої деформації. Розглянемо тільки постійну швидкість деформації.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ V_0, & t \geq 0. \end{cases}$$

Інтегруючи, отримали:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ V_0 t, & t \geq 0. \end{cases}$$

Підставивши ε та $d\varepsilon/dt$ в рівняння (1.77), отримали:

$$\sigma = \eta V_0 + E V_0 t. \quad (1.84)$$

Графік цієї залежності наведений на рисунку 1.13. Вважаємо, що в деякий момент часу $t = t_1$ деформування припиняється, тобто швидкість дорівнює нулю, а деформація, яка досягнута до моменту t_1 , залишається постійною.

При швидкості, яка дорівнює нулю, напруження на демпері дорівнює нулю, а напруження на пружині залишається постійним,

оскільки деформація пружини, що дорівнює $V_0 t_1$, залишається постійною.

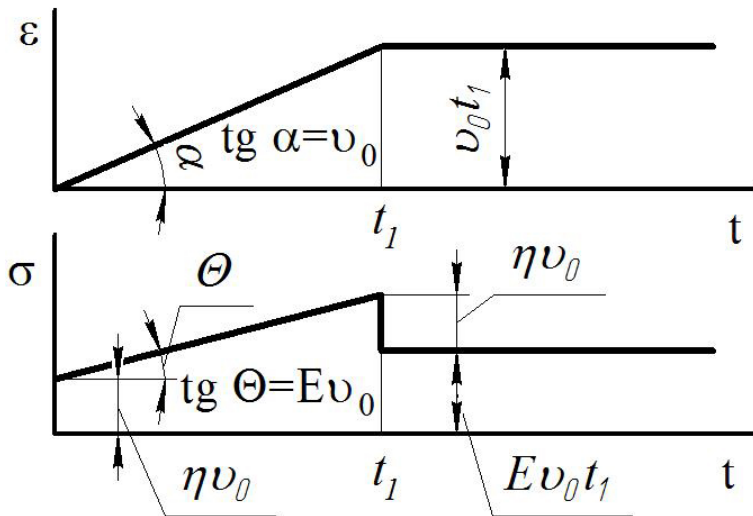


Рисунок 1.13 – Проста модель Кельвіна. Залежність напруження від часу. Постійна швидкість деформації ε_0 в інтервалі часу $0 \leq t < t_1$, при $t > t_1$ деформація залишається постійною

Тобто:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ V_0, & 0 \leq t < t_1 \\ 0, & t \geq t_1 \end{cases}$$

$$\sigma = E V_0 t_1, \quad t \geq t_1. \quad (1.85)$$

Для того, щоб краще наблизитися до механічних властивостей реального продукту, пропонується розглянути більш складні моделі. Утворюються ці моделі сполученням пружних та в'язких елементів з різними коефіцієнтами пружності і в'язкості.

Розглянемо трьохелементні моделі з двома пружинами і одним демпфером, які наведені на рисунку 1.14.

Рівняння трьохелементної моделі можна отримати, використовуючи рівняння моделей Максвелла та Кельвіна.

Права частина моделі, яку ми розглядаємо (тип б), є модель Максвелла, тому рівняння для елементів та умову з'єднання можна записати наступним чином:

$$\sigma_0 = E_0 \varepsilon. \quad (1.86)$$

$$\frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1} \sigma_1 + E_1 \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1.87)$$

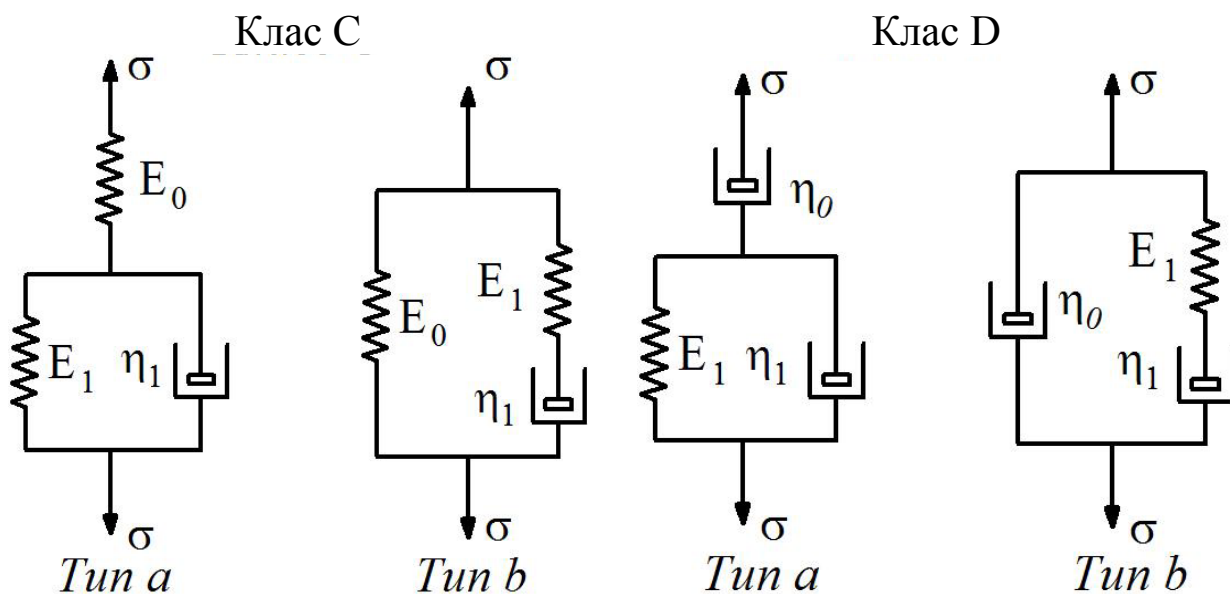


Рисунок 1.14 – Схеми різних типів трьохелементних моделей

$$\sigma_0 + \sigma_1 = \sigma. \quad (1.88)$$

Після перетворень, отримаємо рівняння моделі.

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1} \sigma = (E_0 + E_1) \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_0 E_1}{\eta_1} \varepsilon. \quad (1.89)$$

З'єднавши послідовно пружину з моделлю Кельвіна, отримують модель, що зображена на рисунку 1.14 (тип а), для якої рівняння має вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_0 + E_1}{\eta_1} \sigma = E_0 \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_0 E_1}{\eta_1} \varepsilon. \quad (1.90)$$

Рівняння (1.89) та (1.90) відрізняються тільки коефіцієнтами, тобто вони подібні. Ці моделі, зображені на рисунку 1.14, називаються еквівалентними, якщо коефіцієнти рівнянь (1.89) та (1.90) дорівнюють. Умова еквівалентності має вигляд:

$$\frac{E_1}{\eta_1} = \frac{E'_0 + E'_1}{\eta'_1} \varepsilon; \quad E_0 + E_1 = E'_0; \quad \frac{E_0 E_1}{\eta_1} = \frac{E'_0 E'_1}{\eta'_1}. \quad (1.91)$$

Штрихами позначені постійні моделі, зображеної на рисунку

1.14 (тип а). Завдяки пружині E_0 модель має миттєву деформацію, модель Кельвіна дає деформацію запізнювання. Ця модель не має залишкової деформації.

Наявність релаксації у моделей класу С (рисунок 1.14) зручно розглядати на моделі типу б. Нехай моделі задана миттєва деформація, яка залишається постійною. В початковий момент обидві пружини деформуються на однакову величину. Потім починається рух поршня, який продовжується доки пружина E_1 не визволиться від деформації. Це буде рівноважний стан, відповідний даної деформації. Тобто в початковий момент напруження на моделі дорівнює сумі напружень на пружинах E_0 та E_1 , а потім зменшується до величини напруження на пружині E_0 . Тобто відбувається явище релаксації. У відмінності від простої моделі Максвелла релаксація напруження відбувається не до нуля, а до деякої постійної величини.

Таким чином, модель класу С має властивості простої моделі Максвелла та простої моделі Кельвіна.

Постійна деформація. Розглянемо трьохелементну модель класу С, зображену на рисунку 1.14 (тип б).

Маємо умову:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \varepsilon_0, & t \geq t_1 \end{cases}.$$

Рівняння (1.89) приймає вигляд: $\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1} \sigma = \frac{E_0 E_1}{\eta_1} \varepsilon_0, \quad t \geq 0.$

Розв'язання цього рівняння:

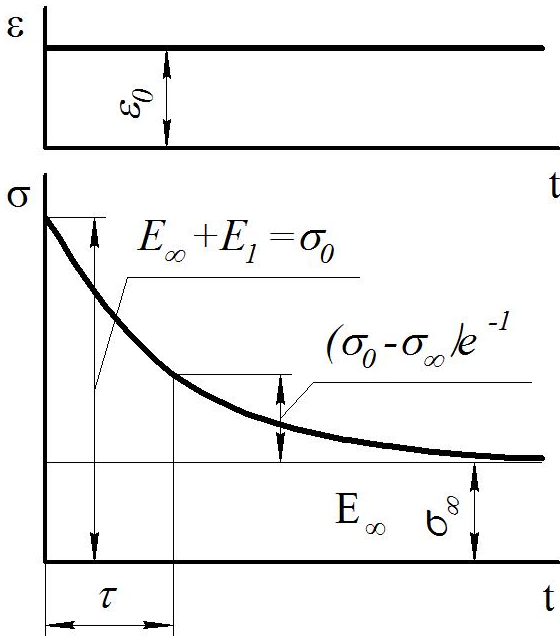
$$\sigma = E_0 \varepsilon_0 + C e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}.$$

Довільну постійну C знайдемо за початковою умовою в момент часу $t = 0$. При миттєвої деформації ε_0 обидві пружини деформуються на величину ε_0 , і напруження дорівнює сумі напружень на кожній пружині, тобто

$$\sigma(0) = E_0 \varepsilon_0 + E_1 \varepsilon_0. \quad (1.92)$$

Звідкіля $C = E_1 \varepsilon_0$. Отримаємо:

$$\sigma = \varepsilon_0 \left(E_0 + E_1 e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right). \quad (1.93)$$



Граничне напруження

$$\sigma(\infty) = E_0 \varepsilon_0. \quad (1.94)$$

Якщо розглядати тільки складову напруження, яка залежить від часу, то

$$\sigma - \sigma(\infty) = E_1 \varepsilon_0 e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}. \quad (1.95)$$

Час релаксації у цьому випадку також, як і для моделі Максвелла, залежить від співвідношення E_1/η_1 :

$$\tau = \frac{\eta_1}{E_1}. \quad (1.96)$$

Рисунок 1.15 – Трьохелементна модель класу С.

Залежність напруження від часу при постійній деформації.

Крива релаксації

Залежність напруження від часу наведена на рисунку 1.15.

Нехай деформація ε_0 в момент часу t_1 миттєво знімається.

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \varepsilon_0, & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0, & t > t_1 \end{cases}. \quad (1.97)$$

У даному випадку розглядаємо трьохелементну модель класу С типу а, яка зображена на рисунку 1.14. Позначимо деформацію пружини ε_{np} , а деформацію елемента Кельвіна $\varepsilon_{зан}$.

$$\varepsilon_{np} = \frac{\varepsilon_0}{E_0 + E_1} \left(E_1 + E_0 e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right). \quad (1.98)$$

$$\varepsilon_{зан} = \frac{\varepsilon_0}{E_0 + E_1} \left(E_0 - E_0 e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right). \quad (1.99)$$

Миттєво зняти деформацію можна тільки за рахунок деформації ізольованої пружини. Деформація запізнювання в момент часу t_1 дорівнює:

$$\varepsilon_{зан}(t_1) = \frac{\varepsilon_0}{E_0 + E_1} \left(E_0 - E_0 e^{-\frac{E_1 t_1}{\eta_1}} \right).$$

На цю величину необхідно деформувати ізольовану пружину, яка визначає величину напруження, протилежного за знаком початковому прикладеному напруженню, що дорівнює:

$$\sigma(t) = -\frac{E_0^2 \varepsilon_0}{E_0 + E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t_1}{\eta_1}} \right) e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}, \quad t > t_1. \quad (1.100)$$

Ці формули можуть бути використанні і тоді, коли в момент часу t_1 знімається не деформація, а напруження. Тоді:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0, \quad 0 \leq t \leq t_1; \quad \sigma(t) = 0, \quad t > t_1.$$

Деформація запізнювання відновлюється відповідно рівнянню:

$$\varepsilon_{зан}(t) = -\frac{E_0 \varepsilon_0}{E_0 + E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t_1}{\eta_1}} \right) e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}, \quad t > t_1, \quad (1.101)$$

а пружна деформація $\varepsilon_{пр}$ миттєво зникає. На рисунках 1.16 та 1.17 наведені графіки функцій напруження та деформації для обох випадків.

Постійна швидкість деформації. Нехай у початковий момент часу створена миттєва деформація ε_0 , потім деформація іде з постійною швидкістю V_0 .

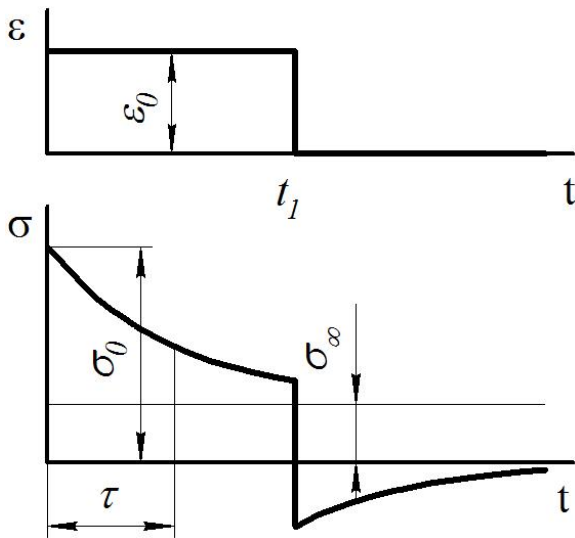


Рисунок 1.16 – Трьох елементна модель класу С. Залежність напруження від часу. Постійна деформація ε_0 прикладена в інтервалі часу $0 \leq t < t_1$ та знята при $t > t_1$.

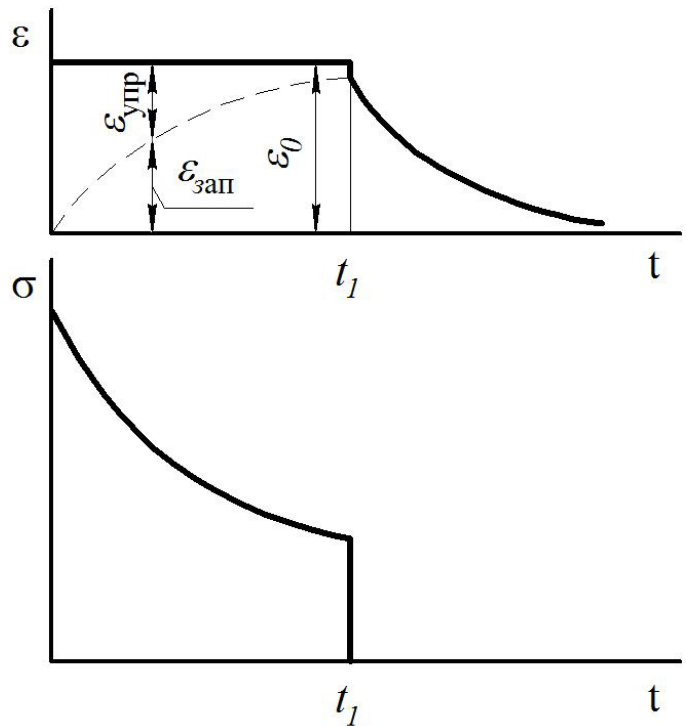


Рисунок 1.17- Трьох елементна модель класу С. Залежність напруження та деформації від часу. Постійна деформація ε_0 прикладена в інтервалі часу $0 \leq t < t_1$, а при $t > t_1$ зняте напруження.

Тобто, задані умови $\varepsilon(0) = \varepsilon_0$; $\frac{d\varepsilon}{dt} = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ V_0, & t \geq 0 \end{cases}$.

Інтегруючи, отримаємо: $\varepsilon = \varepsilon_0 + V_0 t$.

Рівняння (1.89) приймає вигляд:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1} \sigma = (E_0 + E_1)V_0 + \frac{E_0 E_1}{\eta_1} (\varepsilon_0 + V_0 t).$$

Розв'язання цього рівняння має вигляд:

$$A + \frac{E_1}{\eta_1} A t + \frac{E_1}{\eta_1} B = (E_0 + E_1)V_0 + \frac{E_0 E_1}{\eta_1} \varepsilon_0 + \frac{E_0 E_1}{\eta_1} V_0 t.$$

Коефіцієнти в двох частинах рівняння повинні дорівнювати, тому $A = E_0 V_0$, таким чином $B = \eta_1 V_0 + E_0 \varepsilon_0$.

Тоді:

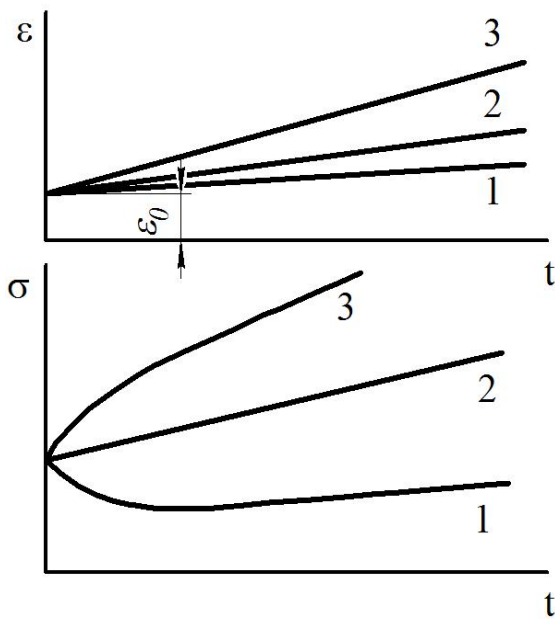
$$\sigma = \varepsilon_0 V_0 t + \eta_1 V_0 + E_0 \varepsilon_0 + C e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}.$$

Напруження повинно задовольняти початкової умові (1.92)

$$\eta_1 V_0 + E_0 \varepsilon_0 + C = \varepsilon_0 E_0 + E_1 \varepsilon_0.$$

Отримали:

$$\sigma = \varepsilon_0 V_0 t + \eta_1 V_0 + E_0 \varepsilon_0 + (E_1 \varepsilon_0 - \eta_1 V_0) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}. \quad (1.102)$$



Для достатньо великих значень t останній член правої частини рівняння (1.102) стає достатньо малим, їм можна знехтувати, і напруження визначається рівнянням

$$\sigma = \varepsilon_0 V_0 t + \eta_1 V_0 + E_0 \varepsilon_0. \quad (1.103)$$

Можливі три випадки, які наведені на рисунку 1.18.

$$\begin{aligned} \eta_1 V_0 &= E_1 \varepsilon_0; & \eta_1 V_0 &> E_1 \varepsilon_0; \\ & & \eta_1 V_0 &< E_1 \varepsilon_0; \end{aligned}$$

Рисунок 1.18 - Трьохелементна модель класу С. Залежність напруження від часу при постійній швидкості деформації: 1 - $V_0 > C$;

$$2 - V_0 = C = \frac{E_1 \varepsilon_0}{\eta_1}; \quad 3 - V_0 < C$$

Якщо відсутня початкова деформація $\varepsilon_0 = 0$, рівняння (1.102) приймає вигляд:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 V_0 t + \eta_1 V_0 \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right). \quad (1.104)$$

Перший член в правій частині цього рівняння – це напруження в пружині, модуль пружності якої E_0 , а другий член – це напруження в моделі Максвелла.

Якщо в момент часу t_1 деформація зупиняється, то починається релаксація напруження при постійній деформації $\varepsilon_1 = V_0 t_1$. Релаксація відбувається тільки моделі Максвелла, а напруження в ізольованій пружині залишається постійним. Релаксація визначається рівнянням:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 V_0 t_1 + \eta_1 V_0 \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_1} \right) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} (t-t_1)}, \quad t \geq t_1. \quad (1.105)$$

З рівняння слідує, що час релаксації не залежить від швидкості деформації, а тільки від параметрів моделі Максвелла. На рисунку 1.19 наведені графіки залежності напруження від часу для двох швидкостей: деформації та релаксації.

Постійне напруження. Нехай напруження визначається умовою

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \sigma_0, & t \geq 0 \end{cases}$$

Оскільки задане напруження, розглядаємо трьохелементну модель класу С (тип а), яка наведена на рисунку 1.14.

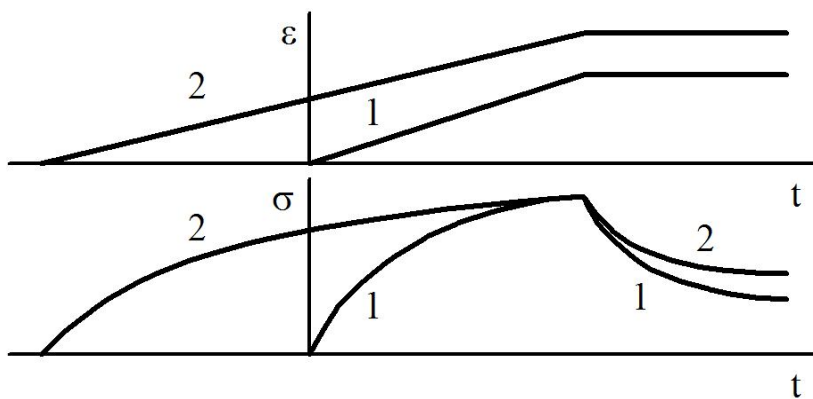


Рисунок 1.19 – Трьох-елементна модель класу С.

Залежність напруження від часу для двох швидкостей деформації та наступна релаксація:

$$1 - \frac{d\varepsilon}{dt} = V_1; \quad 2 - \frac{d\varepsilon}{dt} = V_2$$

Рівняння (1.90) приймає вигляд:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1} \varepsilon = \frac{E_0 + E_1}{E_0 \eta_1} \sigma_0, \quad t > 0.$$

Розв'язання цього рівняння:

$$\varepsilon(t) = Ce^{-\frac{E_1}{\eta_1}t} + \frac{E_0 + E_1}{E_0 E_1} \sigma_0.$$

Миттєва деформація може бути створена тільки ізольованою пружиною E_0 . Тому початкова умова визначає, що початкова деформація і деформація пружини дорівнюють, тобто: $\varepsilon(0) = \sigma_0 / E_0$.

Звідкіля визначали довільну постійну $C + \frac{E_0 + E_1}{E_0 E_1} \sigma_0 = \frac{\sigma_0}{E_0}$.

Тобто, деформація дорівнює

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1}t} \right), \quad t \geq 0. \quad (1.106)$$

Перший член правої частини рівняння – це миттєва деформація ізольованої пружини, а другий член визначає уповільнену деформацію моделі Кельвіна. При $t \rightarrow \infty$, отримали:

$$\varepsilon(\infty) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1}.$$

Таким чином, рівноважна деформація дорівнює сумі деформацій послідовно з'єднаних пружин з модулями E_0 та E_1 . Розглянемо відновлення деформації після зняття напруження. Напруження у даному випадку визначається умовою

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \sigma_0, & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0, & t > t_1 \end{cases}.$$

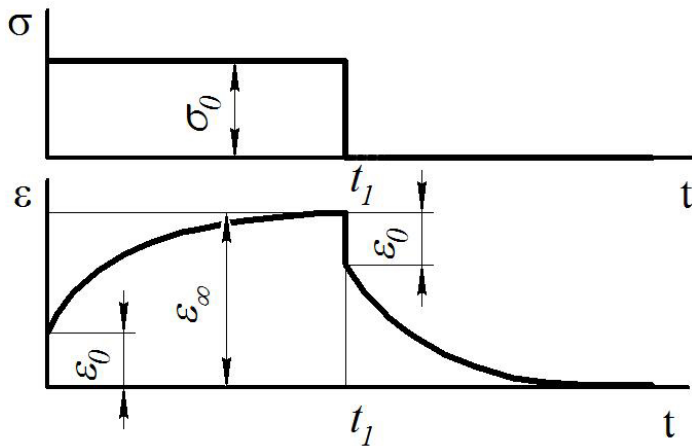
При $t < t_1$ деформація описується рівнянням (1.106). Після зняття напруження в момент часу $t = t_1$ миттєва деформація σ_0 / E_0 зникає, тому отримали умову:

$$\varepsilon(t_1 + 0) = \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_1} \right). \quad (1.107)$$

Рівняння (1.90) приймає вигляд: $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1} \varepsilon = 0$.

Розв'язання цього рівняння:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_1} \right) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}.$$



Графік залежності деформації від часу наведений на рисунку 1.20.

Рисунок 1.20 - Трьохелементна модель класу С. Залежність деформації від часу при постійному напруженні

Розглянемо моделі, що складаються з однієї пружини та двох демпферів, які зображені на рисунку 1.14.

Рівняння трьохелементної моделі класу D (тип а) (рисунку 1.14):

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_0 + \eta_1} \sigma = \frac{\eta_0 \eta_1}{\eta_0 + \eta_1} \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{\eta_0 E_1}{\eta_0 + \eta_1} \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1.108)$$

Рівняння моделі, наведеної на рисунку 1.14 тип б:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1} \sigma = \eta_0 \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + E_1 \left(1 + \frac{\eta_0}{\eta_1} \right) \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1.109)$$

Тобто моделі подібні. Умова еквівалентності:

$$\frac{E_1}{\eta_0 + \eta_1} = \frac{E'_1}{\eta'_1}; \quad \frac{\eta_0 \eta_1}{\eta_0 + \eta_1} = \eta'_0; \quad E_1 \frac{\eta_0}{\eta_0 + \eta_1} = E'_1 \left(1 + \frac{\eta'_0}{\eta'_1} \right). \quad (1.110)$$

Штрихами позначені постійні моделі типу б.

Властивості трьохелементних моделей класу D (тип а), зображених на рисунку 1.14, розглядаємо при заданому напруженні. Завдяки демпферу η_0 виникає залишкова деформація. Миттєва деформація відсутня, а для моделі Кельвіна має місце деформація запізнювання. Для отримання релаксації модель миттєво деформується і витримується при постійній деформації. Ці моделі не дозволяють миттєвої деформації, тому вважаємо, що модель деформується з постійною швидкістю до заданої величини, потім витримується деформацію постійною. При цьому загальна деформація пружини зменшується за рахунок демпферів η_0 та η_1 , тобто відбувається релаксація напруження.

Постійне напруження. Нехай напруження визначається умовою

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \sigma_0, & t \geq 0 \end{cases}$$

Оскільки задане напруження, розглядається трьохелементна модель класу D модель (тип а). Загальна деформація моделі дорівнює сумі деформацій демпфера та простої моделі Кельвіна.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta_0} t + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right). \quad (1.111)$$

Деформація має прямолінійну асимптоту

$$\varepsilon_a(t) = \frac{\sigma_0}{\eta_0} t + \frac{\sigma_0}{E_1}. \quad (1.112)$$

Графік залежності деформації від часу наведений на рисунку 1.21. Якщо в деякий момент часу t_1 напруження знімається, тобто $\sigma = 0$ при $t \geq t_1$, тоді деформація демпфера, яку він досяг в момент часу t_1 залишається постійною, а деформація моделі Кельвіна зменшується за експоненціальним законом.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta_0} t_1 + C e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}, \quad t \geq t_1. \quad (1.113)$$

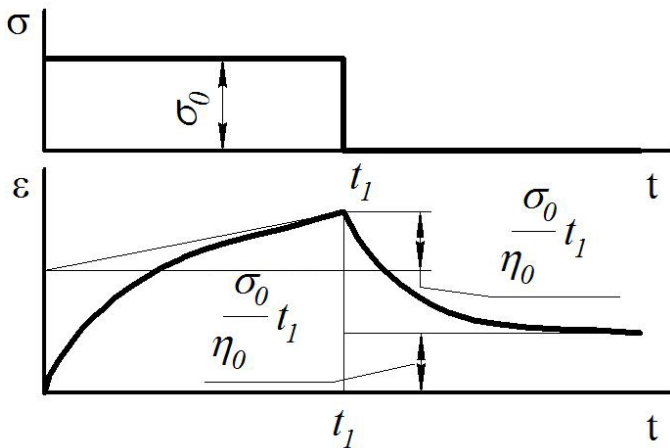


Рисунок 1.21 – Трьохелемента модель класу D. Залежність деформації від часу при постійному напруженні

Ця модель не має миттєвої деформації, тому в момент часу t_1 деформація повинна бути безперервною, а напруження має стрибок. Порівнюючи значення деформації, які визначаються за рівняннями (1.111) та (1.113) в момент часу t_1 , отримали:

$$\frac{\sigma_0}{\eta_0} t_1 + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_1} \right) = \frac{\sigma_0}{\eta_0} t_1 + C e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_1},$$

звідкіля $C = \frac{\sigma_0}{\eta_0} t_1 + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_1} - 1 \right) e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t_1}$.

Постійна швидкість деформації. Нехай $\frac{d\varepsilon}{dt} = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ V_0, & t \geq 0 \end{cases}$.

Для трьохелементної моделі класу D (тип б) загальне напруження дорівнює сумі напружень, які прикладені до демпферу і моделі Максвелла, тобто:

$$\sigma(t) = \eta_1 V_0 + \eta_1 V_0 \left(1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t} \right). \quad (1.114)$$

Якщо в деякий момент часу t_1 деформація миттєво зупиняється, тобто $d\varepsilon/dt = 0$ при $t \geq t_1$, тоді напруження на демпфері миттєво стає

дорівнювати нулю, а на простій моделі Максвелла напруження зменшується за експоненціальним законом:

$$\sigma(t) = \eta_1 V_0 \left(e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} - 1 \right) e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}, \quad t \geq t_1. \quad (1.115)$$

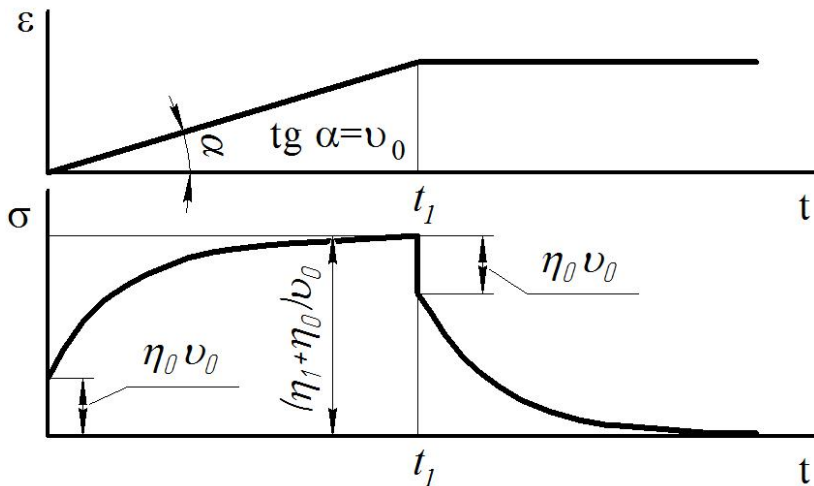


Рисунок 1.22 – Трьохелементна модель класу D. Залежність напруження від часу. Постійна швидкість деформації в інтервалі часу $0 \leq t < t_1$, при $t > t_1$ деформація залишається постійною

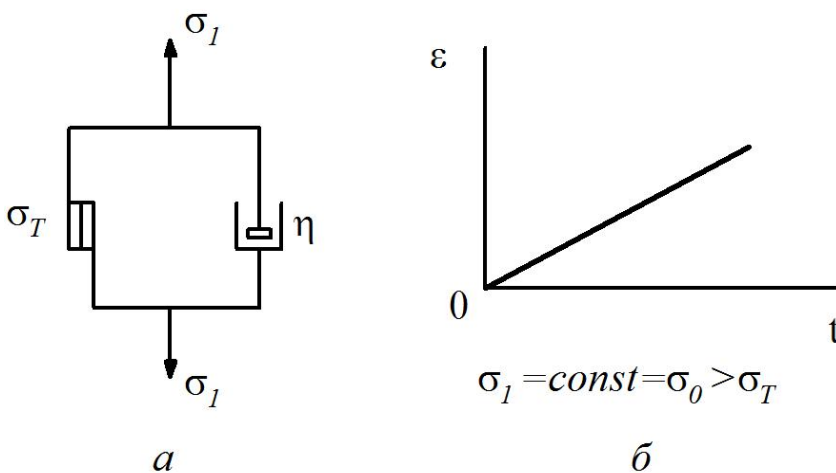


Рисунок 1.23 - Модель в'язко - пластичного тіла

При $\sigma_T = const = \sigma_0 > \sigma_T$ швидкість деформації пропорційна надмірної напрузі $\sigma_0 - \sigma_T$ (рисунок 1.23. б). При одноосному напру-

Графік залежності напруження від часу наведений на рисунку 1.22.

Якщо при обробці продукту виникають досить великі напруження, тоді речовина виявляє помітну текучість.

У в'язко - пластичному середовищі, яке наведене на рисунку 1.23.а, паралельно з'єднанні в'язкий та пластичний елементи.

При напруженні, яке менш ніж границя текучості σ_T , тіло не деформується.

У таких випадках доцільно вибрати моделі, починаючи з розрахунків в'язко-пластичного середовища.

женому стані закон деформації в'язко - пластичного середовища має вигляд:

$$\sigma_1 = \sigma_T \eta \frac{d\varepsilon_1}{dt}, \quad \sigma_1 \geq \sigma_T. \quad (1.116)$$

Рівняння при складному напруженому стані можна отримати, якщо скласти напруження, які відповідають жорстко – пластичному середовищу Мізеса, з напруженнями, що відповідають течії лінійно в'язкої рідини:

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma &= 2 \left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{3}\mu_i} + \frac{1}{3}\eta \right) \xi_x; & \sigma_y - \sigma &= 2 \left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{3}\mu_i} + \frac{1}{3}\eta \right) \xi_y; \\ \sigma_z - \sigma &= 2 \left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{3}\mu_i} + \frac{1}{3}\eta \right) \xi_z; & \tau_{xy} &= \left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{3}\mu_i} + \frac{\eta}{3} \right) \mu_{xy}; \\ \tau_{yz} &= \left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{3}\mu_i} + \frac{\eta}{3} \right) \mu_{yz}; & \tau_{xz} &= \left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{3}\mu_i} + \frac{\eta}{3} \right) \mu_{xz}, \end{aligned} \quad (1.117)$$

де μ_i - інтенсивність швидкостей деформацій зсуву:

$$\mu_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2 + \frac{3}{2}(\mu_{xy}^2 + \mu_{yz}^2 + \mu_{xz}^2)}.$$

Середовище не піддається стиску. З рівностей (1.117) випливає залежність:

$$\tau_i = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} + \frac{\eta}{3} \mu_i. \quad (1.118)$$

Окрім цього при великих навантаженнях лінійна залежність між напруженнями та деформаціями не досить точно підтверджується дослідями, і при уточнюючих розрахунках краще виходить з нелінійних рівнянь. Тому для подальшого узагальнення пропонується перехід до нелінійної пружності та додавання до пружно - в'язкої моделі пластичного елементу.

Модель, яка містить послідовне з'єднання пружного, в'язкого та пластичного елементів, наведена на рисунку 1.24.а. При напруженні

нижче границі текучості ($\sigma_1 \triangleleft \sigma_T$) ця модель поводить себе як пружно - в'язке середовище Максвелла.

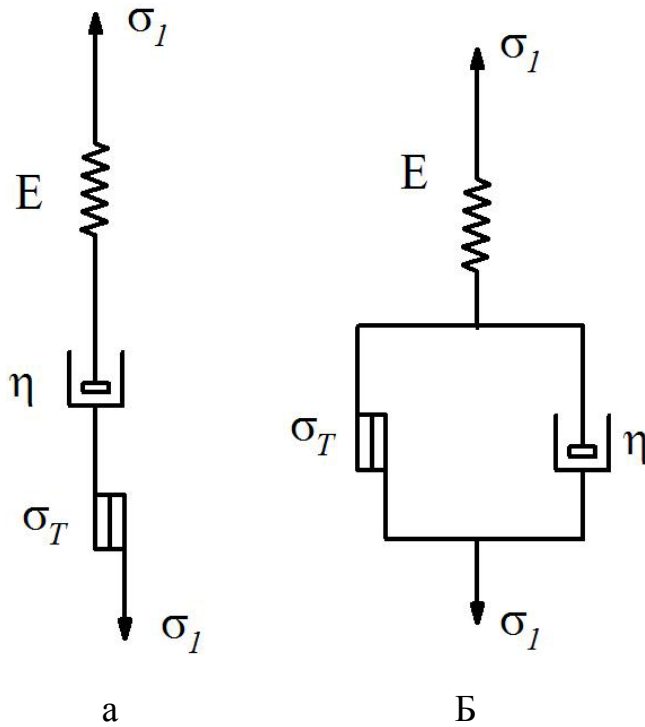


Рисунок 1.24 - Моделі пружно-в'язко-пластичного середовища

При $\sigma_1 = \sigma_T$ настапає пластична течія – напруження не можуть перевищувати границю текучості.

Друга модель, яка містить комбіноване з'єднання пружного, в'язкого та пластичного елементів, наведена на рисунку 1.24.б. Модель при напруженні нижче границі текучості є чисто пружною.

Для багатьох матеріалів, якщо лінійна залежність між напруженнями та деформаціями не потверджується дослідями, необхідно користуватися нелінійними рівняннями. Рівняння Ю. Н. Работнова:

$$\varphi(\varepsilon_1) = \sigma_1(t) + \int_0^t Q(t-\tau)\sigma_1(\tau)d\tau. \quad (1.119)$$

Якщо t мале, тоді деформація післядії, яку описує інтегральний член, мала і тоді отримуємо:

$$\sigma_1 = \varphi(\varepsilon_1). \quad (1.120)$$

Функція $\varphi(\varepsilon_1)$ характеризує криву деформації при швидкому дослідженні. Коло цієї кривої розгортається процес післядії. По відношенню до функції $\varphi(\varepsilon_1)$ це рівняння є лінійним. Вирішуючи його відносно σ_1 , отримали:

$$\sigma_1(t) = \varphi - \int_0^t R(t-\tau)\varphi(\tau)d\tau, \quad (1.121)$$

де $R(t-T)$ — ядро релаксації.

При постійній напрузі $\sigma_1 = \text{const} = \sigma_0$:

$$\varphi(\varepsilon_1) = [1 + K(t)]\sigma_0; \quad K(t) = \int_0^t Q(t - \tau) d\tau.$$

Тобто криві деформації при фіксованих напруженнях подібні. У випадку релаксації постійна деформація ($\varepsilon_1 = \text{const} = \varepsilon_0$), тоді:

$$\sigma_1 = [1 - L(t)]\varphi(\varepsilon_0); \quad L(t) = \int_0^t R(t - \tau) d\tau.$$

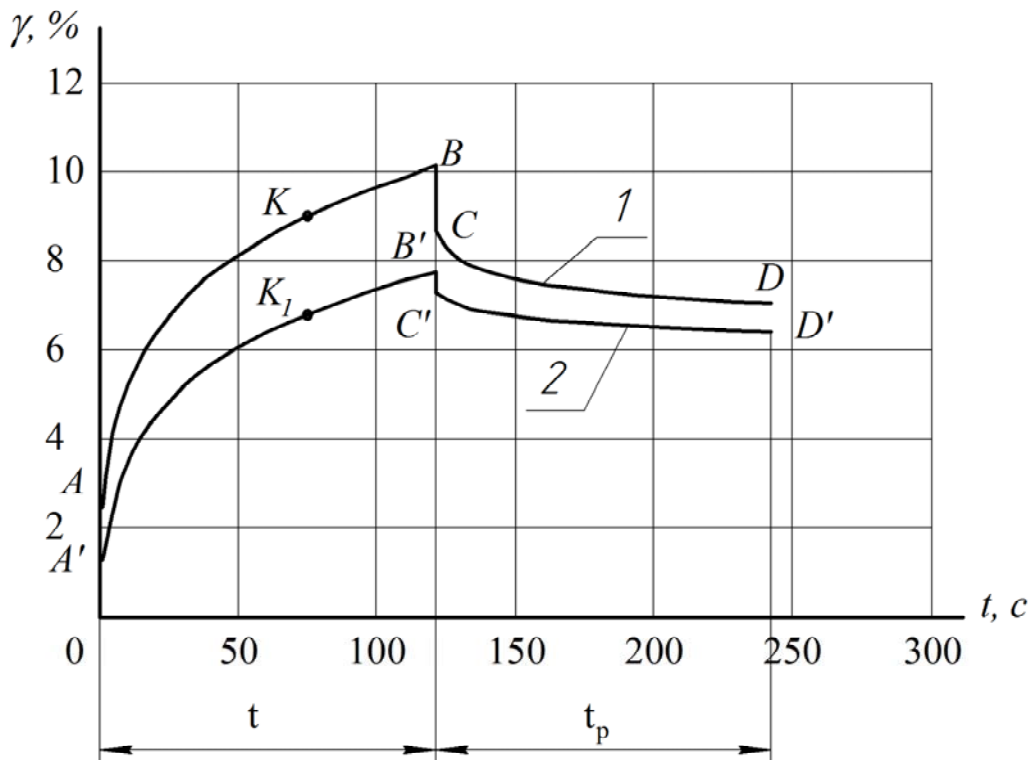
Перехід до складного напруженого стану здійснюється на основі припущення о пропорційності девіаторів напруження та деформації.

Для застосування всіх вище наведених рівнянь при деформаціях зсуву розглядають відносну деформацію при зсуві γ в залежності від дії напруження зсуву τ .

Були проведені експериментальні дослідження механічної поведінки деформованих зразків паштетів [23]. Контрольний зразок: печітковий паштет, виготовлений за традиційною технологією. Дослідницький зразок, окрім основних компонентів, містить 15% пребіотичної суміші, яка складається з порошків кореня цикорію та топінамбуру у співвідношенні 30:70%. Дослідження проводилися з використанням ротаційного віскозиметру Rheotest RN4.1. Температура зразків 22°C зберігалась постійною протягом експерименту.

Оскільки для паштетних виробів важливо зберігати форму та міцність виробів, тому доцільно розглядати повзучість, тобто зміну протягом часу деформації при постійній напрузі. Зразки піддавалися деформації зсуву під дією постійного напруження $\tau_0=50\text{Па}$, яке прикладене в початковий момент часу ($t=0$), та залишається незмінною протягом часу $t=120$ с. Після раптового зняття навантаження поведінка зразків досліджувалася також протягом 120 с. На рисунку 1.25 наведені криві повзучості для дослідницького та контрольного зразків.

Загальна деформація має дві складові: деформація об'єму та деформація змінення форми. При аналізі кривих повзучості, перш за все ми враховували, що на характер їх змінення впливають пружна, в'язка та пластична складові деформації.



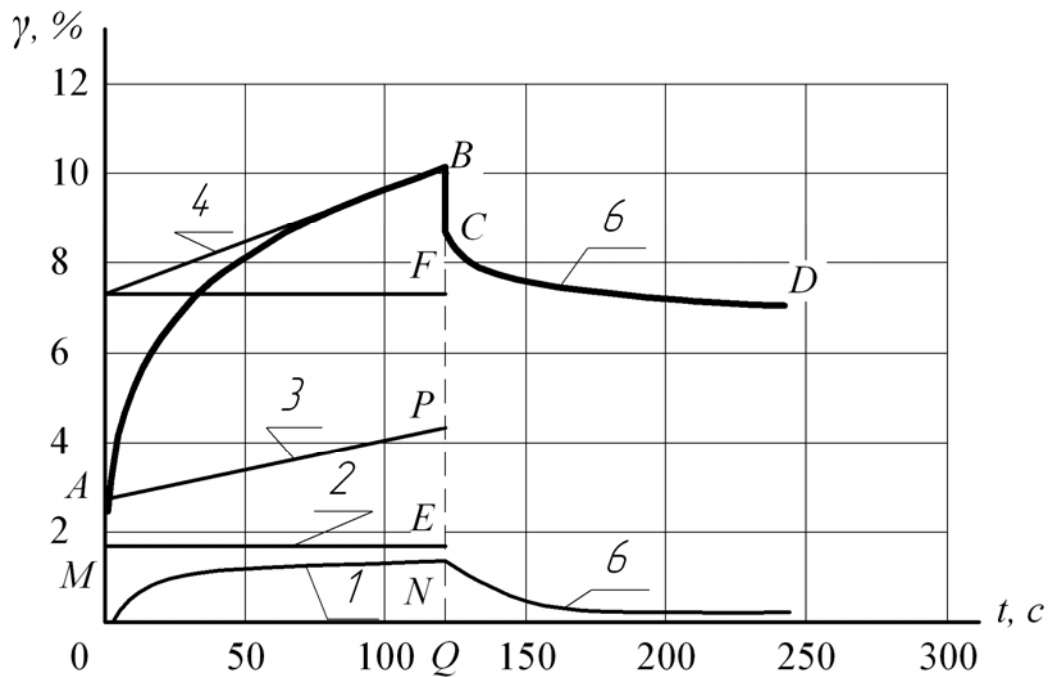
1 – контрольний зразок; 2 – дослідницький зразок

Рисунок 1.25 - Криві повзучості зразків

На рисунку 1.26 наведена крива повзучості контрольного зразку паштету та складові деформації.

З цього часу крива повзучості має такий же нахил, як і складова в'язкої течії, що має приріст пропорційний течії часу після прикладення напруження. Пружна деформація запізнювання пропорційна прикладеному напруженню та описується монотонно зростаючою обмеженою функцією, яка залежить від часу. Темп зростання пружної деформації запізнювання знижується, доки її нахил не стає дорівнювати нулю.

Сумарна деформація (відрізок BQ) в момент часу $t=120$ с складається з миттєвої пружної деформації (відрізок BC), пружної деформації запізнювання (відрізок NQ), в'язкої (відрізок BF) та в'язко-пластичної (відрізок PE) течій. Після зняття напруження (точка B) миттєва пружна деформація зникає. Поява в'язких та пластичних деформацій неможлива без дії напруження, але вони залишаються після її зняття. Деформації в'язкої та пластичної течії залишаються сталими та дорівнюють величині, яку вони досягли в момент зняття напруги (крива релаксації CD).



1 – пружна деформація запізнювання; 2 – миттєва пружна деформація; 3 – в'язко-пластична течія; 4 – в'язка течія.

Рисунок 1.26 - Крива повзучості контрольного зразку та її складові

Пружна деформація запізнювання спочатку зникає з більшою швидкістю, потім її швидкість з течією часу монотонно зменшується, і деформація асимптотично наближується до кінцевого значення. Оскільки пружна деформація запізнювання має безперервний характер, криві відновлення уявляють собою дзеркальне відображення кривої зростання пружної деформації запізнювання.

Базуючись на вигляді кривих повзучості, зроблений висновок, що пружна деформація протягом перших 50 секунд складає значну частину деформації (33%), а потім ця частина значно зменшується.

За кривими повзучості, які отримані при вимірах з використанням віскозиметру, були визначені числові значення і залежності деформації від часу. Закони, які описують складові деформації та загальну деформації контрольного та дослідницького зразків (%) наведені в таблиці 1.3. Постійні, які входять до рівнянь, визначають залежність між напруженням, часом її дії та деформацією, що характеризує механічні властивості паштету.

Загальну деформацію при дії напруження θ_0 протягом $t=120$ с знайшли у вигляді:

$$\gamma(t) = \gamma_1(t) + \gamma_2(t) + \gamma_3(t) + \gamma_4(t). \quad (1.122)$$

Таблиця 1.3 – Закони деформацій зразків

	Вид деформування	Закони деформації
	Контрольний зразок	Миттєва пружна
В'язка течія		$\gamma_2(t) = 0,024t$
Пружна запізнювання		$\gamma_3(t) = 0,476(1 - e^{-0,237t}) + 1,059(1 - e^{-0,021t})$
В'язко-пластична течія		$\gamma_4(t) = 0,015t + 3,086$
Загальна		$\gamma(t) = 4,616 + 0,039t + 0,476(1 - e^{-0,237t}) + 1,059(1 - e^{-0,021t})$
Релаксація		$\gamma_{3P}(t) = 0,476e^{-0,237t_P} + 1,059e^{-0,021t_P}$
Дослідницький зразок		Миттєва пружна
	В'язка течія	$\gamma_2(t) = 0,022t$
	Пружна запізнювання	$\gamma_3(t) = 0,266(1 - e^{-0,142t}) + 0,554(1 - e^{-0,017t})$
	В'язко-пластична течія	$\gamma_4(t) = 0,015t + 2,625$
	Загальна	$\gamma(t) = 2,684 + 0,037t + 0,266(1 - e^{-0,142t}) + 0,554(1 - e^{-0,017t})$
	Релаксація	$\gamma_{3P}(t) = 0,266e^{-0,142t_P} + 0,554e^{-0,017t_P}$

Якісні відомості про поведінку паштетів при випробуваннях на повзучість можна отримати, якщо надати продукт у вигляді ідеалізованої моделі, яка повинна відображати миттєву пружну деформацію, пружну деформацію запізнювання, в'язку та пластичну течію, релаксацію. Для опису поведінки паштетів при навантаженні необхідно використати достатньо складну комбінацію механічних моделей.

Для того, щоб краще наблизитися до механічних властивостей паштетів, використовуючи отримані рівняння, створили складну механічну модель, яку отримали сполученням пружних та в'язких елементів різної кількості та способів з'єднання.

Враховуючи, що загальна деформація має чотири складових, модель повинна містити або складні моделі, кожна з яких моделює відповідну складову загальної деформації.

На рисунку 1.27 наведена механічна модель, яка відображає деформаційні характеристики паштетів.

Миттєва пружна деформація описується законом Гука:

$$\gamma_1 = \frac{\theta_0}{G_0}, \quad (1.123)$$

де G_0 - модуль зсуву при миттєвої пружної деформації.

Пружина з модулем зсуву G_0 створює миттєву пружну деформацію, яку на кривій повзучості відображає відрізок пряма 2 (рисунк 1.26). У даному випадку $\theta_0/G_0 = 1,530$ для контрольного зразку та $\theta_0/G_0 = 0,59$ для дослідницького зразку.

Відповідно закону Ньютона в'язка складова дорівнює:

$$\theta = \eta_0 \frac{d\gamma_2}{dt}. \quad (1.124)$$

У випадку дії постійної напруги, яка прикладена у момент часу $t = 0$, необоротна деформація в'язкої течії дорівнює (пряма 4 на рисунку 1.26):

$$\gamma_2(t) = \frac{\theta_0}{\eta_0} t, \quad (1.125)$$

де η_0 - коефіцієнт ньютонівської в'язкості.

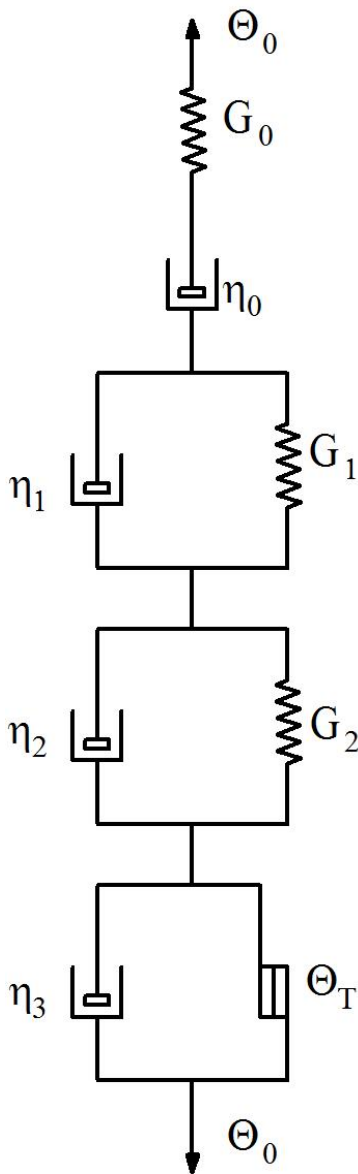


Рисунок 1.27 – Механічна модель

Тангенс кута нахилу функції в'язкої течії:

$$\operatorname{tg} \alpha = \theta_0 / \eta_0 . \quad (1.126)$$

Демпфер з коефіцієнтом ньютонівської в'язкості η_0 , послідовно з'єднаний з пружиною, моделює в'язку деформацію.

Для зразків, які досліджуються: $\theta_0 / \eta_0 = 0,024$ - контрольний зразок; $\theta_0 / \eta_0 = 0,022$ - дослідницький зразок.

Після зняття напруження при $t=120$ с в'язка течія припиняється, оскільки $d\gamma_2/dt=0$ при $\theta=0$, але деформація в'язкої течії залишається постійною та дорівнює величині, яку вона досягла в момент часу $t=120$ с.

Моделлю, яка відображає пружну деформацію запізнювання (крива 1 на рисунку 1.26) є узагальнене тіло Фойгта яке має в'язкі та пружні елементи. Реологічне рівняння, яке відповідає цієї моделі наведене в таблиці 1.3.

Рівняння моделі Фойгта, в якій пружина та демпфер з'єднанні паралельно:

$$\theta_1 = G_1 \gamma_3, \quad \theta_2 = \eta_1 \frac{d\gamma_3}{dt}, \quad (1.127)$$

де θ_1 - напруження в пружині; θ_2 - напруження в демпфері.

Умова паралельного з'єднання $\theta_0 = \theta_1 + \theta_2$. Звідки:

$$\eta_1 \frac{d\gamma_3}{dt} + G_1 \gamma_3 = \theta_0 \quad (1.128)$$

або

$$\frac{d\gamma_3}{dt} + \frac{G_1}{\eta_1} \gamma_3 = \frac{\theta_0}{\eta_1} \quad \text{при } t \geq 0. \quad (1.129)$$

Розв'язання цього рівняння знаходять у вигляді:

$$\gamma_3(t) = A e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}} + \frac{\theta_0}{G_1}, \quad (1.130)$$

де G_1 - модуль зсуву деформації запізнювання; η_1 - коефіцієнт ньютонівської в'язкості деформації запізнювання.

Оскільки напруження θ_0 , яке прикладене у початковий момент часу, не викликає миттєвої деформації, $\gamma_3(0) = 0$, і довільна стала дорівнює: $A = -\frac{\theta_0}{G_1}$.

Тобто:

$$\gamma_3(t) = \frac{\theta_0}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}} \right). \quad (1.131)$$

Обробка експериментальних даних деформування зразків, довела, що з більш високою ступеню точності функція змінення пружної деформації запізнювання має дві складові, це підтверджує складний характер деформаційного процесу паштетів.

У даному випадку

$$A = b + d = -\left(\frac{\theta_0}{G_1} + \frac{\theta_0}{G_2} \right). \quad (1.132)$$

Функція змінення у часі пружної деформації запізнювання приймає вигляд:

$$\gamma_3(t) = \frac{\theta_0}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}} \right) + \frac{\theta_0}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{G_2 t}{\eta_2}} \right). \quad (1.133)$$

де G_1, G_2 - модулі зсуву деформації запізнювання елементів Фойгта;
 η_1, η_2 - коефіцієнти ньютонівської в'язкості деформації запізнювання елементів Фойгта.

Тобто модель повинна мати два послідовно з'єднаних елементи Фойгта. Для контрольного зразку: $\theta_0/G_1 = 0,476$; $\theta_0/G_2 = 1,059$; $G_1/\eta_1 = 0,237$; $G_2/\eta_2 = 0,021$. Для дослідницького зразку: $\theta_0/G_1 = 0,266$; $\theta_0/G_2 = 0,554$; $G_1/\eta_1 = 0,142$; $G_2/\eta_2 = 0,017$.

Після зняття напруження деформація пружини зникає, деформація демпфера залишається постійною.

Рівняння моделі Фойгта у загальному випадку приймає вигляд:

$$\frac{d\gamma_3}{dt} + \frac{G_1}{\eta_1} \gamma_3 = 0 \text{ при } t_p \geq t. \quad (1.134)$$

При існуванні двох послідовно з'єднаних елементів Фойгта, розв'язання рівняння отримали у вигляді:

$$\gamma_{3P}(t) = \frac{\theta_0}{G_1} e^{-\frac{G_1}{\eta_1} t_p} + \frac{\theta_0}{G_2} e^{-\frac{G_2}{\eta_2} t_p}. \quad (1.135)$$

Узагальнене тіло Фойгта, яке складається з двох послідовно з'єднаних елементів, також послідовно з'єднується з попередніми елементами. Криві течії зразків доводять, що паштети володіють визначеною границею текучості. Для контрольного зразку $\theta_0 = 45,61$ Па, для дослідницького - $\theta_0 = 47,70$ Па.

Оскільки напруження при проведенні експерименту перевищує границю текучості зразків, починається в'язко-пластична течія при постійному напруженні (пряма 3 на рисунку 1.26). Це свідчить, що в подальшому механічна модель повинна містити тіло Сен - Венана, яке паралельно з'єднане з в'язким елементом. Тіло Сен - Венана пластично тече при постійному напруженні, яке дорівнює границі текучості. Тобто до моделі послідовно приєднується тіло Шведова - Бінгама.

Реологічне рівняння в'язко-пластичної течії має вигляд:

$$\dot{\gamma}_4(t) = \frac{\theta_0 - \theta_T}{\eta_3}, \quad (1.136)$$

де θ_T - границя текучості матеріалу; η_3 - коефіцієнт ньютонівської в'язкості в'язко-пластичної течії.

Звідкіля:

$$\gamma_4(t) = \frac{\theta_0 - \theta_T}{\eta_3} t + C_1. \quad (1.137)$$

Для контрольного та дослідницького зразків: $\frac{\theta_0 - \theta_T}{\eta_3} = 0,015$.

Загальна деформація зразків може бути наведена у вигляді:

$$\gamma(t) = \frac{\theta_0}{G_0} + \frac{\theta_0}{\eta_0} t + \frac{\theta_0}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}}\right) + \frac{\theta_0}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{G_2 t}{\eta_2}}\right) + \frac{\theta_0 - \theta_T}{\eta_3} t + C_1. \quad (1.138)$$

Використовуючи дані експериментальних досліджень, отримали кількісні значення характеристик елементів моделі, які наведені у таблиці 1.4. Кількісний опис деформації моделі, яка отримана у сполученні з точними вимірюваннями, має практичне значення при розробці рецептур та технологічних процесів отримання пащтетів.

Таблиця 1.4 - Значення характеристик елементів моделі

Тип зразку	Характеристики моделі						
	G_0 , кПа	η_0 , кПа·с	G_1 , кПа	η_1 , кПа·с	G_2 , кПа	η_2 , кПа·с	η_3 , кПа·с
Контрольний зразок	3,268	2,083	10,504	44,321	4,721	224,810	29,266
Дослідницький зразок	8,474	2,273	18,797	132,373	9,002	529,529	15,333

Питання для самоконтролю

1. Яка величина задана, а яка вимірюється при випробуваннях на повзучість, а яка - при випробуваннях на релаксацію?
2. З яких тіл складаються механічні моделі?
3. Як визначаються загальні деформації та загальні напруження моделі при послідовному з'єднанні основних елементів; при паралельному з'єднанні основних елементів?
4. Яка методика створювання моделей?
5. З яких елементів та при якому їх з'єднанні створюється модель Максвелла, а з яких - модель Кельвіна?
6. Комбінація яких моделей створює в'язко - пластичне сере-

довище?

7. Які види деформацій виникають при випробуваннях в'язко-пластичних тіл на повзучість?

1.7 Структурно-механічні характеристики як об'єктивний показник якості харчових продуктів

Складна взаємодія компонентів, які входять до складу продуктів, з водою та один з одним формує властивості харчових продуктів [14, 21, 30]. Придання харчовим виробам заданої форми та структури – одна з важливих задач технології. Тип структури та механічні властивості харчових продуктів визначають консистенцію продукту. По консистенції оцінюють якість продукту, порівнюючи дану систему з загальновідомими еталонними продуктами.

Розповсюджена сенсорна (органолептична) оцінка консистенції, яку можна ідентифікувати як емпіричну характеристику деформаційної поведінки матеріалу. Органолептична оцінка якості існуючих та нових видів харчових виробів є базовою для збирання початкової інформації, а також для встановлення кореляційних залежностей відчущань, які виникають у дегустатора. Але органолептична оцінка не завжди об'єктивна, оскільки залежить від фізіологічних та психологічних факторів, які впливають на відтворюваність та чисельні значення показників.

Більш точні результати дозволяє отримати використання інструментальних методів контролю по структурно – механічним характеристикам. Переваги цих методів: показники не залежать від індивідуальних особливостей дегустатора, збільшується точність визначення, висока відтворюваність, результати інструментального визначення є методологічно встановленим «фактом».

Знання реологічних характеристик сировини та готової продукції потрібні не тільки для оцінки якості, але і для проектування технологічного обладнання та для оптимізації технологічних процесів. Від відповідності параметрів сировини визначеним вимогам та забезпечення контролю параметрів процесів на всіх стадіях виробництва залежить якість виробів. Для виробітки продукції заданої та стабільної якості необхідні: інструментальний контроль консистенції готового виробу; інформація про хімічний склад сировини та інших компонентів рецептури, раціональних і оптимальних параметрах технологічного процесу, а також про їх вплив на консистенцію. Для опти-

мізації параметрів технологічної обробки та зберігання продуктів необхідно знати фізико – хімічні і реологічні характеристики продукції.

Застосування технологічних методів, які дозволяють цілеспрямовано діяти в процесі обробки на структурно – механічні характеристики сировини, дозволить ефективно управляти показниками якості, в окреmostі консистенцією готових виробів.

Для контролю за консистенцією та режимами технологічних процесів найбільш перспективні структурно – механічні властивості зсуву, оскільки ці характеристики більш чутливі до технологічних та механічних змінень внутрішньої структури продукту.

Вплив технологічних факторів (температури, вологості, доданків до стандартної рецептури) на структурно – механічні характеристики достатньо суттєвий.

Питання для самоконтролю

1. Чому органолептична оцінка якості продуктів не завжди об'єктивна?

2. В чому полягають переваги інструментальних методів контролю по структурно – механічним характеристикам у порівнянні з органолептичною оцінкою?

3. Чи потрібні знання реологічних характеристик сировини та готової продукції для проектування технологічного обладнання та для оптимізації технологічних процесів?

4. Чому структурно – механічні властивості зсуву найбільш перспективні для контролю за консистенцією та режимами технологічних процесів?

Розділ 2

СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

2.1 Властивості зсуву харчових продуктів

2.1.1 Класифікація реологічних тіл по структурно-механічним властивостям зсуву

Найбільше розповсюдження отримали способи класифікації харчових реологічних тіл за характеристиками зсуву.

Як відомо, харчові маси поділяються на рідиннообразні (ньютонівська та структурована рідина) та твердообразні продукти.

Класифікація реальних тіл за величиною відношення $\theta_0/\rho g$, яке є мірою здібності речовини зберігати свою форму, наведена у таблиці 2.1 [13, 40].

Таблиця 2.1 - Класифікація реальних тіл

$\theta_0/\rho g$, м	Менш ніж 0,005	0,005 – 0,02	0,02 – 0,15	Більш ніж 0,15
Найменування речовини	Структурні рідини	Рідинні пасти	Густі пасти	Тверді тіла

Де θ_0 - граничне напруження зсуву; ρ - щільність продукту, кг/м³;
 g - прискорення вільного падіння.

Б.А. Ніколаєв пропонує узагальнену класифікацію (від твердого до істинно – в'язкого стану) за величиною механічних властивостей: модулів пружності, в'язкості та інших [34]. До першої групи відносяться тверді та твердообразні тіла (твердий жир, цілі тканини м'яса, сухарі, печиво), до другої групи – твердо – рідинні (м'ясний фарш,

кислий сир, студені, мучне тісто та інші), до третьої рідиннообразні та рідинні (розплавлений жир, бульйони, молоко, мед, вода та інші).

Продукти можна також класифікувати за характером змінення динамічної та ефективної в'язкості у залежності від градієнту швидкості та по значенням граничного напруження зсуву. Відповідно цієї класифікації розрізняють наступні групи та підгрупи харчових мас.

1. Структуровані рідини та системи: а) практично ньютонівська рідина, коли $\eta_{E\Phi}$ не залежить від $\dot{\gamma}$ і є постійною динамічною в'язкістю η , при цьому $\theta_0=0$; б) структурована рідина, коли $\eta_{E\Phi}$ залежить від $\dot{\gamma}$ до критичного його значення $\dot{\gamma}_{KP}$, після чого $\eta_{E\Phi}$ пере-
 ходе в динамічну в'язкість, яка не залежить від $\dot{\gamma}$; в) структурована система, коли $\eta_{E\Phi}$ залежить від $\dot{\gamma}$ у всій зоні руйнування структури при $10 \leq \theta_0 \leq 100$ Па.

2. Пластично – в'язкі системи при $100 \leq \theta_0 \leq 1000$ Па: а) з нормальною консистенцією $100 \leq \theta_0 \leq 500$ Па; з високою консистенцією $500 \leq \theta_0 \leq 1000$ Па.

3. Пластичні системи при $\theta_0 > 1000$ Па.

Можна використовувати класифікацію реальних тіл за допомогою степеневого рівняння. Для цього перетворимо рівняння $\theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\gamma}^n$, щоб коефіцієнту B_1^* придати визначений фізичний сенс – ефективної в'язкості B_0^* (Па·с), при градієнті швидкості, який дорівнює одиниці, тобто при $\dot{\gamma}_1 = 1 \text{ c}^{-1}$:

$$\theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\gamma}^n \dot{\gamma}_1^{1-n} = B^* \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \right)^n \dot{\gamma}_1 = B_0^* \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \right)^{n-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \right) \dot{\gamma}_1, \quad (2.1)$$

Позначивши $m = 1 - n$ темп руйнування структури та $\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} = \dot{\gamma}_*$ - безрозмірний градієнт швидкості, отримали:

$$\theta - \theta_0 = B_0^* \dot{\gamma}_*^{-m} \dot{\gamma} = \eta_{E\Phi} \dot{\gamma}, \quad (2.2)$$

звідки

$$\eta_{E\Phi} = B_0^* \dot{\gamma}_*^{-m}, \quad (2.3)$$

де $\eta_{E\Phi}$ - ефективна в'язкість, Па·с.

У загальному випадку $\dot{\gamma}_1$ може мати будь-яке фіксоване значення, але для зручності розрахунків величині надають значення, яке дорівнює одиниці.

Для обчислення ефективної в'язкості за результатами вимірювань за допомогою ротаційного віскозиметру можна використовувати формулу [13, 40]:

$$\eta_{E\Phi} = B(w/w_1)^{-m} = Bw_*^{-m}, \quad (2.4)$$

де B - ефективна в'язкість (Па·с) при одиничному значенні окружної швидкості; w - окружна швидкість бокової поверхні ротору коаксіального циліндричного віскозиметру, м/с; w_1 - окружна швидкість, яка дорівнює одиниці її вимірювання, тобто 1 м/с; w_* - безрозмірна окружна швидкість (її числове значення).

Ця формула може бути також використана для інтерпретації результатів капілярної віскозиметрії, тоді w - середнє об'ємна швидкість або консистентна змінна.

Для перелічення ефективної в'язкості, яка отримана з використанням ротаційно – циліндричних віскозиметрів, при одиничних значеннях градієнту швидкості та окружної швидкості запропонована формула [14]:

$$B_0^* = B \left\{ \frac{\dot{\gamma} R_B [1 - (R_B/R_H)^2]}{2w_1} \right\}^{-m}, \quad (2.5)$$

де R_B та R_H - відповідно внутрішній та зовнішній радіус кільцевого зазору віскозиметру, м.

Градієнт швидкості розраховується за формулою (1.5).

Якщо в рівнянні (1.53) $\theta_0 = 0$ і $n = 1$, воно описує течію істинно – в'язкої, ньютонівської рідини, коефіцієнт B_1^* приймає значення ньютонівської в'язкості (кут нахилу 45° на рисунку 2.1,б). При $\theta_0 = 0$ і $n > 1$ рівняння відповідає ділатантним рідинам, при $\theta_0 = 0$ і $n < 1$ - псе-

вдопластичним. Для пластично – в’язких тіл Бінгама $\theta_0 > 0$ і $n=1$. В початковій формі запису рівняння описує поведінку «степеневих» рідин, які володіють істинним або уявним граничним напруженням зсуву [13, 54]. Окрім цих чотирьох видів тіл на графіку наведені: пружне тіло, у якого при будь – яких напруженнях течія відсутня, тобто в’язкість нескінченна; пластичне тіло, ефективна в’язкість якого характеризується лінією з кутом нахилу 45° (рисунок 2.1,в), та ідеальна рідина, при течії якої внутрішній опір дорівнює нулю.

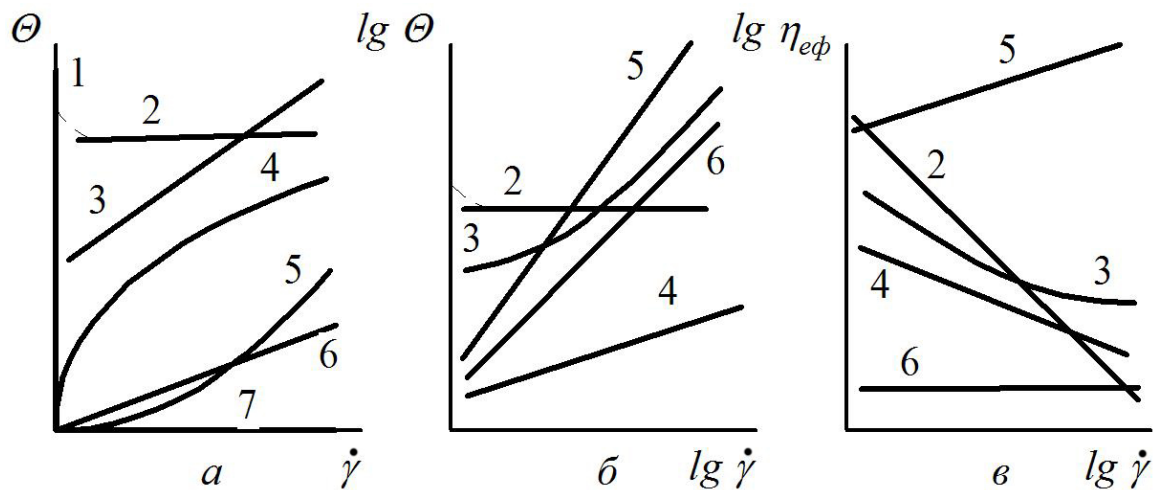


Рисунок 2.1 – Залежності для різних реологічних тіл:

а – між напруженням зсуву та градієнтом швидкості в рівномірних шкалах; б - між напруженням зсуву та градієнтом швидкості в логарифмічних шкалах; в - між ефективною в’язкістю та градієнтом швидкості в логарифмічних шкалах; 1 – пружне (Гукове); 2 – пластичне (Сен – Венанове); 3 – пластично – в’язке (Бінгамове); 4 – псевдопластичне; 5 – ділатантне; 6 – істинно в’язке (ньютонівське); 7 – ідеальна рідина (паскалевська)

Системи, графіки яких наведені на рисунку, не змінюють своїх властивостей в часі. Існує група систем зі змінними в часі властивостями: тиксотропні, у яких напруження зсуву та ефективна в’язкість зменшуються протягом зсуву, і реопексні, у яких напруження зсуву та ефективна в’язкість збільшуються протягом часу у випадку діяння на систему дотичних напружень при постійному градієнті швидкості.

Криві течії «степеневих» рідин в рівномірних шкалах (рисунок 2.1,а) спрямляються в логарифмічних (рисунок 2.1,б). Виключенням є крива течії Бінгамова тіла, яка виходить в пряму при високих напру-

женнях, що значно перевищують граничне напруження зсуву.

Показник ступеню - індекс течії в рівнянні (1.53) визначається залежністю:

$$n = (d \lg \theta) / (d \lg \dot{\gamma}), \quad (2.6)$$

Якщо ефективну в'язкість розраховувати за рівнянням Ньютона (1.33) для визначених напружень та градієнтів швидкості, тоді темп руйнування структури за рівнянням (2.3), який характеризує кут нахилу лінії ефективної в'язкості на рисунку 2.1.в, буде обчислюватися за залежністю:

$$m_1 = \frac{d \lg \eta_{E\Phi}}{d \lg \dot{\gamma}} = \frac{d(\lg \theta - \lg \dot{\gamma})}{d \lg \dot{\gamma}} = \frac{d \lg \theta}{d \lg \dot{\gamma}} - 1 = n - 1. \quad (2.7)$$

Для псевдопластичних систем $0 < n < 1$, тобто $-1 < m_1 < 0$.

Для зручності перетворень позначимо $m = -m_1$. Таким чином, змінення ефективної в'язкості у залежності від швидкості деформації в логарифмічних шкалах є прямою лінією, кут нахилу якої визначається темпом руйнування структури.

При розгляді графіків, наведених на рисунках 2.1,б та 2.1,в слід враховувати, що в логарифмічних шкалах нульові значення величин знаходяться в нескінченності вниз та ліворуч відносно зображених осей ординат. Логарифми числових значень величин дорівнюють нулю, коли самі величини дорівнюють одиниці. Тому на цих графіках криві течії тіл 1 та 7 не наведені.

П.А. Ребіндер і Н.В. Михайлов поділяють реологічні тіла на рідиннообразні та твердообразні (рисунок 2.2) у залежності від характеру кривої $\eta_{E\Phi}(\theta)$ і періоду релаксації [38].

До рідинообразних тіл відносяться ньютонівські рідини та структуровані системи, які не мають статичного граничного напруження зсуву, тобто $\theta_{0 CT} = 0$. До твердообразних відносяться пружно – пластичні та інші тіла, які володіють статичним та динамічним граничним напруженням зсуву.

Залежність ефективної в'язкості від напруження або швидкості зсуву вважають основною характеристикою структурно – механічних властивостей дисперсних систем, оскільки ефективна в'язкість є підсумковою характеристикою, яка описує рівноважний стан між відновленням та руйнуванням структури в усталеному потоці. У загально-

му вигляді крива течії $\dot{\gamma}(\theta)$ має S – образний характер та відсікає на осі абсцис відрізок, в границях якого напруження, що діють на тіло, викликають тільки пружні або еластичні деформації.

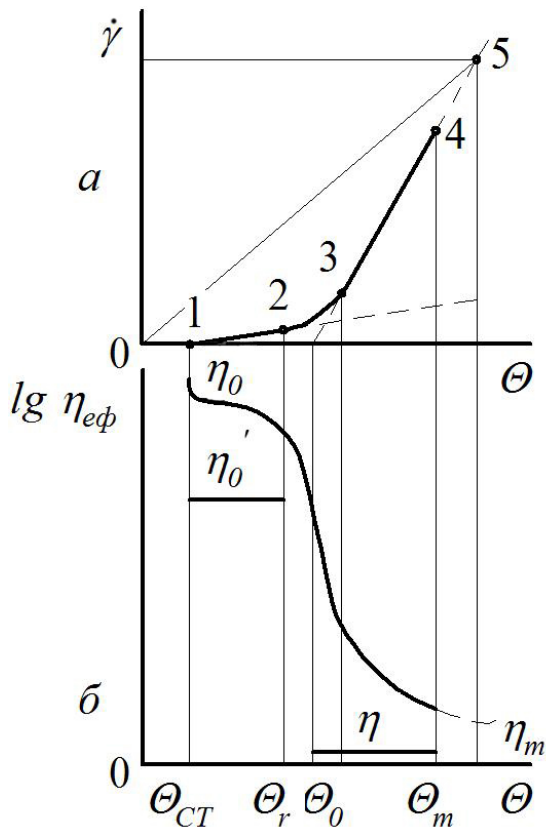


Рисунок 2.2 - Реологічні криві для твердо образних систем:

- а – залежність градієнту швидкості від напруження зсуву;
- б – залежність логарифму ефективної в'язкості від напруження зсуву;
- 0-1 – зона пружних деформацій;
- 1-2 – зона початку течії з найбільшою ефективною та пластичною в'язкістю;
- 2-3 – початок зони лавинного руйнування структури;
- 3-4 – зона лавинного руйнування структури (течія з найменшою пластичною в'язкістю);
- 5 і вище – зона ньютонівської течії з постійною в'язкістю гранично зруйнованої структури

Найважливішими властивостями зсуву структурованих систем є пластична та ефективна в'язкість $\eta_{EF}(\theta)$ і період релаксації $\tau_P(\theta)$; найбільша в'язкість η_0 незруйнованої структури при «ковзанні» міст контакту і в'язкість гранично зруйнованої структури η_m ; модулі пружності зсуву G ; границі текучості умовно – статичний θ_{CT} та динамічний – граничне напруження зсуву θ_0 ; міцність структури при пружно – крихкому або еластичному розриві θ_m та при пластично – в'язкому руйнуванні θ_T . Ці характеристики наведені на рисунку 2.2. При дослідженні та розрахунку конкретних явищ можливо ігнорувати одні суттєві властивості тіл, а враховувати інші.

Важливе значення для характеристики дисперсних систем мають модулі пружності та періоди релаксації [18]. Умовно – миттєвий модуль пружності це відношення напруження до миттєво – пружної складової деформації зсуву \mathcal{V}_0 ; еластичний модуль – відношення на-

пруження до пружної (еластичної) деформації за мінусом миттєво – пружної деформації $\gamma_m - \gamma_0$; рівноважний модуль розраховується як відношення напруження до загальної деформації γ_m , коли не можна розділити пружну та еластичну деформації.

Періоди релаксації можуть бути також визначені для випадків осьового або об'ємного деформування, для цього можуть бути використанні рівняння, які наведені вище. Релаксаційні характеристики і модуль пружності при об'ємному та осьовому розтягу – стиску описуються у різних комбінаціях рівнянням, які використовуються для вивчення властивостей зсуву. При обробці експериментальних даних часто не вдається всю криву течії описати одним рівнянням, тоді реологічні характеристики розраховуються для визначених інтервалів напружень або деформацій. У цих випадках дослідну криву розбивають на ділянки (рисунок 2.2), або апроксимують однією лінією.

Для розрахунку значень величин структурно – механічних характеристик при деформаціях зсуву або нормальних деформаціях за експериментальними даними отримують основні реологічні залежності: деформація – час; напруження – деформація, градієнт швидкості – напруження (рисунки 2.1, 2.2) та інші.

Існує також класифікація дисперсних систем на твердо – та рідиннообразні за характером змінення ефективної в'язкості зі збільшенням градієнту швидкості, як наведено на рисунку 2.3. Вводиться поняття для тиксотропних дисперсних структур про два типа реологічних кривих течії.

До першого типу відносять криві течії, у яких в'язкість та градієнт швидкості є однозначними функціями напруження (рисунки 2.1, 2.2). Ці криві характерні для багатьох харчових продуктів: м'ясних фаршів, конфетних мас та інших.

До другого типу відносять криві течії, у яких залежність в'язкості або швидкості деформації є неоднозначними функціями від напруження зсуву. Для них характерна наявність області зменшення напруження зсуву при збільшенні градієнту швидкості. Такі криві були отримані для деяких концентрованих суспензій глин, полімерних дисперсій; стосовно харчових продуктів вони вивчені недостатньо.

Інтерес для реології мають продукти, характеристики течії яких залежать від тривалості дії напруження: тиксотропні та реопексні (рисунок 2.4). За своєю поведінкою вони взаємно протилежні також, як взаємно протилежні псевдопластичні та ділатантні продукти.

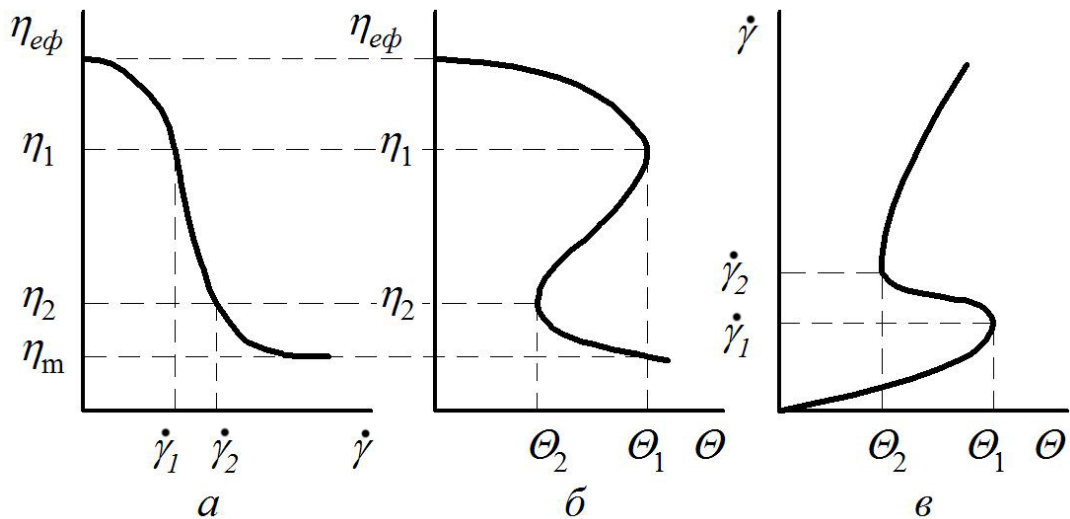


Рисунок 2.3 – Криві течії другого типу:

- а – залежність ефективної в'язкості від градієнту швидкості;
- б - залежність ефективної в'язкості від напруження зсуву;
- в - залежність градієнту швидкості від напруження зсуву

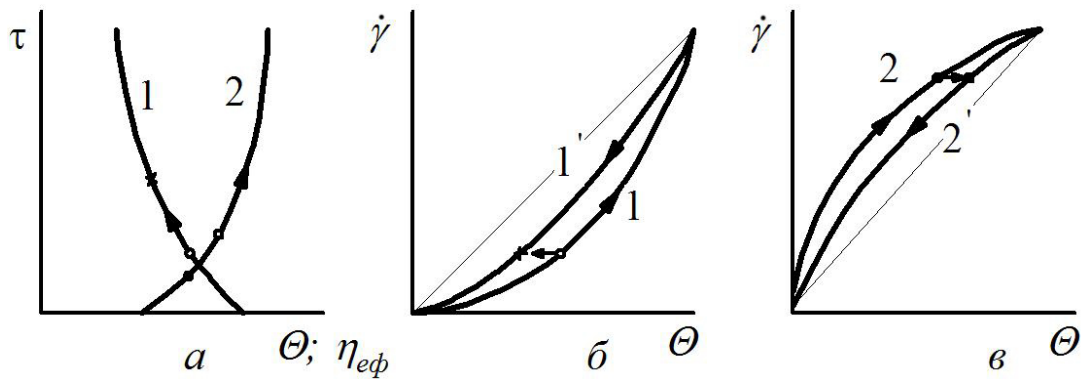


Рисунок 2.4 – Криві течії

- а – залежність напруження зсуву та ефективної в'язкості від тривалості дії напруження при постійному градієнті швидкості для систем: 1 - тиксотропних; 2 – реопексних; б – реограма тиксотропних систем: 1 – при навантаженні; 1' – при розвантаженні; в – реограми реопексних систем: 2 – при навантаженні; 2' – при розвантаженні

У псевдопластичних та ділатантних систем змінення ефективної в'язкості зі збільшенням градієнту швидкості відбувається достатньо швидко, і вплив тривалості деформування на в'язкість не може бути виявлений при звичайних вимірюваннях. Зменшення ефективної

в'язкості псевдопластичних систем обумовлене руйнуванням структури сітки та агрегатів часток і орієнтацією часток вздовж вектора швидкості. Збільшення ефективної в'язкості ділатантних систем обумовлене набуханням часток, що викликає зменшення товщини прошарок дисперсійного середовища і збільшення сили опору.

Тиксотропним системам притаманні відновлення структури після руйнування та безперервне її руйнування (до визначеної границі) при деформуванні, як наведено на рисунках 2.4,а і 2.4,б. Реопексні системи здібні структуруватися, тобто утворювати контакти між частками в результаті орієнтації або слабої турбулізації при механічному діянні з невеликими градієнтами швидкості (рисунки 2.4,а та 2.4,в). В порівнянні з тиксотропними реопексні системи зустрічаються рідко. Якщо за основу прийняти графік (рисунок 2.4,а), характерний для тиксотропних та реопексних систем, то ці дві властивості можуть проявлятися у псевдопластичних та ділатантних систем. Тоді відповідно рисунку 2.4,б спрямованість всіх стрілок змінюється на протилежну.

Наочне уявлення про вигляд течії продукту дають точки однакової конфігурації, наведені на рисунках 2.4,а, б, в. При цьому треба мати на увазі, що криві на рисунку 2.4,а отримані для постійного значення градієнту швидкості, який на рисунках 2.4,б, в виражається горизонтальним відрізком між кривими 1-1' і 2-2'.

Особливістю багатьох псевдопластичних та пластично – в'язких структурованих дисперсних систем коагуляційного типу є наявність гістерезисних петель при навантаженні та розвантаженні (рисунок 2.4). Матеріал починає текти, коли напруження досягає граничної або умовно – граничної величини. У подальшому, зі збільшенням напруження, підвищується градієнт швидкості та руйнується структурна сітка, руйнуються агрегати і орієнтуються частки.

Кожному значенню градієнту швидкості відповідає визначений рівноважний стан системи, який досягається при повільних зміннях градієнту швидкості. У дійсності дослід протікає швидко, можливі місцеві накопичення деформацій або напружень, якщо не встигає відбутися релаксація при переході до наступного вимірювання. Неодноразове проходження зони напружень, що досліджуються, в прямому та зворотному напрямленнях дозволяє добитися рівноважного стану продукту, при якому гістерезисні петлі практично зникають. Для тиксотропних псевдопластичних систем кожна наступна крива розташовується ліворуч і вище попередньої (рисунок 4.4,б), у просторової системі координат $\eta_{E\Phi}(t, \theta)$ всі експериментальні точки створюють

криволінійну поверхню [41].

Площа реограми (рисунки 2.4,а та 2.4,б) між кривою $\dot{\gamma}(\theta)$ та віссю ординат являє собою (у відповідному масштабі) питому потужність (на одиницю об'єму Вт/м³). Вона складається з потужності ньютонівської течії (площа між віссю ординат та лінією 0-5 на рисунку 2.4,а) та потужності, яка необхідна при тому же градієнті швидкості для досягнення даного ступеню руйнування структури. Потужність пропорційна площі між двома кривими, які утворюють гістерезисні петлі (рисунок 2.4,б), характеризує ступінь наближення системи до рівноважного стану.

В багатьох процесах продукт піддається інтенсивним механічним діям (в насосах, мішалках та інших приладах), тобто його структура досягає часткового або практично граничного руйнування. Тому при використанні результатів віскозиметричних досліджень для практичних розрахунків слідє хоч приблизно обирати ту криву течії, яка відповідає даному ступеню руйнування структури. Відповідно з цим при розрахунку будь – яких процесів необхідно використовувати характеристики, визначені у відповідному інтервалі напружень та деформацій. Якісну оцінку продукту також необхідно проводити за найбільш суттєвими для даного процесу характеристиками.

Питання для самоконтролю

1. Які групи та підгрупи харчових мас розрізняють при класифікації продуктів за характером змінення динамічної та ефективної в'язкості у залежності від градієнту швидкості та по значенням граничного напруження зсуву?

2. Які системи не змінюють своїх властивостей в часі, а які мають змінні в часі властивості?

3. На які різновидності поділяють реологічні тіла у залежності від характеру кривої $\eta_{E\Phi}(\theta)$ і періоду релаксації?

4. Залежність яких структурно – механічних властивостей дисперсних систем вважають основною характеристикою і чому?

5. Який фізичний сенс має умовно – миттєвий модуль пружності?

6. Які методи застосовують, якщо не вдається всю криву течії описати одним рівнянням при обробці експериментальних даних?

7. Які умови виникнення гістерезисних петель?

8. Які умови треба враховувати для практичних розрахунків при використанні результатів віскозиметричних досліджень?

2.1.2 Властивості зсуву дисперсних харчових мас

Належність реального тіла до того або іншого виду «ідеального» реологічного тіла, виявлена на основі попередніх експериментів, дозволяє вірно вибрати прибор для дослідження та визначати властивості, які підлягають вивченню. Феноменологічна класифікація харчових продуктів при деформаціях зсуву, яка базується на рівняннях Максвелла, Фойгта – Кельвіна, Бінгама та інших розповсюджена, обертає увагу на різницю в макроскопічних властивостях матеріалів, але може не враховувати характерні особливості, загальні для багатьох тіл. Ці особливості стають часто неістотними, якщо підтримуватися класифікації, яка базується на молекулярній будові. Застосування такої класифікації обмежене для реологічних досліджень гіпотезами суцільності та безперервності. Окрім того, багато харчових продуктів мають складну будову і в процесі вимірювань або переміщення можуть розділятися по фазам та слідувати тому або іншому закону в залежності від напружень, деформацій, температури і тисків.

Властивості зсуву використовують для вивчення та розрахунку течії структурованих рідин (молоко, м'ясні бульйони та інших) та пластично – в'язких систем (ковбасний фарш, паштети, тісто, шоколадні маси), а також для оцінки поведінці пружно – еластичних продуктів (готові ковбаси, хліб) при діянні на них дотичних напружень зсуву. За допомогою цих параметрів розраховують течію продукту в трубах, робочих органах машин та визначають необхідні зусилля для перемішування продукту. Окрім того, вони дозволяють оцінювати якість продукту та ступінь його обробки, тобто обґрунтовувати оптимальні технологічні та механічні умови процесу.

До основних характеристик зсуву харчових мас відносяться статичне та динамічне граничне напруження зсуву, ефективна і пластична в'язкості, пластичність структури, умовно миттєвий модуль пружності, еластичний і рівноважний модуль пружності, період релаксації.

Статичне граничне напруження зсуву θ_0 (Па) чисельно дорівнює зусиллю, яке приходить на одиницю площі поверхні продукту, при перевищенні якого продукт починає текти. Тобто, це напруження, після досягнення якого в системі починають розвиватися необо-

ротні деформації. Динамічне граничне напруження зсуву θ_{0D} (Па) – це напруження, яке чисельно дорівнює довжині відрізка, що відсікається на осі абсцис прямої лінії, яка характеризує зону пластично – в'язкої течії, в координатах $\dot{\gamma} - \theta$.

Ефективна в'язкість $\eta_{E\Phi}$ (Па·с) - це так звана уявна в'язкість, яка є змінною величиною і залежить від швидкості зсуву продукту.

Пластична в'язкість η_{II} (Па·с) – величина постійна, яка характеризується кутом нахилу прямої в осях координат $\dot{\gamma} - \theta$. Ця пряма відсікає на осі абсцис відрізок, який дорівнює статичному граничному напруженню зсуву θ_0 .

Динамічна в'язкість ньютонівської рідини η (Па·с) – величина постійна, яка характеризує опір ньютонівської рідини дотичним силам внутрішнього тертя та зміненню форми в процесі течії.

Пластичність структури (s^{-1}) – це відношення статичного граничного напруження зсуву до пластичної в'язкості $\psi = \theta_0 / \eta_{II}$.

Умовно – миттєвий модуль пружності – це відношення напруження θ до умовно – миттєвої істинно – пружної складової деформації зсуву γ_0 .

Еластичний модуль – це відношення напруження θ до еластичної деформації γ_E .

Рівноважний (релаксаційний) модуль – це відношення напруження θ до загальної пружної деформації γ_{PR} .

Період релаксації – це тривалість релаксації (відновлення) напруження при постійній деформації або деформації після зняття напруження.

Питання для самоконтролю

1. Які основні характеристики зсуву харчових мас?
2. Який фізичний сенс мають: статичне граничне напруження зсуву та динамічне граничне напруження зсуву?
3. Сформулюйте, що таке ефективна в'язкість та пластична в'язкість харчових мас?
4. Який фізичний сенс має динамічна в'язкість ньютонівської рідини?

5. Що визначає характеристика пластичності структури?
6. Які характеристики зсуву об'єднують умовно – миттєвий модуль пружності, еластичний модуль та рівноважний модуль?
7. Що визначає період релаксації?

2.2 Компресійні властивості харчових продуктів

Компресійні властивості визначають поведінку продукту в замкненому об'ємі або між двома площинами при дії на нього нормальних напружень. Поведінка пластично – в'язких середовищ при стиску не описується законом Паскаля. Різниця між ньютонівськими рідинами та пластично - в'язкими середовищами міститься в тому, що напруження, яке прикладене, розповсюджується в об'ємі продукту не миттєво, а протягом визначеного часу, величина якого залежить від фізико - механічних властивостей продукту. Аналогічно зміненню напруження відбувається і деформування зразку продукту.

При стиску або знаходять властивості міцності виробів та напівфабрикатів, або вивчають деформаційний та напружений стан матеріалу під дією зовнішнього навантаження. Характеристики міцності та пластичності харчових виробів визначають конструкцію та кінематику виконавчих органів технологічних машин.

2.2.1 Основні рівняння деформації

До компресійних характеристик відносяться: швидкість деформації, відносна лінійна або об'ємна деформації, коефіцієнт об'ємного стиску, коефіцієнт бокового тиску, коефіцієнт Пуассона, пружність, модулі пружності, загальна деформація.

Для пластично – в'язких тіл (м'ясний фарш, паштети, тісто) можна застосовувати кінетичне рівняння деформації [21]:

$$\varepsilon(\rho t) = b_\varepsilon p^{b_1} (1 + b_2 \lg t), \quad (2.8)$$

де b_ε , b_1 , b_2 - коефіцієнти, які залежать від механічного, фізико – хімічного стану продукту, його складу та особливостей первісної сировини.

Кінетичне рівняння є основним для розрахунків, пов'язаних з визначенням енергії деформації та величини самої деформації. Тому

першочерговою задачею є визначення коефіцієнтів до цього рівняння.

При деформації пластично – в'язких продуктів в жорсткій формі відбувається нерівномірне розподілення тиску не тільки у перерізі, яке враховується коефіцієнтом бокового тиску, але і по висоті (довжині) продукту.

При стиску продукту поршнем в формі (у вигляді вузької трубки діаметром D та висотою h) осьовим стиском p_0 цей тиск буде зменшуватися не тільки по діаметру, що характеризується коефіцієнтом бокового стиску, але і по висоті p_{0h} .

При розгляді нескінченно тонкого шару продукту dh , зневажаючи силою тяжіння внаслідок незначності висоти шару, на нього діють сили тиску, різниця яких $-\frac{\pi D^2}{4} \Delta p_{0h}$, де p_{0h} - різниця тисків на верхньому та нижньому шарах продукту. Стиск веде до появи запасу потенційної енергії між продуктом та трубкою (внаслідок бокового тиску та об'ємної деформації), яка визначається за емпіричною залежністю: $P_{TEP} = a_1 p_{0h} D^n dh$. Тоді рівновага шару описується рівнянням:

$$-\frac{\pi D^2}{4} \Delta p_{0h} - a_1 p_{0h} D^n dh = 0,$$

де p_{0h} - осьовий тиск на визначеній висоті трубки; Δp_{0h} - різниця осьового тиску між p_0 та p_{0h} .

Або:

$$\begin{aligned} \ln p_{0h} &= \ln p_0 - \frac{4a_1}{\pi} D^{n-2} h, \\ \lg p_{0h} &= \lg p_0 - a_2 D^{n-2} h = \lg p_0 - ah, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де a , a_1 , a_2 , n - коефіцієнти, які визначаються експериментально і залежать від структури продукту.

Границі застосування цих рівнянь по діаметру 0,02 – 0,05 м, по висоті 0 – 03 м. В кінцевому вигляді рівняння для розрахунку осьового p_{0h} та бокового $p_{\bar{0}h}$ тисків по висоті трубки:

$$p_{0h} = p_0 \cdot 10^{-ah}, \quad p_{0\bar{b}} = \xi p_0 \cdot 10^{-ah}, \quad (2.10)$$

де ξ - коефіцієнт бокового тиску.

З цих рівнянь виходить, що чим більш діаметр циліндру, тим незначно зменшення тиску по висоті.

Щільність [42], як одна з компресійних властивостей, є суттєвою характеристикою при розрахунках машин та апаратів і при оцінці якості продукту. Середню щільність ρ (кг/м³) для порівняно невеликого об'єму визначають з співвідношення:

$$\rho = M/V, \quad (2.11)$$

де M - маса продукту, кг; V - об'єм продукту, м³.

Істина щільність дорівнює границі відношення маси до об'єму, коли об'єм наближається до нуля.

Між щільністю та питомою вагою (Н/м³) існує залежність:

$$p = \rho g. \quad (2.12)$$

Щільність суміші з декількох компонентів, коли вони не вступають у взаємодію, при якій змінюється склад або об'єм суміші, розраховується з залежності:

$$\rho = \sum_i c_i \rho_i \quad \text{або} \quad \rho = 1 / \sum_i c_i \rho_i, \quad (2.13)$$

де c_i - концентрація одного з компонентів в суміші, кг на 1 кг суміші;
 ρ_i - щільність компоненту, кг/м³; i – кількість компонентів.

Щільність рідинообразних систем при змінненні температури розраховують за допомогою температуро – об'ємного коефіцієнта розширення β_T (1/К), що показує, на яку величину від початкової змінюється об'єм системи V при змінненні температури T на 1⁰С:

$$\beta_T = (1/V) / (\Delta V / \Delta T) = \varepsilon(t, T) / \Delta T, \quad (2.14)$$

де $\varepsilon(t, T)$ - відносна об'ємна деформація у будь – який момент часу t у результаті збільшення об'єму при підвищенні температури системи.

$$\varepsilon(t, T) = \Delta V(t, T) / V. \quad (2.15)$$

Якщо вважати температурний коефіцієнт об'ємного розширення величиною сталою у визначеному інтервалі температур, тоді залежність (2.14) перетворюється у наступні розрахункові формули:

$$\beta_T = \frac{1}{\rho_i} \frac{(\rho_c - \rho_T)}{(T - T_c)} \quad \text{або} \quad \rho_T = \frac{\rho_c}{1 + \beta_T(T - T_c)}, \quad (2.16)$$

де ρ_c - щільність при температурі T_c , кг/м²; ρ_T - щільність при більш високій температурі T , кг/м².

Щільність рідинообразних білкових систем (м'ясний бульйон, кров та інших), які містять велику кількість води, визначається за залежністю:

$$\rho_c = \rho_{0T} + aC, \quad (2.17)$$

де ρ_c - щільність при фіксованій температурі t та масової долі сухої речовини C , кг/м³; ρ_{0T} - щільність при масової долі сухих речовин, яка дорівнює нулю, та тієї самої температурі t кг/м³ (звичайно ρ_{0T} дорівнює щільності води); a - емпіричний коефіцієнт кг/м³.

Для пластично – в'язких (м'ясний фарш, тісто, цукерні маси та інших), кускових та сипучих порошкових продуктів щільність залежить від тиску іноді навіть у більшій мірі, ніж від температури. Щільність тонко подрібнених видів ковбасного фаршу у залежності від його хімічного складу та тиску, що діє на фарш, можна розраховувати за рівнянням [21]:

$$\rho = 1037 - (290\varphi + 10,5U) + 221g p, \quad (2.18)$$

де φ - жирність, кг жиру на 1 кг фаршу; U - вологовміст, кг вологи на 1 кг сухої речовини фаршу; p - тиск, який діє на фарш, Па.

Рівняння справедливе при $p=(0,1\dots 16)10^5$ Па при U від 1,8 до 2,7, що відповідає вологості від 0,65 до 0,73 вологи на 1 кг фаршу та жирності від 0,15 до 0,22 кг жиру на 1 кг фаршу. З підвищенням тиску в заданих границях вологості фаршу відокремлення вологи незначне, тому помилка у розрахунках щільності не перевищує 3...4%.

Вологість W та вологовміст U пов'язані залежністю:

$$W = U / (1 + U) \text{ та } U = W / (1 - W), \quad (2.19)$$

де W - 1 кг вологи на 1 кг продукту; U - 1 кг вологи на 1 кг сухої речовини.

Вологість може змінюватися від 0 до 1, вологовміст – від 0 до нескінченності.

Стан системи при об'ємному стиску пов'язують з першим законом термодинаміки (1.14).

Компресійні характеристики використовують для розрахунків процесів, в яких продукт піддається дії тиску в замкнутому об'ємі та для оцінки якості пружно - пластичних продуктів.

2.2.2 Розрахункові рівняння процесу стиску

При розрахунку технологічних процесів, пов'язаних з деформуванням продукту внаслідок їх стиску, необхідно знати змінення геометричних характеристик зразків. Змінення форми залежить від фізико – механічних властивостей продукту, а також від його опору зусиллям, які прикладаються. Тому головна задача інженерного розрахунку процесу стиску продукту – визначення відносної об'ємної деформації пластично – в'язких тіл з урахуванням їх пружно - пластичних властивостей [21].

В ідеальному випадку при прикладенні напружень до зразку за всіма напрямками (всебічний стиск), коли матеріал є суцільним середовищем, загальну об'ємну деформацію визначають як суму її проєкцій на вісі координат:

$$\varepsilon_V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z. \quad (2.20)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ визначають з наступних залежностей:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= (1/E)[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], & \varepsilon_y &= (1/E)[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ \varepsilon_z &= (1/E)[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)],\end{aligned}\quad (2.21)$$

де ν - коефіцієнт Пуассона; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - проекції загального напруження (тиску), яке прикладене до продукту, Па; E - модуль пружності 1 – го роду.

Після перетворень, отримали:

$$\varepsilon_V = [(1 - 2\nu)/E][\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z]. \quad (2.22)$$

Для випадку всебічного стиску ізотропного рідинообразного пластично – в'язкого тіла, коли $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p$, рівняння (2.22) приймає вигляд:

$$\varepsilon_V = -3(1 - 2\nu)p/E, \quad (2.23)$$

де p - гідростатичний тиск, Па.

Значення відносної об'ємної деформації може також бути визначене за формулою:

$$\varepsilon_V = -p/E_V, \quad (2.24)$$

де E_V - об'ємний модуль пружності, Па.

Знак «мінус» у формулах (2.23) та (2.24) характеризує зменшення об'єму продукту при стиску. Залежність між модулем пружності 1 – роду та об'ємним модулем пружності:

$$E_V = E/[3(1 - 2\nu)]. \quad (2.25)$$

Застосування вище наведених рівнянь у розрахунках об'ємної деформації для пластично – в'язких м'ясних продуктів у ряді випадків обмежена. Це пов'язане з тим, що ці середовища окрім їх анізотропності (неоднаковості фізико – механічних властивостей у мікро – та макрооб'ємах) є у більшості своєї капілярно – пористими тілами і на початкової стадії деформування (стиску) не задовольняють умові

суцільності. Наприклад, при стиску у замкнутому об'ємі ковбасного фаршу мають місце залишкові деформації та релаксація напружень при постійному об'ємі. Це явище може бути викликане різними причинами, серед яких найбільш важливі – усунення защемленого повітря, пластичні локальні деформації у місцях пор та каналів, пластична деформація волокон. З частковим урахуванням реалій об'ємний модуль пружності у розрахункових залежностях можна замінити величиною уявного об'ємного модуля за наступною формулою:

$$E'_V = E_V \left(1 + \sqrt{1 + 2p/E_V}\right) / 2. \quad (2.26)$$

Більш повно враховує конкретні властивості продукту при розрахунку відносної об'ємної деформації кінетичне рівняння:

$$\varepsilon_V = b_\varepsilon p^{b_1} (1 + b_2 \lg \tau), \quad (2.27)$$

де b_ε , b_1 , b_2 - емпіричні коефіцієнти, величина яких залежить від фізико – хімічних, біохімічних та інших характеристик пластично – в'язкого продукту (таблиця 2.2).

Аналіз рівняння (2.27) показує, що у початковий момент часу об'ємна деформація дорівнює $\varepsilon_0 = b_\varepsilon p^{b_1}$.

Подальший розвиток деформації (в основному пластичної) у часі враховується коефіцієнтом b_2 . Рівняння (2.27) розкриває кінетику процесу деформування продукту при стиску, його можна з великою долею достовірності використовувати при практичних розрахунках.

Це рівняння дає позитивні результати розрахунку, якщо емпіричні коефіцієнти, які входять до нього, визначенні для продукту достатньо точно.

Важливу роль в оцінці реологічних властивостей при стиску пластично – в'язких матеріалів грають релаксаційні параметри, які дозволяють оцінювати течію процесу дефор-

Таблиця 2.2 – значення коефіцієнтів до рівняння (2.27)

Продукт	$b_\varepsilon \cdot 10^4$	b_1	b_2
Яловичина I сорту	5,2	0,32	0,058
Фарш:			
Чайної ковбаси	5,2	0,32	0,014
Докторської ковбаси	4,8	0,32	0,014
Фарш для сосисок	4,6	0,32	0,0092

мування та розподілення напружень по об'єму зразку. Процес релаксації (пружної післядії) включає вирівнювання напружень по всьому об'єму продуктів (релаксація напружень) та згасання швидкості формозмінення (релаксація деформації). Ці процеси відбуваються протягом часу та оцінюються періодами релаксації. За своєю суттю ці характеристики є фізико – механічними параметрами, які визначають механічні властивості даного пластично – в'язкого тіла. Один з методів визначення впливу явища релаксації на процес стиску продукту базується на використанні рівняння стандартного лінійного тіла:

$$\sigma + \tau_{\varepsilon} (d\sigma/dt) = E_R [\varepsilon + t_{\sigma} (d\varepsilon/dt)] = E_R (\varepsilon + t_{\sigma} \dot{\varepsilon}), \quad (2.28)$$

де σ - напруження деформації, Па; t_{ε} - період релаксації напруження при постійній деформації, с; $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$ - градієнт швидкості змінення напруження, Па·с⁻¹; E_R - рівноважний релаксаційний модуль, який визначається співвідношенням між пружними та пластичними характеристиками продукту, Па; ε - відносна лінійна деформація; t_{σ} - період релаксації деформації при постійному напруженні, с; $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ - швидкість змінення деформації, с.

Питання для самоконтролю

1. Що визначають компресійні властивості продукту?
2. Які характеристики відносяться до компресійних?
3. Яке рівняння є основним для розрахунків, пов'язаних з визначенням енергії деформації та величини деформації?
4. Яке явище враховується коефіцієнтом бокового тиску?
5. Що таке щільність і як вона визначається?
6. За допомогою якого коефіцієнту розраховують щільність рідинообразних систем при змінній температурі?
7. Які види деформації можуть виникати при прикладенні напруження до пластично – в'язких продуктів?
8. Для розрахунків яких технологічних процесів обробки харчових мас використовують компресійні характеристики?
9. Яка головна задача інженерного розрахунку процесу стиску продукту?
10. Що дозволяють оцінювати релаксаційні параметри?

2.3 Поверхневі властивості та основні закономірності взаємодії продуктів та матеріалу, з яким вони контактують

У процесі технологічної обробки харчові матеріали знаходяться у контакті з поверхнями робочих органів машин, транспортувальних пристроїв і т. д. Характер течії маси по каналах машин, а також по трубопроводах визначається як її структурно – механічними властивостями, так і зусиллями зчеплення з поверхнями контакту. Поверхневі властивості характеризують зусилля взаємодії між поверхнями конструкційного матеріалу та продуктом при нормальному відриві або зсуві. Для більшості продуктів харчової промисловості липкість (адгезія) обумовлює величину зусилля зовнішнього тертя. Характеристики поверхневих властивостей продуктів використовують для розробки нових матеріалів та наукового обґрунтування їх вибору для виготовлення обладнання. До поверхневих властивостей відносяться адгезійні (липкість) та фрикційні (коефіцієнт зовнішнього тертя).

Адгезійні характеристики використовують для оцінки якості продукції в процесі її виготовлення. Адгезія – це злипання однорідних твердих або рідинних тіл, які стикаються своїми поверхнями. Чисельно адгезія визначається як зусилля P_0 (Па), що приходить на одиницю площі поверхні F_0 (м^2), тобто питома сила, при якій відбувається відрив пластин з відповідного матеріалу від продукту: $p_0 = P_0/F_0$. Питома сила спрямована діє по нормалі до поверхні.

Відрив може бути трьох видів: адгезійний – по границі контакту, когезійний – по шару продукту та адгезійно – когезійний, тобто змішаний, який у виробництві зветься липкістю. Для пояснення адгезії існує декілька теорій: адсорбційна, електрична, електромагнітна, дифузійна, хімічна та інші [6].

По адсорбційній теорії адгезія матеріалів відбувається у результаті міжмолекулярної взаємодії притягання молекул. Відповідно цієї теорії при контакті двох тіл внаслідок макроброунівського руху виникає перегрупування молекул таким чином, що великі молекули маси, наближаючись до поверхні контакту, встановлюють водневий зв'язок з такими ж молекулами або полімерними групами контактуючого тіла. Після цього встановлюється адсорбційна рівновага. Підвищення тиску та температури матеріалів сприяє більш швидкому встановленню такої рівноваги у місті контакту.

Дифузійна теорія базується на тому, що при контакті двох тіл

відбувається взаємна дифузія молекул з довгими ланцюгами або їх окремих ділянок та утворення зв'язків. Дифузія буде тим інтенсивніше, чим більш тривалий контакт та більше контактне напруження.

Електрична теорія базується на явищі контактної електризації при тісному зіткненні двох діелектриків або діелектрика та металу. При порушенні контакту відбувається явище, яке подібне розсуванню обкладень конденсатора, на них з'являється різність потенціалів. Взаємодія електричних полів поверхонь заважає їх розсуванню.

Хімічна теорія пояснює адгезію деяких матеріалів тим, що у місці контакту відбувається хімічна взаємодія контактуючих матеріалів. У результаті цього на поверхні металу утворюється молекулярний шар іншої речовини – продукту реакції взаємодії двох тіл. Прошарок цієї речовини хімічно пов'язаний з одним та іншим тілом та є ланкою, яка пов'язує їх. Таким чином, адгезія залежить від хімічної активності тіл, які контактують.

В деяких випадках для двох – або багатofазних систем встановити границю руйнування важко. Поверхня пластини після відриву може бути змочена дисперсійним середовищем, або на поверхні може знаходитися тонка плівка тонкодисперсної фракції продукту [35].

У явищі адгезії приймають участь цілий ряд механізмів на молекулярному та надмолекулярному рівнях. Для практичних цілей достатньо описати загальні макроскопічні закономірності явища. Для цього проводять розрахунки на заздалегідь обраної моделі, яка являє собою зразок «складної рідини» між двома жорсткими циліндричними пластинами; вона володіє однаковою з продуктом адгезією [77, 79]. Математично процес відриву пластини від продукту описується рівнянням:

$$1/\rho_0 = h/2\alpha + C/w_c . \quad (2.29)$$

де ρ_0 (Па) – адгезія; h - товщина шару продукту між пластинами (м); α - коефіцієнт, аналогічний коефіцієнту поверхневого натягу, Н/м; C - коефіцієнт пропорційності, який залежить від складу продукту, активності груп, що знаходяться у контакті, розміру часток; m^2/c ; w_c - швидкість збільшення сили відриву, Н/с, яка означає відношення поточного значення сили до часу її дії.

Рівняння 2.29 добре описує адгезійну взаємодію концентрованих дисперсних систем. При проектуванні та створенні машин необхідно

враховувати явище адгезії, щоб правильно обирати матеріал деталей та покриття, встановлювати оптимальний режим роботи.

Зовнішнє тертя харчових продуктів залежить від липкості та інших факторів. Тертя може бути статичним – до початку зміщення та динамічним – при русі продукту вздовж поверхні. Експерименти підтвердили застосування двочленного рівняння Б.В. Дерягіна [16] для визначення сили тертя:

$$P_{\text{ТЕР}} = \mu(P_{\text{к}} + P_0) \text{ або } p_{\text{ТЕР}} = \mu(p_{\text{к}} + p_0), \quad (2.30)$$

де $P_{\text{ТЕР}}$, $p_{\text{ТЕР}}$ - сила та питома сила (напруження) тертя; $P_{\text{к}}$, $p_{\text{к}}$ - сила і тиск нормального контакту; P_0 , p_0 - зусилля нормального відриву та адгезія (прилипання) продукту до твердої поверхні; μ - справжній коефіцієнт зовнішнього тертя.

Іноді зручніше оперувати ефективним коефіцієнтом зовнішнього тертя:

$$\mu_{\text{ЕФ}} = P_{\text{ТЕР}} / P_{\text{к}} = p_{\text{ТЕР}} / p_{\text{к}}, \quad (2.31)$$

який пов'язаний з справжнім коефіцієнтом тертя наступним чином:

$$\mu_{\text{ЕФ}} = \mu \left(1 + \frac{P_0}{P_{\text{к}}} \right). \quad (2.32)$$

Для теоретичного обґрунтування зовнішнього тертя запропоновані молекулярно – кінетична, механічна, фізична та інші теорії, які аналогічні теоріям, що пояснюють адгезію.

Питання для самоконтролю

1. Що характеризують поверхневі властивості?
2. Які характеристики відносяться до поверхневих властивостей?
3. Які існують види відриву поверхонь, що контактують?
4. Які теорії існують для пояснення адгезії і в чому їх суть?
5. Що таке статичне тертя, а що таке динамічне тертя?
6. Які теорії застосовують для теоретичного обґрунтування зовнішнього тертя?

Розділ 3

МЕТОДИ ТА ПРИБОРИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

3.1 Методи визначення дисперсності продуктів

Універсального методу, придатного для будь-яких речовин, не існує. Розрізняють наступні методи виміру дисперсності продуктів: ситовий; седиментаційний; мікроскопічний; гістологічний; механіко-мікроскопічний. Відомі також оптичні, електромагнітні та електрометричні методи.

За допомогою ситового та седиментаційного методів можна визначити інтегральні характеристики дисперсного складу, які дають уявлення про розміри деякої сукупності часток. Для здобуття диференціальних характеристик використовують мікроскопічний та гістологічний методи. За допомогою цих методів можна визначити лише орієнтовне значення середньоарифметичного розміру часток. Проте завдяки ним можна вивчити мікроскопічну будову продуктів, взаємодію їх окремих елементів, тобто їх структурну сітку. Ці методи мають велике практичне значення в організації виробничих процесів, не дивлячись на їх тривалість і складність. Інтенсифікація виробництва зумовила необхідність розробки нових методів аналізу, які могли б прискорити і полегшити процес виміру. Визначення міри подрібнення харчових продуктів ускладнюється тим, що вони мають неоднорідну структуру та хімічний склад, різні розміри і форми часток, які утворюються при подрібненні, різну здатність останніх до набухання. Нижче розглянуті методи аналізу, їх переваги і недоліки.

Ситовий метод. Ситовий метод аналізу полягає в послідовному просіюванні проби речовини через набір сит із спеціально підібраним діаметром отворів і у визначенні процентного вмісту залишку від всієї проби на кожному ситі. Мінімальний розмір отворів, що встанов-

лює нижню границю застосовності способу, складає близько (40...60) 10^{-6} м. При цьому слід зазначити, що визначення дисперсного складу часток, розмір яких відповідає нижньої границі, надзвичайно складне із-за зростання адгезійних сил та утворення агломератів з часток.

Це приводить до необхідності протирання проби речовини через сито, що створює великі погрішності вимірів. Вживання прецизійних сит з отворами розміром до $5 \cdot 10^{-6}$ м розширило можливості методу. Гарантована точність сит складає $2 \cdot 10^{-6}$ м від номінального розміру. Проте аналіз найдрібніших фракцій речовини з розмірам часток $5 \cdot 10^{-6}$ м за допомогою прецизійних сит можливий лише у разі розподілу часток у рідкому середовищі. Це обмежує клас речовин, які піддаються аналізу, оскільки частки при цьому не повинні взаємодіяти з рідким середовищем та виявляти схильності до злипання.

До основних переваг ситового аналізу відноситься простота обладнання та техніки проведення експерименту. До недоліків слід віднести невисоку точність, що пояснюється відмінністю форми частки від кулястої, а також стиранням та агломерацією часток в процесі розсіювання; обмеженість діапазону вимірів; значну тривалість аналізу, яка збільшується із зменшенням розміру часток; зростання трудомісткості при аналізі найдрібніших часток, викликане закупоркою отворів, замазуванням сит та утворенням грудок, а також осіданням дрібніших часток на стінках сит; неможливість використання в автоматичних системах контролю.

Різновидність ситового методу — фільтраційний метод, який полягає в пропусканні порції речовини через пористі матеріали-фільтри та визначенні концентрації твердих часток у рідині або масі осаду на фільтрі після його висушування або спалювання.

Седиментаційний метод. Розроблений метод седиментаційного аналізу в гравітаційному полі, за допомогою якого визначають розмір аналізованих часток в інтервалі (1...100) 10^{-6} м. Цей метод, який широко використовується в науковій та виробничій практиці, заснований на залежності швидкості осадження однорідних часток у в'язкому середовищі від їх розмірів. Метод седиментаційного аналізу застосовують при наявності рідкого середовища. Його не можна використовувати для визначення розмірів часток, які взаємодіють з дисперсійним середовищем. Метод седиментаційного аналізу — інтегральний, тобто дозволяє отримати характеристику дисперсності речовини за даними про деяку сукупність часток. Відповідно до закону Стоксу швидкість осідання часток пропорційна квадрату їх розмірів:

$$\omega = d^2 g (\rho_{тв} - \rho_p) / (18\eta), \quad (3.1)$$

де ω — швидкість осідання часток, м/с; d — діаметр часток, м;
 g — прискорення вільного падіння м/с²; $\rho_{тв}$, ρ_p — щільність відповідно часток і середовища, кг/м³; η — динамічний коефіцієнт в'язкості, Па с.

За швидкістю осадження розраховують середній діаметр аналізованих часток. Не дивлячись на переваги методу седиментаційного аналізу (простота проведення аналізу, широкий діапазон його вживання), результати аналізу неточні. Це викликане допущеннями, зробленими при виведенні рівняння Стоксу. Значну погрішність може викликати температурна помилка, оскільки при зміні температури на 10°C в'язкість змінюється на 25...30 %, що істотно позначається на швидкості осідання часток.

Мікроскопічний та гістологічний методи. Для вирішення ряду завдань потрібна інформація про геометричні розміри кожної частки окремо. У зв'язку з цим широкий розвиток та вживання отримали диференціальні методи визначення дисперсності. До них слід віднести мікроскопічний метод, заснований на візуальному рахунку та вимірі розмірів часток. Визначення дисперсного складу речовини за допомогою мікроскопа має досить добре розроблену теорію та широку практику. Нижня границя розділення здатності мікроскопа зі звичайною оптикою знаходиться в межах $5 \cdot 10^{-7}$ м, а із застосуванням електронної — 10^{-9} м. Метод аналізу з використанням мікроскопу досить простий для тіл, які мають правильну форму. Визначення розмірів часток неправильної форми значно складніше: розміри часток вимірюють в одному напрямі з розбиттям на рядки.

Для полегшення та прискорення аналізу використовують різні рахункові машини, причому частки мають бути розміщені в одній площині у вигляді індивідуальних зерен. Вживання напівавтоматичних установок збільшило швидкість аналізу до 1000 часток у годину.

Мікроскопічний метод гранулометричного аналізу досить трудомісткий. До його недоліків слід віднести наступне: умовність виміру розмірів часток, які мають неправильну форму; можливість визначення дисперсного складу фракції лише по розмірах; недостатність інформації про розміри частки (грунтується на даних по одному, а в кращому разі по двох вимірах). Крокком вперед в удосконаленні мік-

роскопічного методу є розробка та створення автоматичних аналізаторів з використанням мікроскопа для сканування, фотоелементів і фотопомножувача. У основу методу покладена залежність інтенсивності світлового потоку від розмірів частки, що потрапляє в зону, утворену джерелом світла та фоточутливим елементом.

Не дивлячись на переваги, метод має недоліки: велика вартість і значна складність установки; неможливість вживання методу для аналізу неоднорідних часток; значні помилки від збігів часток; складність приготування препарату для сканування часток з великим діапазоном розмірів у результаті агломерації і прояву когезійних, адгезійних та поверхневих сил; значні погрішності аналізу речовин, розміри часток яких змінюються в межах $(1...100) \cdot 10^{-6}$ м, оскільки глибина різкості мікроскопу залишає не менш 10^{-6} м, окрім того, інформація про розміри формується на основі одного або двох вимірів, що вносить помилку при аналізі часток складної форми. Це обмежує вживання методу в науково-технічній практиці. При мікроскопічному дослідженні м'яса з відібраних об'єктів готують гістологічний препарат, який включає наступні операції: підготовку досліджуваного зразка, фіксацію, промивання, заливку об'єкту парафіном або желатином, різання, забарвлення та розташування препарату в бальзам та желатин.

Механіко - мікроскопічний метод визначення міри подрібнення сировини заснований на обліку середніх розмірів часток шляхом розбиття їх на розмірні класи та розрахунку ефективного діаметру. При цьому використаний метод варіаційної статистики, який дозволяє знайти ефективний діаметр часток:

$$d_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} N_i d_i^2}{\sum_{i=1}^{i=n} N_i}}, \quad (3.2)$$

де d_i — діаметр часток; n — загальне число розмірних класів; N_i — число часток сировини діаметром d_i ; i — відповідний розмірний клас.

Середньоарифметичний лінійний розмір часток

$$L = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} N_i d_i}{\sum_{i=1}^{i=n} N_i}. \quad (3.3)$$

Середньоквадратичне відхилення розміру часток:

$$g = \sqrt{d_E^2 - L^2} . \quad (3.4)$$

Коефіцієнт неоднорідності складу часток, по котрому можна судити про якість подрібнення продукту

$$K = g/L, \quad (3.5)$$

де K — коефіцієнт неоднорідності складу часток.

Міру подрібнення сировини визначають на основі даного методу за допомогою приладу, вимірювальна частина якого є електронним мостом КСМ-2. Робочим органом служить пінцет - датчик зі змінним дротяним опором. Опір змінюється пропорційно величині розлучення пінцета - датчика. Змінний дротяний опір включений в одне з плечей урівноваженого моста. При зміні розлучення пінцета – датчика порушується рівноважний стан моста. Сигнал розбалансу поступає через підсилювач на реверсивний двигун, переміщаючи движок реохорда до встановлення рівноваги. Шкала електронного урівноваженого моста розділена на десять контактних груп. Кожен контакт відповідає певному розмірному класу часток. Одночасно з движком реохорду переміщується механізм з контактом, який ковзає та веде запис. Він замикає ланцюг одного з десятих лічильників, який реєструє певний клас часток після включення ланцюга живлення. Ланцюг живлення лічильників складається із знижувального трансформатора та випрямляча, зібраного за мостовою схемою на діодах і ємкості, що фільтрує. У момент реєстрації пінцетом - датчиком розміру часток натискають кнопку, яка замикає ланцюг живлення лічильника імпульсів певного розмірного класу та сумарний лічильник. Прилад дозволяє вимірювати частинки зі середнім діаметром від $1 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ м з десятьма розмірними класами.

Оптичні методи. Окрім мікроскопічного є такі оптичні методи аналізу, які не пов'язані з необхідністю вживання мікроскопу. Розробка цих методів заснована на вивченні закономірностей виміру параметрів світлового потоку в результаті взаємодії первинної (падаючою) хвилі з вторинними хвилями, які виникають під дією часток. Якщо порівняти первинну хвилю з вторинною, то зміни, що сталися, залежать від числа, геометричних розмірів та оптичних властивостей часток. Ці зміни будуть визначатися мірою послаблення амплітуди

первинної світлової хвилі, величиною вторинного випромінювання часток, змінами частоти вторинної хвилі в порівнянні з первинною та просторовій орієнтації світлової хвилі для речовин, дисперсна фаза яких володіє поляризаційними властивостями. Вивчення цих чинників послужило основою створення турбодиметричного, нефелометричного, фотолюмінісцентного та поляризаційного методів аналізу. Оптичні методи аналізу використовують в харчовій промисловості для визначення концентрації однорідних монодисперсних часток речовин, розмір яких не перевищує $10 \cdot 10^{-6}$ м. Можливість вживання цих методів для визначення дисперсного складу полідисперсних систем є предметом їх подальшого вивчення.

Електромагнітні методи. У зв'язку з тим, що у ряді випадків потрібні тривимірні дані, а оптичні методи дозволяють визначити лише еквівалентний діаметр частки, виникла необхідність в розробці диференціальних методів аналізу об'ємної гранулометрії. До них відносяться електромагнітні методи дисперсного аналізу, засновані на взаємодії електромагнітного поля з аналізованою речовиною. Різноманітності електромагнітних методів — електроімпульсний та електромеханічний. До переваг електромагнітних методів відносяться швидкість та автоматизація виміру. Ці методи мають наступні недоліки: вони застосовні для аналізу лише порошкоподібних провідних або напівпровідних часток; значний сигнал перешкод як результат мікрокоронування в період, коли перезарядка часток закінчена, а контакт з електродом не порушений; значні погрішності методу внаслідок зіткнення часток та мікроіскрінь.

Методи електрометрії. Першою спробою використання методів електрометрії в харчовій промисловості вважається створення автоматичних аналізаторів концентрації вологи. Вони задовольняють наступним вимогам гранулометричного аналізу: забезпечення високої точності та швидкості аналізу; можливість аналізу харчової продукції в потоці; досить широкий діапазон виміру; можливість аналізу різних за своїми електрофізичним властивостям часток; абсолютна нешкідливість для обслуговуючого персоналу; використання пристроїв в автоматизованих системах. Методи електрометрії аналізу підрозділяються на індивідуальні, кондуктометричні та ємкісні. Найбільш вивчений кондуктометричний метод дисперсного аналізу, який базується на залежності електропровідності гетерогенної системи від електрофізичних та геометричних параметрів дисперсної фази. На відміну від однорідних речовин, електропровідність яких залежить лише від

їх хімічного складу, електропровідність дисперсних речовин, які є гетерогенними системами, є функцією електрофізичних властивостей речовин. Існують пристрої з кондуктометричним датчиком для визначення кількості та розмірів часток, що знаходяться в електроліті. До переваг наведеного вище методу відносяться: використання в широкому діапазоні розмірів часток $(0,3...800) \cdot 10^{-6}$ м; пропорційність амплітуди імпульсу сигналу об'єму частки; висока швидкість обліку та виміру; здатність визначати нікчемні кількості часток, недоступні іншим методам; можливість автоматизації процесу аналізу.

Поряд з перевагами кондуктометричний метод має недоліки, які знижують точність результатів аналізу: температурна помилка (до 10% і більш), яка виникає внаслідок залежності питомого опору від температури; помилки із-за перемішування речовини та скорочення тривалості аналізу; значне розбавлення електроліту для зменшення концентрації часток в одиниці об'єму; необхідність підбору електроліту з певними електрофізичними властивостями. Кондуктометричний метод не застосовний для аналізу часток, що взаємодіють з електролітом, до яких належать багато продуктів розпилювальної сушки, помелу і т. д. Тому з'являється необхідність в розробці ємкісного методу, який не має цих недоліків. Як дисперсійне середовище можна використовувати газ, який не реагує з дисперсними частками харчових продуктів, а гранулометричний склад визначиться в результаті аналізу електронних параметрів вимірювального конденсатора при попаданні кожної частки в міжелектродний простір. Розроблені концентраціометри, які визначають концентрацію твердої фази та рідини від 20 до 100 кг/м³ з максимальною погрішністю не більше 2 % діапазону шкали.

Таким чином, методи електрометричного визначення дисперсності харчових продуктів є перспективними, але потрібні додаткові дослідження, теоретичні та конструкторські розробки.

Питання для самоконтролю

1. В чому полягає ситовий метод аналізу дисперсності продуктів, які він має переваги і недоліки?
2. Що визначають за допомогою седиментаційного аналізу?
3. Яку інформацію о структурі продукту отримують за допомогою мікроскопічного методу?

4. На чому заснований механіко - мікроскопічний метод аналізу дисперсності продуктів?

5. Які методи аналізу розроблені на основі оптичних методів аналізу дисперсності продуктів:

6. Які методи аналізу відносяться до диференціальних методів аналізу об'ємної гранулометрії?

7. На якому принципі базується кондуктометричний метод дисперсного аналізу?

3.2 Класифікація методів та приборів для вимірювання структурно – механічних характеристик

Виходячи з основних завдань, які стоять перед промисловістю (здобуття і обґрунтування раціональних і оптимальних технологічних показників при виробництві харчових продуктів та розробка приборів для їх контролю і регулювання на різних стадіях обробки), прилади можна підрозділити на наступні три групи: **універсальні** - для науково-дослідних цілей, що дозволяють визначити комплекс структурно-механічних характеристик, з яких вибирають величину, найбільш чутливу до конкретних технологічних умов. Ці прилади в основному стаціонарні, зазвичай громіздкі, металоемні та дорогі; **виробничі** — для поетапного контролю консистенції і якості, що дозволяють експрес-методом контролювати вибрану найбільш чутливу характеристику на кожному технологічному етапі; **безперервнодіючі** (автоматичні) - для безперервного контролю і регулювання технологічного процесу з оперативним зворотнім зв'язком з оброблювальною машиною в цілях здобуття продукту з заданими стабільними характеристиками.

Прибори для вимірювання зсувних, компресійних, поверхневих властивостей мають свою специфіку. Але загальними будуть наступні, не враховуючи температури та технологічних характеристик, чотири змінні: сила, момент або напруження; відстань, деформація, площа або об'єм; час, швидкість деформації або лінійна швидкість; енергія [13]. Відповідно цьому механічні вимірювальні прибори містять пристрої для реєстрації зусиль, деформацій, часу; енергія розраховується за цими показниками, або вимірюється приборами.

За видом вимірюваної величини реологічні прибори поділяють на чотири групи, як наведено в таблиці 3.1. Ця класифікація у визначеній ступені умовна, оскільки деякі прибори дозволяють варіювати дві величини при постійній третій.

Таблиця 3.1 – Класифікація методів вимірювання реологічних характеристик

Величина, яка вимірюється	Постійні величини	Приклад прибору
Динамічна (сила, момент, напруження)	Геометричні, кінематичні	Віскозиметр «Реотест»; Універсальний прибор ВНДІМПа; зсувомір Сімоняна
Кінематична (час, швидкість)	Динамічні, геометричні	Віскозиметри: РВ – 8, Освальда, Уббелоде, Гепплера
Геометричні (довжина, площа, об'єм)	Динамічні, кінематичні (час)	Пенетрометри (конічний пластомер КП – 3 та інші)
Енергія (потужність)	Геометричні, кінематичні	Фарінограф Бранбендера, прибор Большакова – Фоміна; прибори, які дають діаграму сила - відстань

Перші два методи отримали найбільше розповсюдження, особливо у віскозиметрії. Перший метод – постійної швидкості зсуву – реалізується шляхом застосування електромеханічного або гідравлічного приводів, сила вимірюється різними динамометрами. Другий метод – метод постійного навантаження – конструктивно значно простіший, оскільки швидкість переміщення або обертання легко вимірювати секундоміром або записувати на діаграмній стрічці. При третьому методі вимірювання постійна сила навантаження обумовлена незмінною масою рухомої частини прибору, час вимірювання постійний (180-300 с) та приймається декілька більшим, ніж період релаксації. В приборах вимірюють глибину занурення при швидкості, яка зменшується та в границі досягає нуля. Четвертий метод дозволяє за площею діаграми визначити енергію деформування, а ордината на діаграмі показує зусилля. Окрім того, в приборах цієї групи енергія може бути розрахована за потужністю.

В деяких випадках вимірювання структурно – механічних характеристик одного продукту різними способами дає неоднакові результати. Спосіб вимірювання характеризується визначеними геометричними, кінематичними та динамічними параметрами прибору та умовами проведення досліду при постійних початкових технологічних показниках продукту. Наведені параметри та умови обумовлені теоретичними положеннями, які не завжди можуть бути коректно ураховані. При ретельно науково розробленої методиці експерименту величини, які вимірюються, повинні мати однакові значення незалежно від способів вимірювання.

Класифікація віскозиметрів наведена на рисунку 3.1. Найбільше розповсюдження в дослідженнях харчових продуктів отримали наступні віскозиметри: ротаційні, капілярні, зі спадною кулькою.

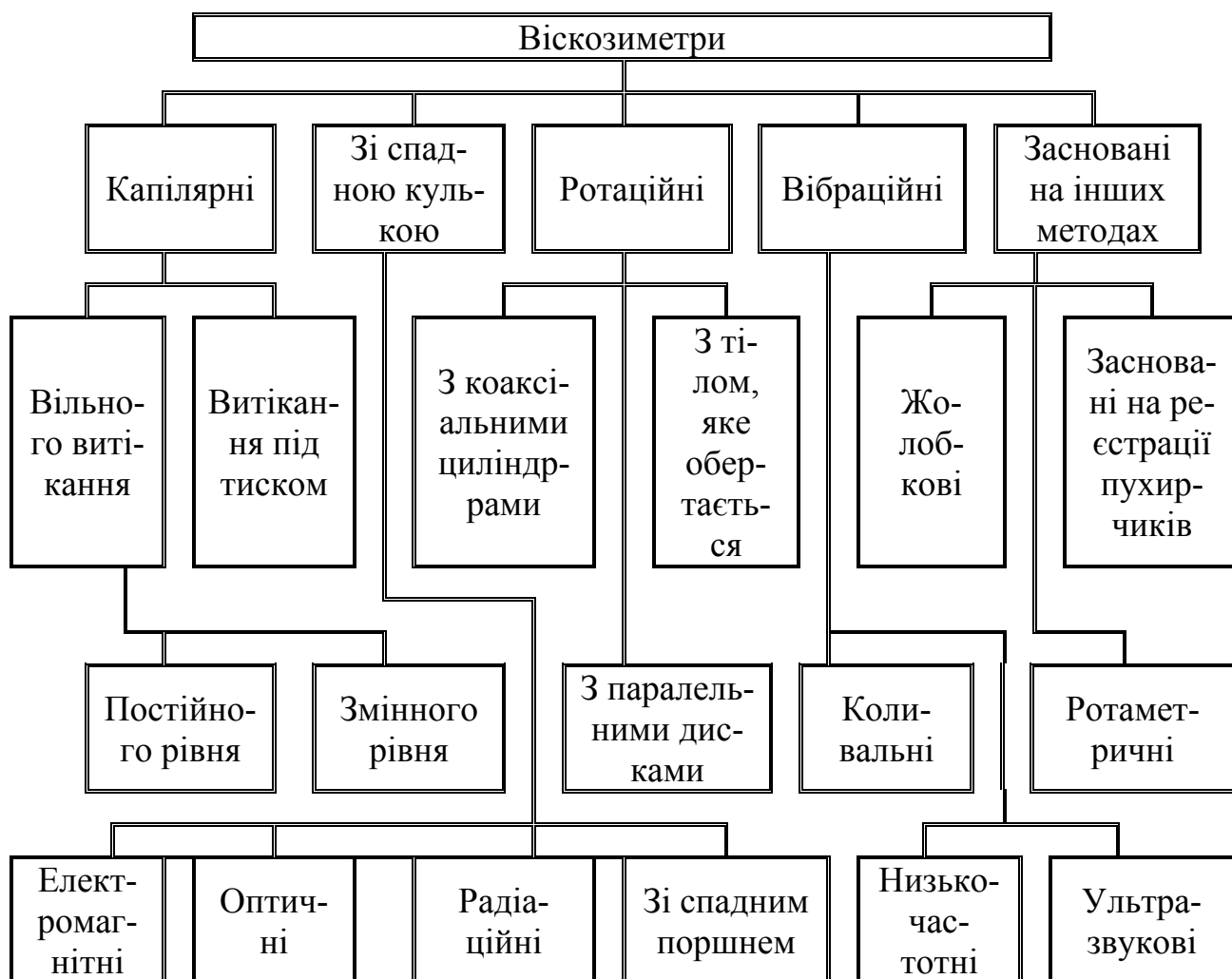


Рисунок 3.1 – Класифікація віскозиметрів

Питання для самоконтролю

1. Чи дозволяють вимірювання з використанням універсальних приборів визначити комплекс структурно-механічних характеристик для визначення величини, найбільш чутливої до конкретних технологічних умов?

2. Який тип приборів дозволяє експрес-методом контролювати найбільш чутливу характеристику на кожному технологічному етапі?

3. За допомогою яких приборів здійснюється контроль і регулювання технологічного процесу в цілях здобуття продукту з заданими стабільними характеристиками?

4. Як поділяються механічні вимірювальні прилади за видом вимірюваної величини?

5. Які бувають типи віскозиметрів?

3.3 Методи та прилади для вимірювання характеристик зсуву

Властивості зсуву проявляються при дотичному зміщенні шарів продукту. Прилади для вимірювання зазначених властивостей за принципом дії поділяються на наступні групи: ротаційні, капілярні, пенетрометри, прилади з плоскопаралельним зміщенням пластин та інші. Основною передумовою наукового обґрунтування та об'єктивності отриманих даних на ротаційних та капілярних віскозиметрах є відсутність турбулізації потоку.

При роботі на капілярних віскозиметрах критерій Рейнольдса не повинен перевищувати 150 [13], при русі кульки в рідині, ламінарний режим спостерігається при значеннях критерію Рейнольдса менш 0,2.

3.3.1 Ротаційні віскозиметри

Ротаційні віскозиметри володіють рядом переваг у порівнянні з іншими. Докладний огляд приборів, які розглядаються наведеній у книзі [12], в якій також наведені основи теорії. На ряду з багатьма перевагами ротаційних віскозиметрів в порівняннями з іншими типами виникають труднощі, які викликає тепловиділення в шарі маси, що при дослідженнях знаходиться в узькому кільцевому зазорі. Тому необхідно проводити експеримент, при якому виділення теплоти свідомо дуже мале, або користуватися методами перерахунку експериментальних даних з урахуванням тепловиділення. Принципові схеми ротаційних віскозиметрів наведені на рисунку 3.2.

Вони можуть мати одну геометричну форму: коаксіальні циліндри (схема а), сфери або півсфери (схема б), два конуси (схема в), дві плоскопаралельні пластини (схема г), два плоских кільця (схема д), два конічних кільця (схема к).

Робочий зазор або робочий орган може бути комбінованим, тобто складатися з двох різних поверхонь: циліндр – диск (схема е), циліндр – півсфера (схема ж), конус – диск (схема з), циліндр – конус (схема и), циліндр – конус – диск (схема л). Між робочими поверхнями знаходиться продукт, що досліджується, сила опору всередині якого при обертанні однієї з поверхонь вимірюється. Момент опору

можна вимірювати двома способами: на поверхні, що обертається, тоді другу поверхню закріплюють жорстко, і обертаючи одну поверхню, тоді інша з'єднується з динамометром.

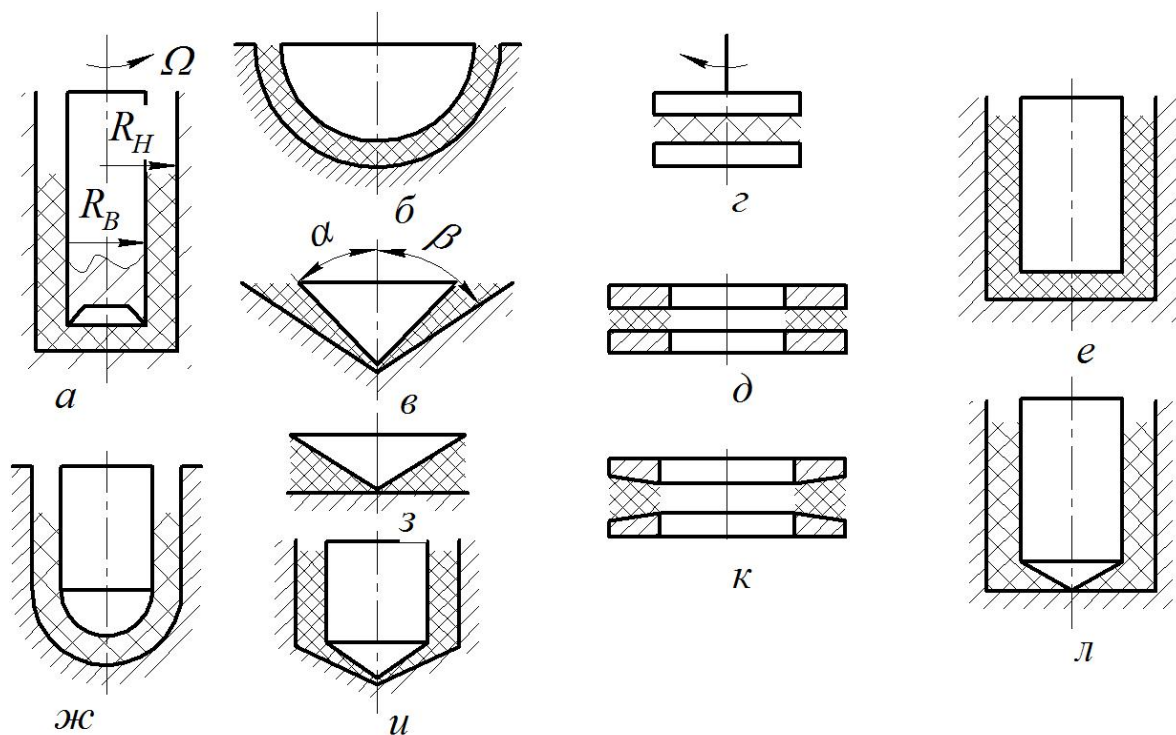


Рисунок 3.2 – Принципові схеми ротаційних віскозиметрів

Найбільше поширення в харчовій промисловості отримали коаксіально-циліндричні комбіновані поверхні для вимірювання характеристик в'язких і пластично-в'язких продуктів (рисунок 3.2, а, ж, л).

Відомі два основні варіанти приладу з коаксіальними циліндрами. У першому речовина міститься в циліндр, який приводиться у рівномірний обертальний рух. Підвішений на пружній нитці другий циліндр знаходиться коаксіальне з першим. В'язкість обчислюється за величиною швидкості обертання першого циліндру і за кутом повороту другого циліндру від його початкового положення. Цей метод застосовується для дослідження рідин та газів.

Другий варіант: зовнішній циліндр нерухомий, внутрішній закріплюється на осі, вмонтованій для зменшення тертя в кулькових підшипниках, і приводиться в обертання за допомогою падаючого вантажу. На ротаційних приборах отримують залежності крутних моментів від кутової швидкості обертання вимірювальної поверхні.

При дослідженні харчових мас часто застосовують **ротаційні віскозиметри РВ-4, РВ-7, РВ-8**, розроблені М. П. Воларовічем.

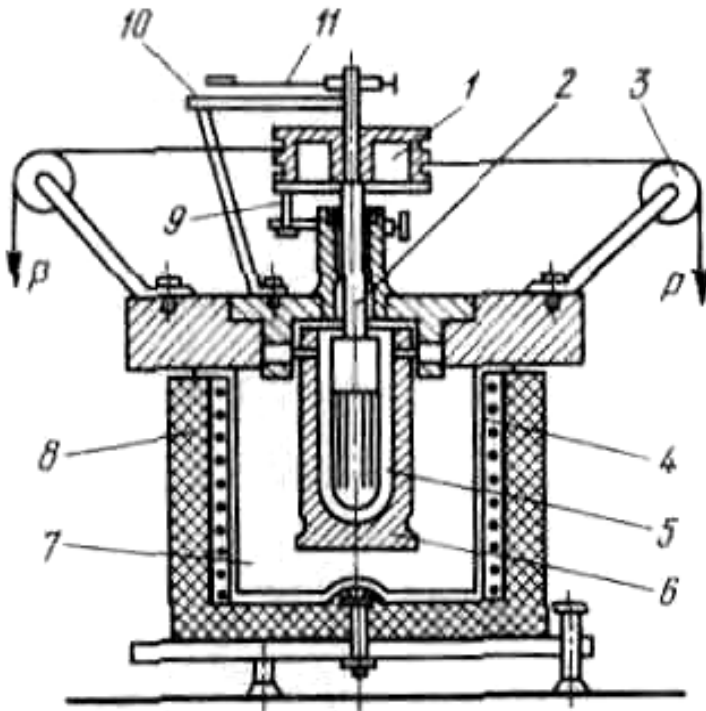


Рисунок 3.3 - Віскозиметр PV-8 системи М. П. Воларовіча:

1-шків, 2- вертикальний вал, 3 - перекидні блоки, 4- електронагрівальні елементи, 5-ротор, 6-стакан, 7 - судини для термостатування, 8 - теплоізоляція, 9-стопор, 10 – нерухома шкала, 11-стрілка

M - маса вантажів, обертаючих ротор, кг (за відніманням величини, яка компенсує тертя в підшипниках); N - частота обертання ротора, об/с; M_0 - маса вантажів, при якій починається зрушення, кг.

Постійні у наведених формулах визначають по залежностям, в які входить поправка на сферичний торець ротора:

$$K = \frac{gR_{шк}}{g\pi^2 \left(\frac{R_n^2 R_g^2}{R_n^2 - R_g^2} h + \frac{R_n^3 R_g^3}{R_n^3 - R_g^3} \right)}; \quad K = \frac{gR_{шк}}{2\pi R_g^2 (h + R_g / 4)}, \quad (3.7)$$

На рисунку 3.3 зображена схема віскозиметра PV-8.

Для випадку, коли зсув поширюється на всю товщину маси, розташованої між двома циліндрами, М. П. Воларовічем запропоновані формули для визначення ефективної в'язкості η_{ef} (Па·с) та граничного напруження зсуву θ_0 (Па) за моделлю Шведова-Бінгама:

$$\eta_{ef} = KM / N, \quad \theta_0 = K_0 M_0, \quad (3.6)$$

де K та K_0 - константи приладу, які залежать від його розмірів і висоти, на яку завантажується продукт, $m^{-1} \cdot s^{-2}$;

де $R_{шк}$ - радіус шківа, м ($R_{шк}=0,02235$ м); R_n - внутрішній радіус склянки, м ($R_n=0,019$ м); $R_г$ - радіус ротора, м ($R_г=0,01605$ м); h - глибина занурення ротора в продукт, м; g - прискорення вільного падіння, м/с².

В дужках дані розміри деталей РВ-8; для різних випусків приладу можливі деякі зміни розмірів.

Для, комбінованих поверхонь, які вимірюють, наприклад для півсфери-циліндричної, константу в'язкості K можна вважати по циліндричній поверхні:

$$K = \frac{gR_{шк}}{8\pi^2 \frac{R_n^2 R_г^2}{R_n^2 - R_г^2} h_{np}}, \quad (3.8)$$

де $h_{np} = h + h_{екв}$; $h_{екв} = (R_г + R_n)/3$.

При співвідношенні радіусів 0,7 та більше загальна помилка при визначенні константи по наближеному значенню еквівалентної довжини не перевищує 0,5% [13].

Для дослідження структурно-механічних властивостей при підвищених тисках в МТИММПе на базі віскозиметра РВ-4 (рисунок 3.4, позиції 1, 2, 3) сконструйований вимірювальний вузол (позиції 4-10).

Розміри віскозиметру: діаметр ротора 32 мм, внутрішній діаметр стакана 38 мм. Вимірювальний вузол відрізняється від РВ-4 тим, що стакан (статор) нерухомий, обертається рифлений ротор, який виточений разом з хвостовиком з однієї заготовки. Тиск в склянці створюється вгвинчуванням поршня, котрий закріплений з пружною мембраною і манометром для вимірювання тиску. У робочому зазорі тиск вимірюється тензодатчиками.

Ротаційний віскозиметр РМ-1 зображений на рисунку 3.5. На основі встановлені робоча камера і опорний вузол. В середині камери запресована рифлена втулка 19 ($R_г=22 \cdot 10^{-3}$ м), яка усуває можливість проковзування продукту. Змінний ротор 8 [$R_г=(10; 12,5; 15; 18) \cdot 10^{-3}$ м, $h=0,05$ м] встановлений на приводному валику. Тиск в масі створюється за допомогою поршня з кільцями ущільнювачів. Реєстрація надмірного тиску здійснюється тензометричними датчиками.

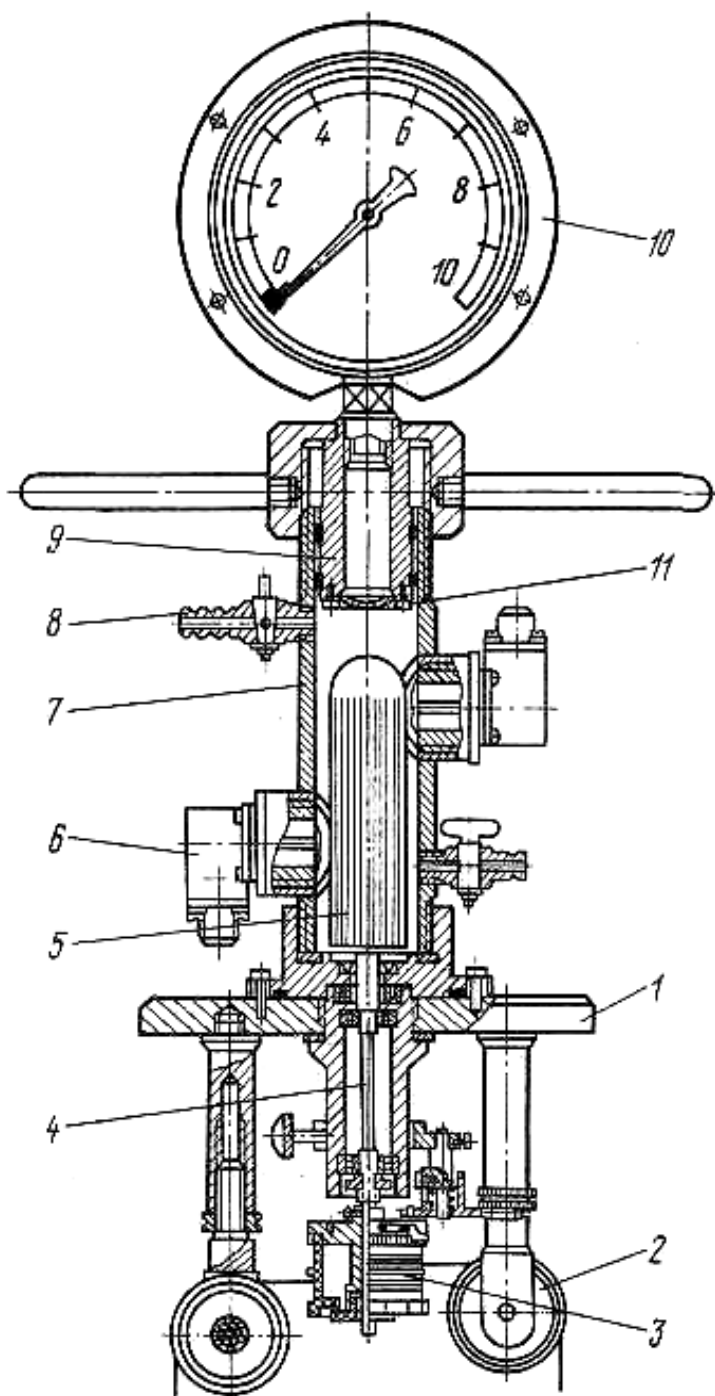


Рисунок 3.4 - Ротаційний віскозиметр МТІММПа для вимірювання реологічних властивостей при підвищеному тиску: 1 – станина; 2 - перекидні блоки; 3 - шків; 4 - хвостовик ротора; 5 – ротор; 6-тензодатчики тиску; 7 - стакан; 8 - краник для видалення надлишків продукту; 9 - поршень; 10 – манометр; 11 - мембрана для виміру тиску

Кут повороту ротора вимірюється фотоелектричним датчиком. Кутова швидкість реєструється самописним прибором. Обробка експериментальних даних проводиться за описаною вище методикою (поправка вводиться на дисковий торець).

Технічна характеристика: границі вимірювання — ефективна в'язкість 10^2 - 10^7 Па·с; напруження зсуву 10 - $4 \cdot 10^4$ Па; швидкість зсуву 0 - 100 s^{-1} ; надлишковий тиск 0 - $1 \cdot 10^5$ Па; габаритні розміри, м: $0,53 \times 0,255 \times 0,59$.

Для дослідження реологічних властивостей малов'язких харчових матеріалів під тиском або вакуумом створений **ротаційний віскозиметр РМ-2** (рисунок 3.6), який складається з зовнішнього нерухомого циліндру ($R_H = 0,03$ м) з сорочкою для підтримки необхідної температури і внутрішнього циліндру (ротора) ($R_B = 0,025$ м, $h = 0,09$ м), пов'язаного з валом вимірювального сельсина.

Обертання вимірювального сельсина відбу-

вається завдяки електромагнітному зв'язку з силовим сельсином, який жорстко через муфту пов'язаний з двигуном.

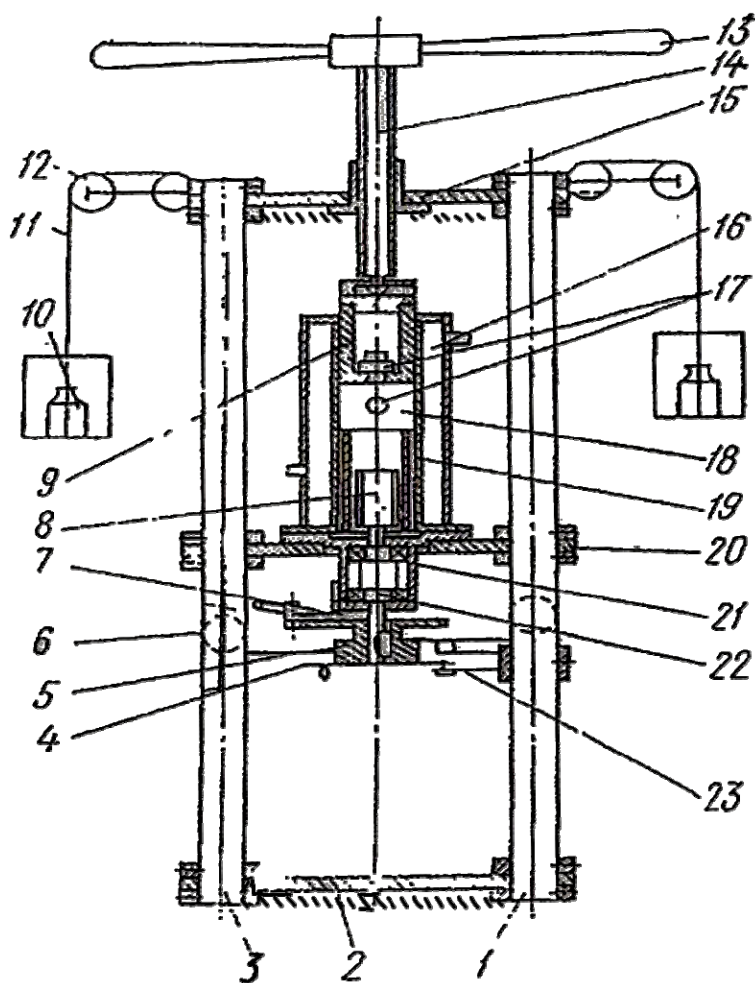


Рисунок 3.5 - Віскозиметр МТІПР РМ-1:

- 1 - стояк; 2 - плита;
- 3 - стояк; 4 - перфорований диск; 5 - шків;
- 6 - блок; 7 - фіксатор;
- 8 - ротор; 9 - поршень;
- 10 - вантаж; 11 - нить;
- 12 - блок; 13 - рукоятка;
- 14 - гвинт; 15 - плита;
- 16 - термостатична сорочка; 17 - тензометричні датчики тиску;
- 18 - робоча камера;
- 19 - рифлена втулка;
- 20 - основа; 21 - опорний вузол; 22 - приводний валик;
- 23 - кронштейн

Напруження, що виникає при гальмуванні вимірювального сельсина, пропорційно куту розузгодження сельсинів, тобто пропорційно моменту опору, прикладеному до внутрішнього циліндра від матеріалу, який досліджується, та знаходиться в зазорі між циліндрами 1 і 9.

Сигнал розузгодження поступає у вимірювальний блок 8. Вимірювальний сельсин кріпиться в кожусі, який герметично з'єднаний з зовнішнім циліндром. У герметичну камеру поступає стисле повітря або газ під тиском, які контролюються манометром. Якщо підключити камеру до вакууму, то можна створювати в ній розрідження.

Технічна характеристика: границі вимірювання - ефективна в'язкість $10 - 2 \cdot 10^2$ Па·с; напруження зсуву 5-50 Па; швидкість зсуву $0 - 100$ с⁻¹; габаритні розміри, м: 0,25x0,4x0,6.

На рисунку 3.7 наведена схема **віскозиметра системи В. П. Павлова**. Віскозиметр має постійну швидкість обертання, яка ступінча-

сте змінюється за допомогою коробки передач.

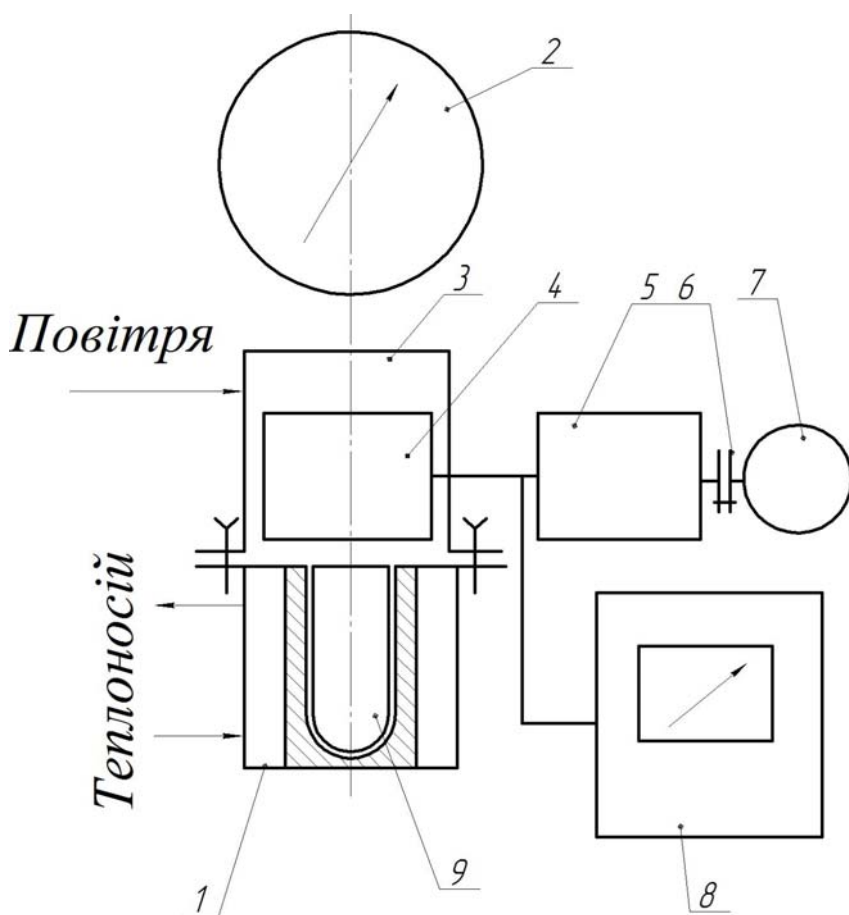


Рисунок 3.6 - Віскозиметр МТІППа РМ-2:

- 1 - зовнішній циліндр;
- 2 - манометр;
- 3 — герметичний кожух;
- 4 — вимірювальний сельсин;
- 5 — силовий сельсин;
- 6 - муфта;
- 7 - двигун;
- 8 – вимірювальний блок;
- 9 - внутрішній циліндр

Обертання від синхронного електродвигуна передається внутрішньому ротору віскозиметра. У зазор шириною 0,25 мм, утворений ротором та зовнішнім циліндром, подається за допомогою ручного преса маса, яка досліджується. Циліндр 3 за допомогою шестерні 4 пов'язаний з торсіонним дротяним підвісом 5. Напруження, яке створюється крутячим моментом, врівноважує напруження, що виникає в матеріалі, який деформується. Швидкість зсуву може змінюватися від 0,4 до 3000с^{-1} .

Серед приладів зарубіжних фірм представляють інтерес ротаційні віскозиметри «Реотест RV», «Реотест RN» виробництва Німеччини. Ротаційні віскозиметри «Реотест» призначені для визначення характеристик зсуву харчових продуктів в широкому діапазоні, зокрема для виміру в'язкості та граничного напруження зсуву для середньо та високов'язких продуктів.

Схема ротаційного віскозиметру «Реотест RV» наведена на рисунку 3.8. Віскозиметр має вимірювальний прилад, вимірювальну головку з ротором, що обертається, і термостатичну судину.

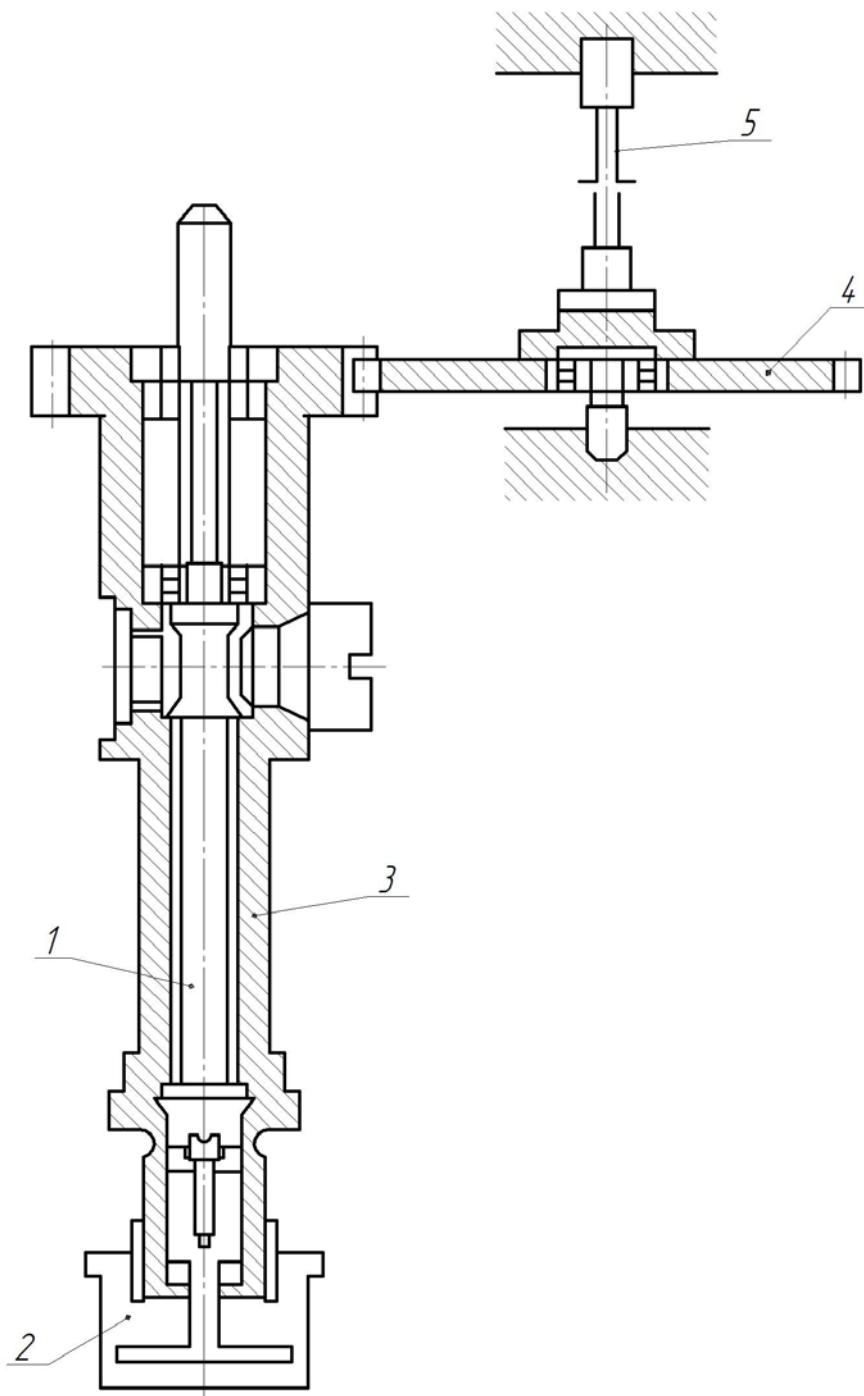


Рисунок 3.7 - Робоча головка віскозиметра
В. П. Павлова:

1 - внутрішній ротор; 2 - ручний прес; 3 - зовнішній циліндр; 4 - шестерня; 5 - торсіонний підвіс

від $0,1667$ до $1,458 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; напруження зсуву - від 12 до $1 \cdot 10^3 \text{ Па}$; температури - від -30 до $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рукоятка 15 служить для установки необхідної частоти обертання ротора. Зміна швидкості може проводитися, як при зупинці, так і під час роботи віскозиметру. Температура контролюється термометром. У приладі встановлений вимірник моментів торсіонного типу з омичними датчиками, який працює за принципом перетворення механічних зусиль в електричні імпульси. Показання приладу прямопропорційні крутячому моменту, напруженню зсуву та в'язкості матеріалу. Частота обертання синхронного електродвигуна і, отже, внутрішнього циліндра, залежить від напруги струму в мережі.

Характеристика приладу. Границі вимірювань: в'язкості - від 10^{-2} до $10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}$; швидкості зсуву -

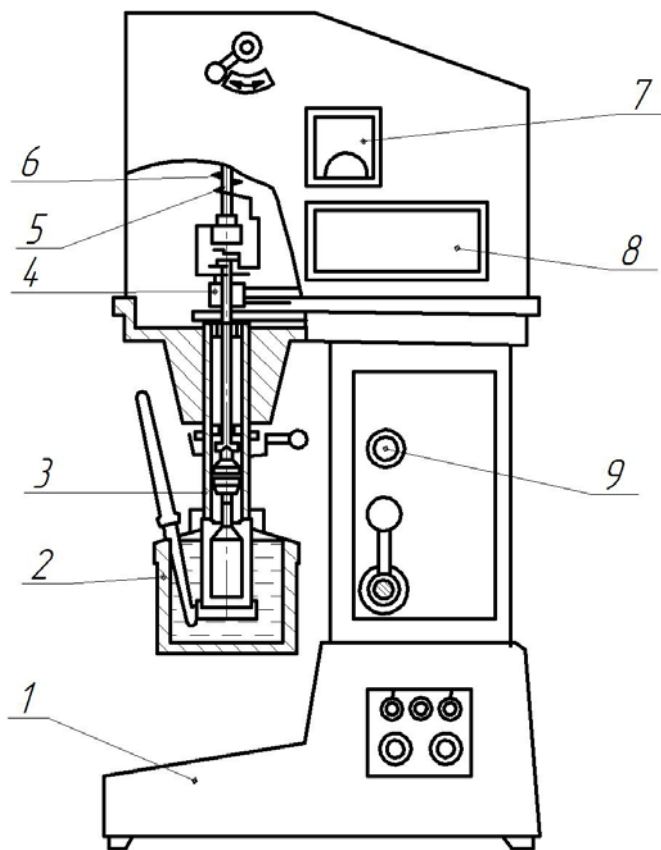


Рисунок 3.8 - Віскозиметр «Реотест RV»:

- 1 - станина; 2 - внутрішній циліндр;
 3 - зовнішній циліндр; 4 - відомий вал;
 5 - спіральна пружина; 6 - провідний вал;
 7 – вимірювач частоти;
 8 – вимірювач крутячого моменту;
 9 - показник швидкості

Для розширення діапазону вимірювання в'язкості віскозиметр «Реотест RN» (рисунок 3.9) має три вимірювальні системи, які складаються з двох вимірювальних циліндрів, що відрізняються розмірами радіусів та довжиною. Віскозиметр може застосовуватися при вільному зануренні ротора безпосередньо в судину з речовиною, яка вимірюється без нерухомого циліндра.

Технічна характеристика: границі вимірювання - в'язкість від 10^{-2} до 420 Па·с (включаючи застосування ротора, який вільно обертається), напруження 5,0 - 1500 Па; швидкість зсуву 5 - 492 с^{-1} ; частота обертання ротора 16, 40, 80 і 160 об/хв; температура від -30 до $+120^{\circ}\text{C}$; похибка (для ньютонівської рідини) – вимірювальні пристрої N і M: $\pm 3\%$; H: $\pm 5\%$; габаритні розміри зі штативом, м: 0,25x0,28x0,44.

Ротаційний віскозиметр Rheotest RN4.1 (рисунок 3.10) знаходить застосування в фундаментальних дослідженнях, при розробці нових видів продукції та технологій, а також при контролі якості. В дуже широкому діапазоні напружень та швидкостей зсуву автоматично знімаються криві в'язкості та текучості і здійснюється реологічний опис середовища. Реометр, який управляється персональним комп'ютером, дозволяє вимірювати також повзучість матеріалу. Завдяки широкому діапазону моментів обертання вимірювання можна проводити в широкому діапазоні однією системою вимірювання.

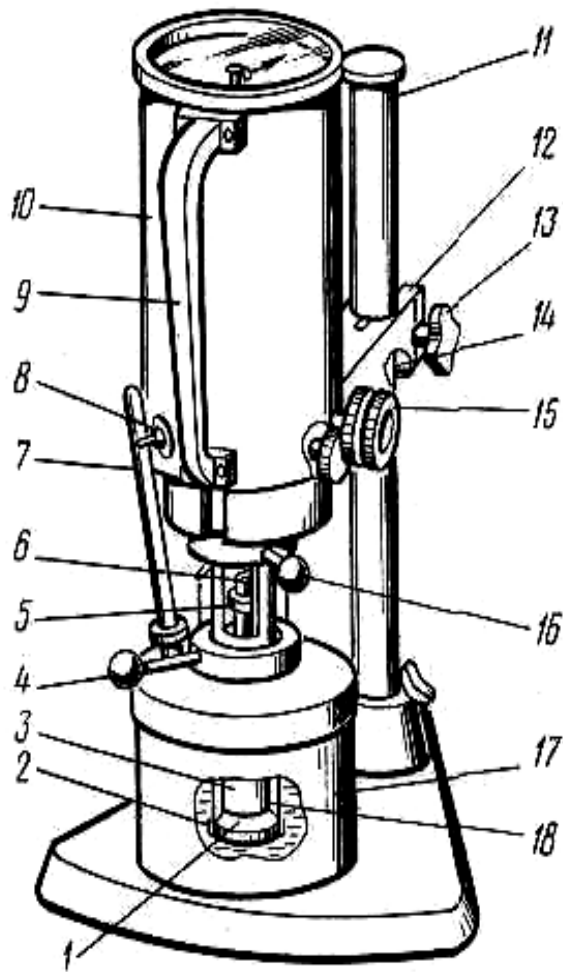


Рисунок 3.9 – Віскозиметр RN:
 1 - кришка; 2 - запірна гайка;
 3 – ротор, який обертається;
 4 - важіль; 5 - гайка; 6 - муфта;
 7 – термометр; 8 – вимикач;
 9 - рукоятка; 10 – вимірювальний
 прибор; 11 – штатив; 12 — крон-
 штейн; 13 – затискний гвинт;
 14 – упор; 15 - рукоятка змінення
 швидкості обертання; 16 – термо-
 статична судина; 17 – корпус;
 18 - нерухомий циліндр

в'язкість та параметр моделі К; для розчинів, дисперсій, паст та глазурі можливе описання функції текучості по моделі Кросса. Можливе описання функції текучості по моделі Карро, що є узагальненою функцією, за якою можна отримати інші залежності, наприклад, закон Де

Технічна характеристика.
 Момент обертання - від 0,1 до 150 мНм; похибка по моменту обертання - 0,002 мНм. Число обертів - від 0 до 1000 об/хв. Діапазон кута повороту - 50-300°. Похибка по куту обертання - 0,001°. Діапазон температур: від - 30 до +200°C. Частота - 0,001 ... 10 Гц. Напруга споживання - 230 В ±10%; 49 - 61 Гц; 110 В ±10%; 49 - 61 Гц. Вага: основний прибор - 13,5 кг; блок управління - 9,6 кг; вимірювальна система конус-пластина - 3,2 кг; вимірювальна система з циліндром - 1,5 кг; посуд для термостатування - 3,0 кг; кабель - 0,5 кг.

Отримані результати вимірювань можна обробляти по наступним законам текучості. Для ньютонівських речовин - по закону текучості Ньютона, отримують динамічну в'язкість.

Для неньютонівських речовин без границі текучості: по закону текучості Оствальда-де-Веле, отримують показник текучості n та коефіцієнт консистенції k ; якщо функція текучості представлена в широкому діапазоні градієнтів зсуву/напружень зсуву, можливе описання за моделлю Голуба, результатом обробки є початкова та кінцева

Хавен, використовуються також закони Райнера-Филипова та Метера.

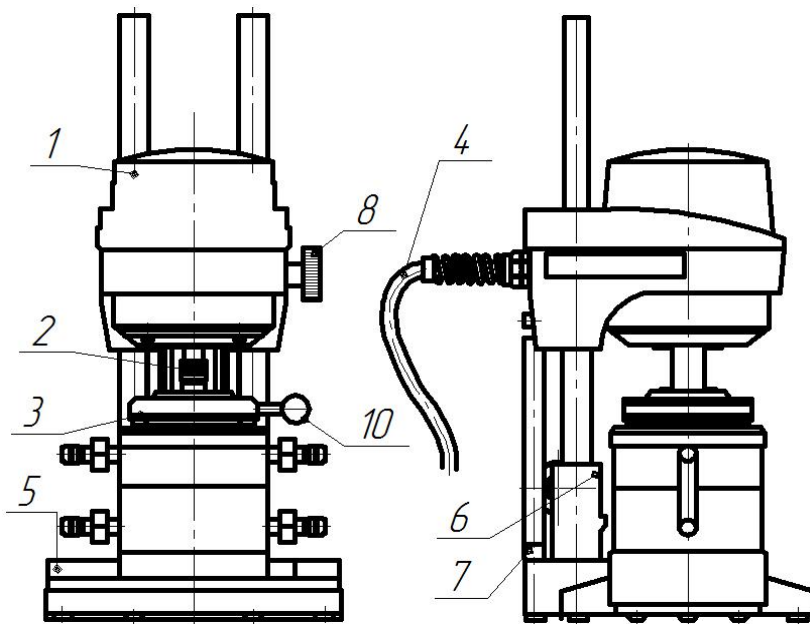


Рисунок 3.10 - Ротаційний віскозиметр Rheotest RN4.1

Для неньютоновських речовин з границею текучості використовують закони: результат обробки по закону Бінгама представляється у вигляді пластичної в'язкості та границі текучості; результат обробки по закону текучості Гершеля-Балклея наводиться у вигляді границі текучості, показника текучості та коефіцієнту консистенції; результат обробки по закону текучості Кас-

сона наводиться у вигляді границі текучості та в'язкості; результат обробки по закону текучості Кассона (загального) враховує границю текучості, в'язкості та показник ступеню кінетики руйнування структури.

Для реологічних досліджень застосують **віскозиметри** і **реометри** фірми **CONTRAVES** (Швейцарія) та **віскозиметри** типа **RHEOTRON** фірми **BRABENDER** (Німеччина). Великою популярністю у всьому світі користуються ротаційні **віскозиметри** фірми **BROOKFIELD** (США), що забезпечують вимір динамічної в'язкості в широкому діапазоні: від 10^{-3} Па·с до сотень тисяч. Існує великий набір додаткового обладнання (термокомірки, термостати, адаптери та ін.). Для виміру в'язкості при високому тиску і температурі в ємкостях і трубопроводах розроблені спеціальні моделі віскозиметрів.

У наукових і практичних дослідженнях широко поширені **віскозиметри VT6/VT7**, які є класичними ротаційними віскозиметрами, що вимірюють опір рідини при обертанні ротора із заданою швидкістю. Існує дві модифікації приладів: VT6/7L і VT6/7R, які відрізняються діапазоном в'язкості (для VT6/7L 3,0...2 000 000 мПа·с, для VT6/7R - 20... 13 000 000 мПа·с) та числом роторів (для VT6/7L чотири рото-

ра, для VT6/7R шість роторів).

Для контролю якості об'єктів та дослідницьких цілей розроблений **динамічний реометр RheoStress Rs600** з повітряними підшипниками. За допомогою даного приладу можна вимірювати в'язкість при заданій швидкості зрушення або дотичному напруженні, визначати границі текучості завданням наростаючого дотичного напруження, проводити тести на повзучість для контролю стабільності, а також динамічні виміри для визначення пружних властивостей матеріалів. Цей прилад дозволяє проводити виміри при вкрай малому напруженні та деформаціях.

Найбільшого поширення набули коаксиально - циліндрові віскозиметри з півсферичним днищем, за допомогою яких враховують вплив ефекту дна. З метою підвищення точності вимірів при визначенні комплексу структурно - механічних характеристик запропонований безконтактний електронний датчик КВД-25. На осі ротора окрім шківів додатково змонтований ініціатор, який забезпечує роботу лічильного пристрою і блоку сигнальних ламп.

Завдяки вживанню такої системи управління, приладом при проведенні вимірів час і задана частота обертання ротора реєструються автоматично з точністю до сотих долів секунди. Безконтактний датчик, виконаний за схемою генератор — тригер, повністю герметичний, має тривалий термін служби і є безінерційним при видачі імпульсу. Ці позитивні якості обумовлюють можливість вживання приладу у вологих приміщеннях при проведенні великого числа дослідів не лише з високов'язкими але і з малов'язкими середовищами.

Реометри Bohlin Gemini – це високотехнологічні модульні системи (рисунок 3.11), які використовують запатентовану адаптивну систему цифрового управління Rotonetic™, що забезпечує точне управління напруженням та деформацією.

Широкий динамічний діапазон моментів та швидкостей у поєднанні з неперевершеною чутливістю дозволяє за допомогою реометрів Bohlin Gemini аналізувати широкий круг матеріалів з високою точністю: від слабо-структурованих рідин з низькою в'язкістю до твердих речовин. Прилад має високий рівень конструктивного виконання та неперевершені експлуатаційні характеристики системи на повітряному підшипнику, безперервний діапазон крутячих моментів від 3 нНм до 200 мНм (модель Gemini HR Nano). Цифрове відображення величини крутячого моменту з високою ступеню точності забезпечує здобуття коректних даних, незалежних від положення ротора при ви-

користанні будь-яких режимів управління. В режимі осциляції з контрольованою відносною лінійною деформацією виробляється реєстрація деформації зразку і значно скорочується час проведення експерименту.



Рисунок 3.11 – Загальний вигляд реометра Bohlin Gemini

швидкості обертання в діапазоні 0,1...1500 об/хв і, як наслідок цього, здобуття в режимі реального часу безперервних реологічних кривих та значення граничного напруження зсуву. Прилад оснащується вбудованим термодатчиком, таймером, дані виводяться на дисплей. Вбудоване програмне забезпечення дозволяє аналізувати отримані реограми за законами Освальда, Бінгама та Кассона.

Технічна характеристика. Принцип вимірювання: ротаційний віскозиметр без використання пружини в вимірювальній системі. Діапазон швидкостей обертання: від 0,1 до 1500 об/хв. Діапазон моменту

Використання малоінерційного мотора з індукційною технологією дозволяє швидко виробляти установку положення або швидкості, виконувати високочутливі виміри малих деформацій та асиметричної нормальної сили. Просте у використанні програмне забезпечення дозволяє швидко створювати складні випробувальні протоколи і виконувати автоматичний аналіз.

Цифровий реометр RM 300 (рисунок 3.12) розроблений для проведення повномасштабних досліджень реологічних властивостей текучих об'єктів при низькій в'язкості та високих (до 100000с^{-1}) швидкостях зсуву, а також для використання з системами типу «конус-плита».

Головна перевага – це можливість плавної зміни

сили опору, який вимірюється: від 0 до 30 мН·м. Діапазон температур: від -20 до 120⁰С. Діапазон в'язкості: 1 мПа·с – 53 млн. мПа·с.



Рисунок 3.12 - Цифровий реометр RM 300

Додаткові можливості: контроль тривалості вимірювань таймером, що необхідно, наприклад, для тиксотропних зразків.

Серед приладів для визначення реологічних характеристик м'ясних продуктів важливе місце займають прилади, в яких параметри, що впливають на значення структурно-механічних властивостей, можуть варіюватися в широких межах. Вони дозволяють створити експериментальні умови, відповідні виробничим. Майже на всіх стадіях технологічного процесу на ковбасний фарш діє тиск або вакуум.

Дані, які виводяться на дисплей: температура, швидкість обертання, крутячий момент, в'язкість, час, напруження зсуву.

При проектуванні і розрахунку обладнання враховують параме-

три оброблюваного продукту, виміряні при тиску $1 \cdot 10^5$ Па. Продукт, що знаходиться під надлишковим тиском або вакуумом, володіє абсолютно іншими властивостями.

Віскозиметр для дослідження структурно-механічних властивостей ковбасного фаршу під тиском до 10^6 Па або під вакуумом, розроблений А. В. Горбатовим, В. Д. Косим і іншими авторами, має циліндр (рисунок 3.13), усередині якого на осі обертаються рифлений ротор та шків з отворами. Кожен з отворів відповідає певному куту повороту ротора. На стакані встановлені датчики виміру тиску, герметична конструкція яких дозволяє вмонтовувати їх у термостаті. Для створення тиску в циліндрі у верхній його частині знаходиться поршень з сальниками ущільнювачів та гумовою мембраною. Поршень опускається і піднімається за допомогою накидної гайки, що нагвинчується на стакан. Осьовий тиск фаршу в стакані вимірюють манометром, який встановлений всередині поршня. Для створення вакууму в циліндрі у верхній його частині змонтований патрубок.

Сальник, розташований в станині, запобігає попаданню фаршу в підшипники. Температура в термостаті підтримується регулювальником, датчиком якого служить термopара. Температура фаршу реєструється термopарою, встановленою в циліндрі. Простір між ротором та стінками циліндра заповнюють фаршем. При дослідженні його властивостей під тиском переміщається поршень за допомогою гайки до тих пір, доки датчики тиску середовища в усіх точках зазору не покажуть однакову задану величину.

Пристрій працює таким чином. Частоту обертання ротора вимірюють механічним пристосуванням (рисунок 3.14), а швидкість деформації фаршу — масою вантажу. З метою підвищення точності вимірів на даному приладі встановлюють пристрій КВД-25 для автоматичної фіксації частоти обертання ротора. Фарш з різними реологічними властивостями поміщають в стакан.

Властивості фаршу не впливають на значення сили тертя в підшипниках віскозиметру. Зі зменшенням граничного напруження зсуву до 50 Па фарш починає текти через ущільнення при тиску $(5 \dots 10) \cdot 10^5$ Па. Зі зростанням температури до 35 °С тертя зменшується, оскільки жир починає плавитися, і покращуються умови мастила. Маса вантажу, необхідна для подолання тертя, збільшується від 0,02 кг при тиску 10^5 Па до 0,09 кг при 10^6 Па. Залежність сили тертя у віскозиметрі від тиску і швидкості обертання апроксимується прямою. Різде збільшення сили тертя при підвищенні тиску пояснюється, імо-

вірно, зростанням граничного напруження зсуву фаршу.

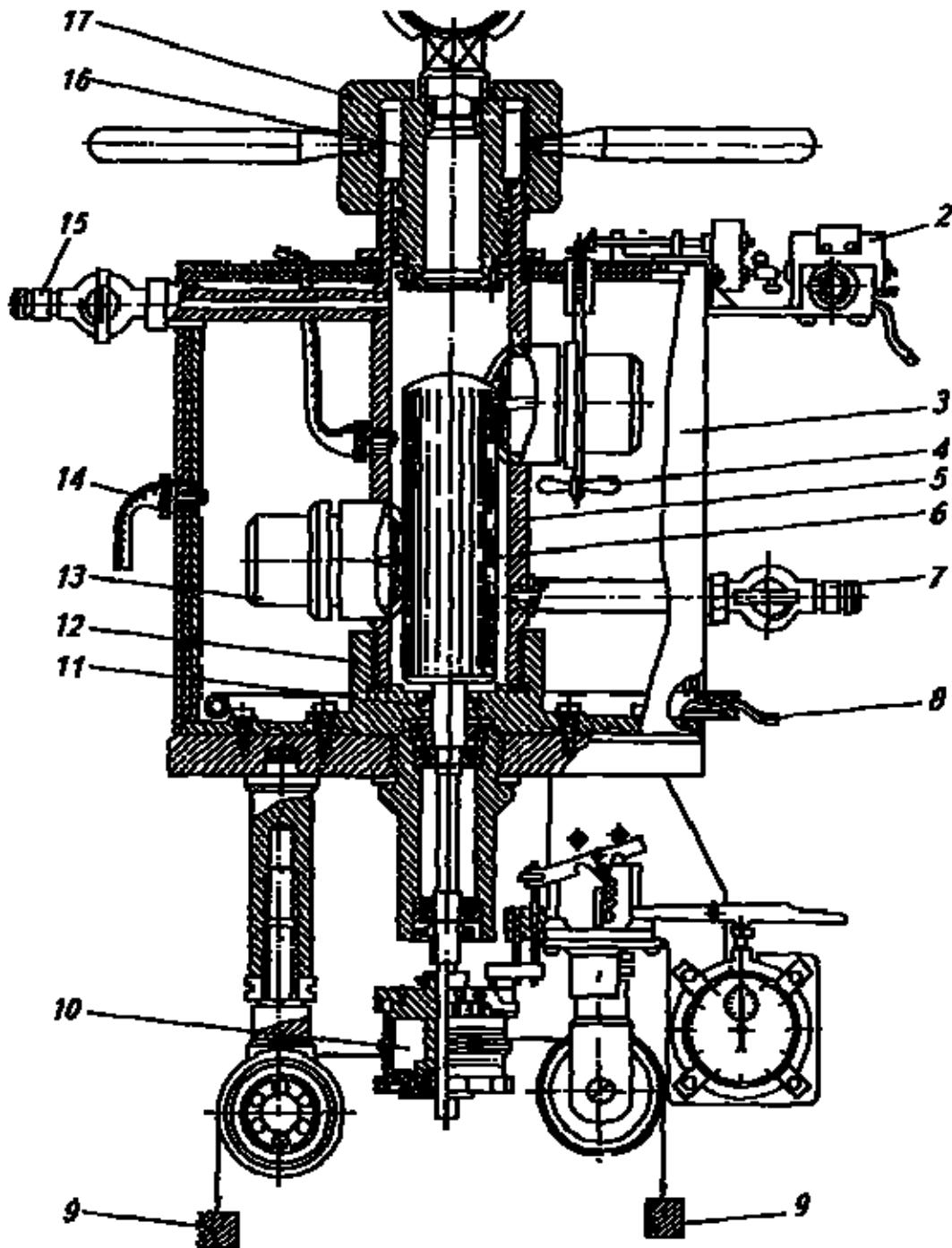


Рисунок 3.13 - Віскозиметр для дослідження структурно-механічних характеристик ковбасного фаршу:

- 1 — манометр; 2 — електропривод мішалки; 3 — термостат; 4 — мішалка; 5 — циліндр; 6 — ротор з віссю; 7 — кран для відбору проб; 8 — електронагрівач; 9 — вантажі; 10 — шків; 11 — сальник; 12 — станина; 13 — датчик тиску; 14 — термопара; 15 — кран для вакуум-системи; 16 — поршень; 17 — накидна гайка

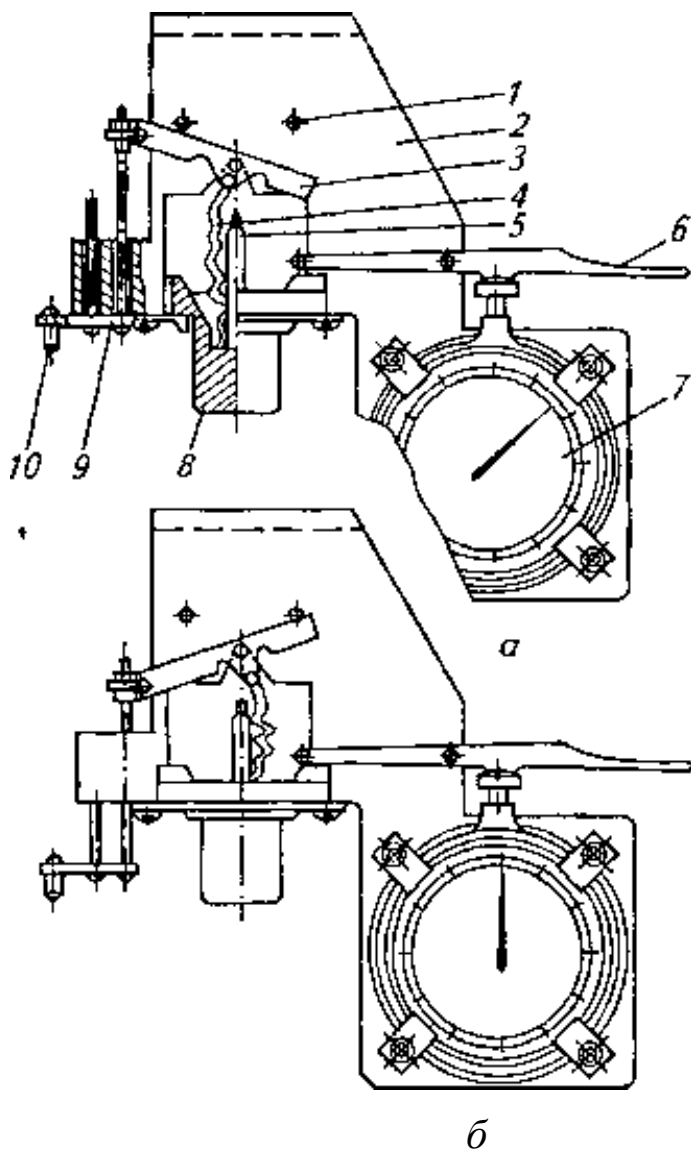


Рисунок 3.14 - Пристосування для здійснення обертання ротора та виміру кута його повороту в різні моменти:

- а — включення; б — виключення;
 1 — фіксатор; 2 — станина; 3 — коромисло;
 4 — пружини; 5, 6 — важілі;
 7 — секундомір; 8 — кнопка;
 9 — шток; 10 — штифт

швидкості. В цьому випадку важно правильно обрати частоту обертання ротора віскозиметра.

Портативні ротаційні віскозиметри УТ-181 і УТ-24 фірми НААКЕ (Німеччина) застосовують для швидких випробувань або досліджень на виробництві за строго постійних умов. Перетворювачем

Дослідження при тиску вище атмосферного проводять також за допомогою віскозиметру, запропонованого С. А. Мачихиним. Використання тензометричного датчика тиску і фотоелектричного методу реєстрації швидкості обертання ротора приводить до необхідності установки вторинного приладу (шлейфовий осцилограф з блоком живлення та підсилювачем), тому різко збільшуються габаритні розміри, вартість приладу і потрібна додаткова обробка результатів дослідження.

К виробничим приладам можна віднести прилади різного типу, що дозволяють експресом-методом вимірювати одну з характеристик якості і поетапно контролювати та регулювати технологічні процеси. Використовуючи ротаційні віскозиметри для оцінки якості продукту експресом-методом, вимірюють напруження зсуву або ефективну в'язкість при певному значенні градієнта

частоти змінюють частоту обертання ротора, а за допомогою електронного датчика підключають самописець.

Дві модифікації приладу розрізняються значеннями крутячого моменту та частоти обертання.

Таблиця 3.2 - Технічна характеристика ротаційних віскозиметрів фірми НААКЕ

Частота обертання ротора, с ⁻¹	УТ-181	УТ-24
ступінь 1	3,02	0,38
ступінь 4	0,75	0,095
Крутячий момент, Н·м	(0...1)10 ⁻²	(0...2,5) 10 ⁻²
Ділення шкали	0...150	0...300
Потужність, Вт	4	4
Маса, кг	1,7	1,7
Габаритні розміри, мм	0,46x0,15x0,34	

Модель УТ-181 призначена для вимірювання властивостей продуктів низької і середньої в'язкості, УТ-24 - продуктів середньою і високої в'язкості. У таблиці 3.2 наведені технічні характеристики цих віскозиметрів.

Питання для самоконтролю

1. Які існують принципові схеми ротаційних віскозиметрів?
2. Які поверхні для вимірювання характеристик в'язких і пластично-в'язких продуктів отримали найбільше поширення в харчовій промисловості?
3. Які два основні варіанти приладу з коаксіальними циліндрами відомі? Чим вони відрізняються?
4. Який принцип роботи ротаційних віскозиметрів РВ-4, РВ-7, РВ-8?
5. Яким чином створюється тиск в масі продукту в ротаційному віскозиметрі РМ-1?
6. Для дослідження реологічних властивостей яких харчових матеріалів та для яких умов призначений ротаційний віскозиметр РМ-2?
7. Для визначення характеристик зсуву яких харчових продуктів призначені ротаційні віскозиметри «Реотест»?
8. Скільки вимірювальних систем має віскозиметр «Реотест RN 4.1»? Чому цей віскозиметр дозволяє проводити вимірювання в широкому діапазоні однією системою вимірювання?
9. Які закони використовують при обробці експериментальних даних для неньютоновських речовин з границею текучості?
10. Для виміру якої характеристики маси продукту призначені

віскозиметри VT6/VT7?

11. Які типи матеріалів дозволяють досліджувати реометри Bohlin Gemini?

12. Для продуктів яких реологічних властивостей призначений цифровий реометр RM 300? Які він має додаткові можливості?

3.3.2 Віскозиметри капілярні і з падаючою кулькою

Принципові схеми капілярних віскозиметрів для ньютонівських та неньютонівських продуктів наведені на рисунку 3.15. Загальною для всіх приладів цього типу є наявність капіляру, пристрою для вимірювання витрати або об'єму рідини і системи, що забезпечує створення гідростатичного тиску. Як капіляр може бути використана трубка діаметром від долів міліметра до 2—3 мм для вимірювання в'язкості ньютонівських та малов'язких неньютонівських рідин.

Для неньютонівських рідин з вищою в'язкістю і пластично-в'язких систем діаметр капіляра може досягати декілька десятків міліметрів, а результати вимірювань часто залежать від діаметру, тобто неінваріантні. Діаметр капіляра входить в формули, теоретично отримані для відповідних моделей тіл.

Капілярні віскозиметри мають наступні переваги: у капілярі створюються більші швидкості зсуву у порівнянні зі швидкостями в зазорі ротаційних віскозиметрів; результати опитів не залежать від змінення температури маси, оскільки дисипація енергії практично відсутня внаслідок малого часу знаходження маси в капілярі. Але вимірювання на капілярних віскозиметрах потребує більш тривалого часу, ніж на ротаційних, внаслідок зміни і чистки капілярів.

Найбільш прості, традиційні і разом з тим **універсальні капілярні віскозиметри Оствальда** (рисунок 3.15, а) і **Уббелоде** (рисунок 3.15, б) мають капіляр та дві порожистих кульки для рідини. Рушійна сила процесу витікання - перепад тиску - у віскозиметрі Оствальда обумовлена різністю висот рідини, у віскозиметрі Уббелоде – вакуумом або тиском в одному коліні трубки.

Віскозиметр А. В. Горбатова, С. І. Суханової і ін. (рисунок 3.15, в) вбудовується в технологічний трубопровід для пластично-в'язких продуктів. При проходженні продукту через капіляр під дією сил внутрішнього тертя - напруження на стінці труби - відбувається його осьовий зсув, який реєструється датчиком переміщень та записується приладом. Внутрішня сила, яка викликає переміщення, ком-

пенсується пружинами або сільфонами, маючими різну жорсткість.

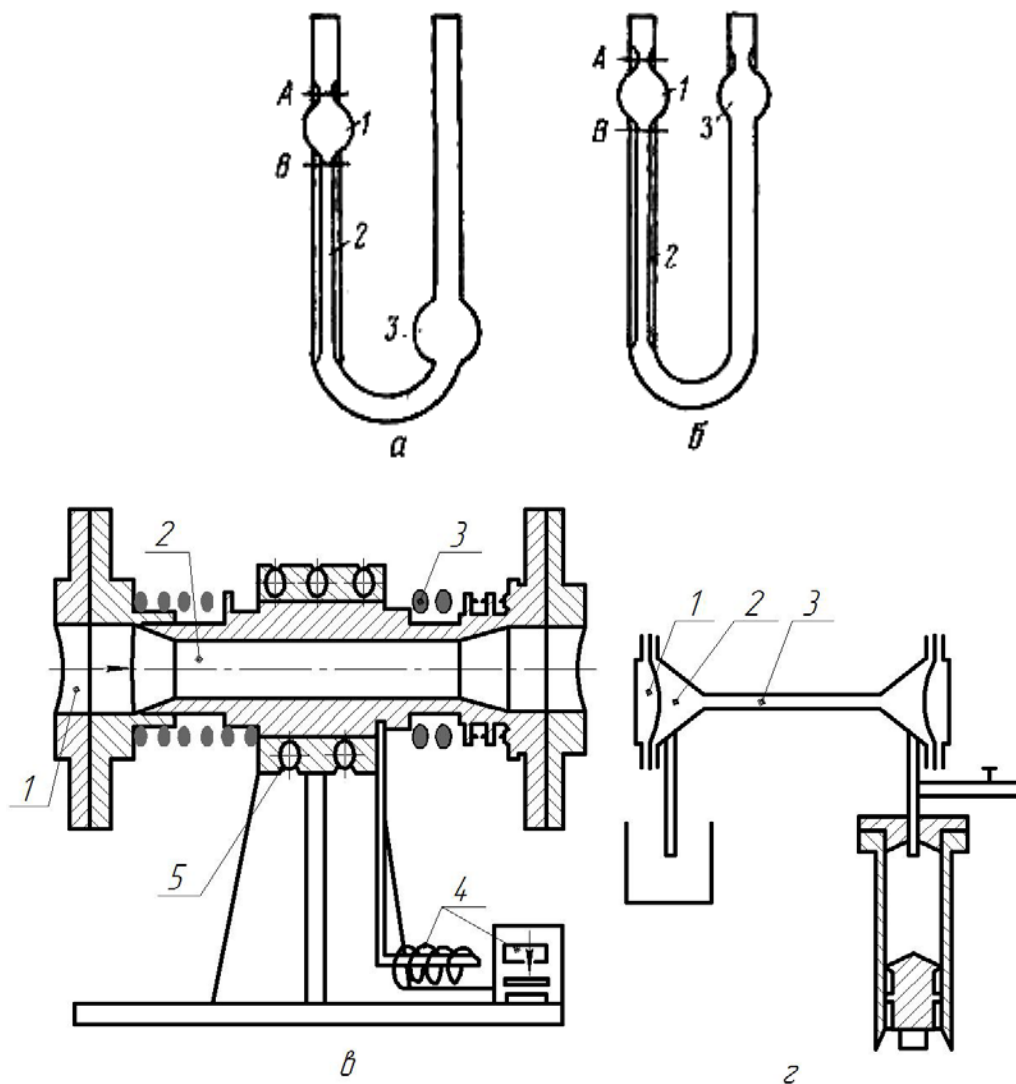


Рисунок 3.15 - Принципова схема капілярних віскозиметрів для в'язких рідиннообразних продуктів а - Оствальда; б — Уббелодє:

1 - куляка для вимірювання об'єму рідини, яка протікає через капіляр; 2 - капіляр; 3 - куляка для збору рідини для пластично-в'язких (неньютонівських) продуктів;

в - віскозиметр Горбатова, Суханової та інших: 1 — магістральний трубопровід; 2 - рухомий капіляр; 3 - пружні елементи (сільфони, пружини); 4 - індукційний датчик переміщення капіляра з реєструючим приладом; 5 - імпульсний підігрівач для видалення жирової плівки;

г - віскозиметр постійного витрачання Г. В. Віноградова та ін.: 1- буферний індикатор вимірювання перепаду тиску; 2 - мембрана; 3 - капіляр; 4 - циліндр з поршнем для продукту

Віскозиметр постійного тиску Г. В. Віноградова і ін. (рисунок 3.15, г) забезпечує протікання рідини по капіляру при постійному тиску, який забезпечує буферна рідина, відокремлена від досліджуваного продукту пружною мембраною. Продукт у капіляр подається з циліндра з поршнем.

Методи капілярної віскозиметрії знайшли широке застосування і при дослідженні реологічних властивостей високов'язких речовин. Теоретичні основи капілярної віскозиметрії для ньютонівських та неньютонівських рідин наведені в роботах Г. Барра, Б. Рабіновича, М. Муні, А. Метцнера і У. Ріда. Методики вимірювання і розрахунку властивостей зсуву для більшості приладів цього типу подібні.

Вимірювальний стенд (рисунок 3.16, а) складається з віскозиметра, який міститься у відкритій або герметичній судині, та ультра-термостата.

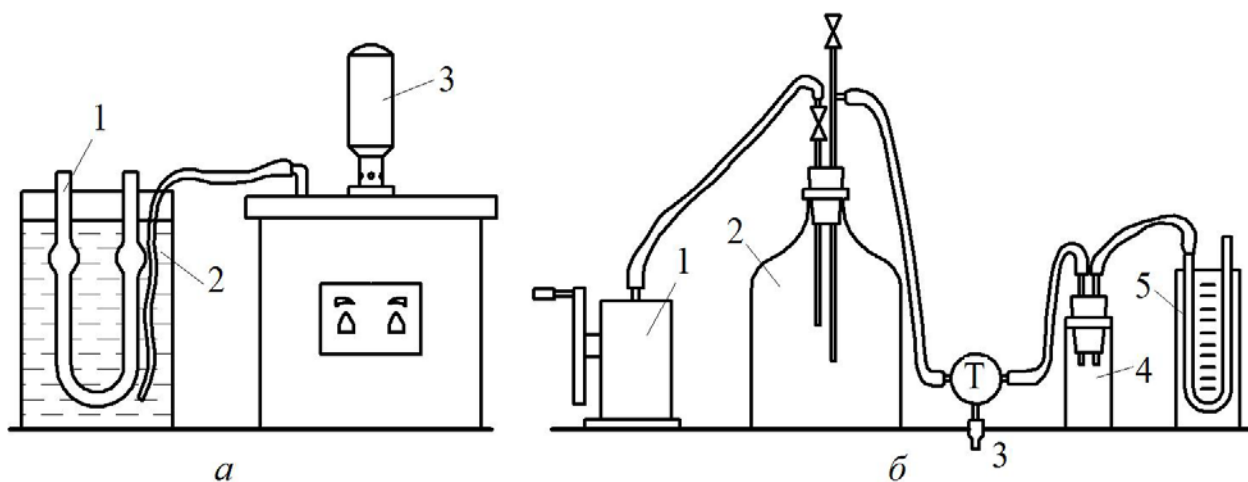


Рисунок 3.16 - Стенди для вимірювання в'язкості:

- а - при різних температурах: 1 - віскозиметр; 2 - судина для термостатуючої рідини; 3 - ультра-термостат;
- б - при різних напруженнях зсуву: 1 - повітряний насос; 2 – бутель - моно-стат; 3 - трубка до віскозиметру; 4 - пастка для рідини; 5 – рідинний манометр

Термостатування рідини в приладі займає 10 - 30 хв, що визначається її об'ємом. За цей час температура досягає температури рідини з термостату та відновлюється структура. При вимірюваннях віскозиметрами Уббелоде необхідно з одного боку капіляра створювати тиск або вакуум. Для цього використовують установку (рисунок 3.16, б), що складається з повітряного насосу, який працює як компресор або вакуум - насос; бутели - моно-стата об'ємом 8—10 л з пробкою; U-

образного рідинного манометру або мікроманометру; судини, яка є пасткою рідини, що викидається з манометру, і крану для регулювання подачі повітря.

Константи приладу знаходять по рівнянню Пуазейля:

$$pd / (4l) = \eta 8\omega / d, \quad (3.9)$$

де p - гідростатичний тиск, Па; d - внутрішній діаметр капіляра, м; l - довжина капіляра, м; η - динамічна в'язкість, Па·с; ω - середня швидкість рідини, м/с.

Геометричні вимірювання необхідно проводити з надзвичайно високою точністю. Тому переважніше капілярні віскозиметри градувати по еталонній рідині. Для визначення відносної помилки вимірювання в'язкості рідинообразних продуктів у зв'язку з розмірами капіляра використовують діаграму Г. Барра. Вона побудована для оптимальної довжини капіляру 0,1 м і середнього натиску, тобто різниці висот рідини в двох резервуарах 0,05 м. Температурні зміни об'єму та щільності рідини у віскозиметрі впливають на результати вимірювання. Тому віскозиметр завжди заповнюють однаковим об'ємом рідини при одній і тій же температурі.

Віскозиметр Оствальда використовують як відносний прилад. Розрахункова формула має вигляд:

$$\eta = K_t \rho t, \quad (3.10)$$

де K_t - водна константа приладу при температурі вимірювання, м²/с²; ρ - щільність рідини при температурі заливки, кг/м³; t - час витікання, с.

Віскозиметр Уббелоде використовується як відносний і абсолютний. У першому випадку його градують по еталонній рідині; у другому – по рівнянню Пуазейля визначають константи. Їх можна визначити комплексно, виходячи з даних попереднього градування та безпосередніх геометричних вимірювань. Для обчислення в'язкості використовують формулу:

$$\eta = \eta_s \rho t / (\rho_s t_s), \quad (3.11)$$

де індекс « v » відноситься до даних, отриманих при градуюванні приладу по воді або будь - якої іншій рідині.

Міняючи тиск витікання P_v , можна побудувати градуювальні реограми, які дозволяють обчислити константи для робочих вимірювань. Аналогічні графіки будують для результатів вимірювань досліджуваної рідини. Істотне значення мають графіки, які для кожної температури в області дії закону Пуазейля, дають горизонтальні лінії. Коли починається турбуляція і закон Пуазейля перестає об'єктивно відображати процес, лінії відхиляються вгору. Якщо рідина володіє аномалією в'язкості, то прямі можуть мати часткове викривлення або не виходити з початку координат, відсікаючи на осі абсцис відрізок, пропорційний граничному напруженню зсуву.

Горизонтальний віскозиметр ВК-4 в роботі та градуюванні подібний віскозиметру Уббелоде. Він призначений для вимірювання в'язкості крові і має дві трубки, які калібруються. Кожна трубка складається з двох широких капілярів з міліметровою шкалою, які служать резервуарами для рідини. Між ними розташований вузький вимірювальний капіляр. Для термостатування досліджуваної рідини обидві трубки поміщають у широку скляну трубку, закриту з торців пробками, через які виходять трубки. В трубку подається термостатуюча рідина. Перевага конструкції: мала кількість рідини і тому невеликий час термостатування; відсутність поправок на зміну гідростатичного тиску і об'єму; стійкий ламінарний режим у широкому діапазоні тиску; порівняльне тривалий час витікання рідини. Вимірювання можна проводити при прямому і зворотному русі рідини в капілярі. Це дуже важливо для білкових структурованих рідин (кров, молоко, бульйон та ін.), оскільки дозволяє уникнути руйнувань структурних зв'язків при холостому ході.

Для вимірювання граничного напруження зсуву використовують **прилад А. А. Симоняна**, у якого всування поршня в трубу з одного боку викликає вільне витікання продукту з іншого боку, а зусилля, необхідне для витікання, сприймається мембраною і визначається за її деформацією. Пластична течія починається, коли зусилля на поршень дорівнює опору циліндричного шару уздовж стінки труби. У момент початку руху градієнт швидкості дорівнює нулю, тоді умова рівноваги продукту в циліндрі запишеться у вигляді рівності сил - уздовж стінки поверхні труби та рушійної сили тиску, яка прикладається до поршню [ліва частина рівняння (3.6)]:

$$\theta_0 = pd / (4l) = K\delta, \quad (3.12)$$

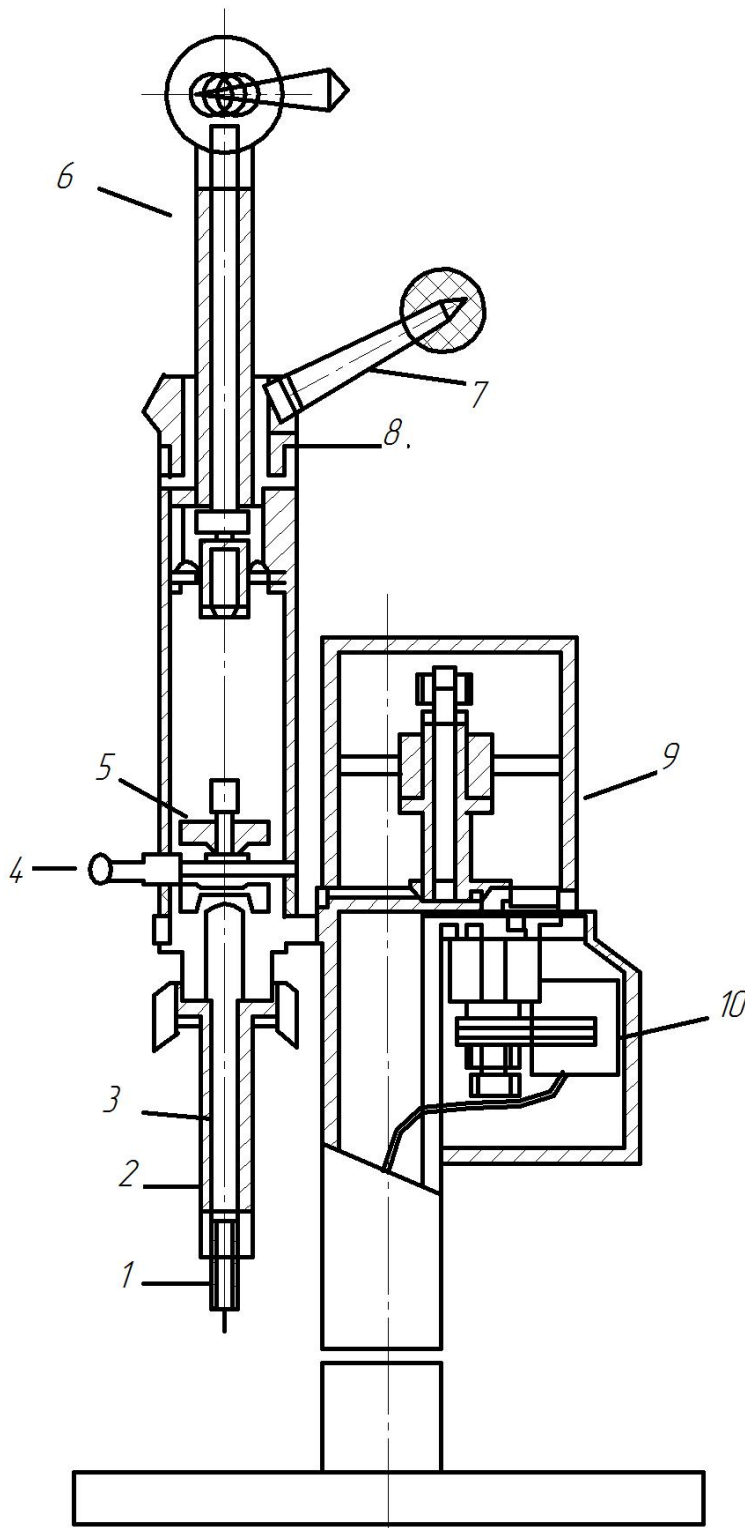


Рисунок 3.17 - Віскозиметр АКВ-5:
 1 - капіляр; 2 - камера; 3 - шток; 4 – держатель олівця; 5 - пружина; 6 - гвинт;
 7 - ручка; 8 - втулка; 9 - барабан;
 10 - синхронний електродвигун

де K - константа приладу, що враховує його розміри та показники градуювання мембрани, Па/м; δ - величина прогину мембрани, м.

Помилка вимірювань не перевищує 10%.

Широкого застосування набули **автоматичні віскозиметри АКВ-3 і АКВ-5**. Прилад, наведений на рисунку 3.17, складається з камери, заповнюваної досліджуваною масою, яка закінчується капіляром. У камеру входить шток, який проштовхує масу через капіляр; шток рухається до низу під тиском пружини. У шток вставляється утримувач олівця, який записує переміщення штоку на барабані 9 та приводиться в рух від синхронного двигуна. При записі отримують криві, за якими визначають пластично-в'язкі характеристики маси.

Спосіб вимірювання в'язкості за допомогою падаючої кульки в широкій трубці, який реалізовує закон Стоксу, викори-

стовується для ньютонівських або слабоструктурованих рідин. Проте він непридатний для вивчення властивостей пластично - в'язких, структурованих систем.

Реалізуючи двомірний метод, за один експеримент вимірюють температурну залежність в'язкості. Для цього рідину в циліндрі нагрівають зверху, охолоджують знизу, по вертикалі пускають кульку. Знаючи швидкість руху в кожному шарі та розподілення температур по шарах, можна побудувати графік змінення в'язкості у залежності від температури. При вимірюванні кульковими віскозиметрами відлік призводять в зоні рівномірного руху кульки.

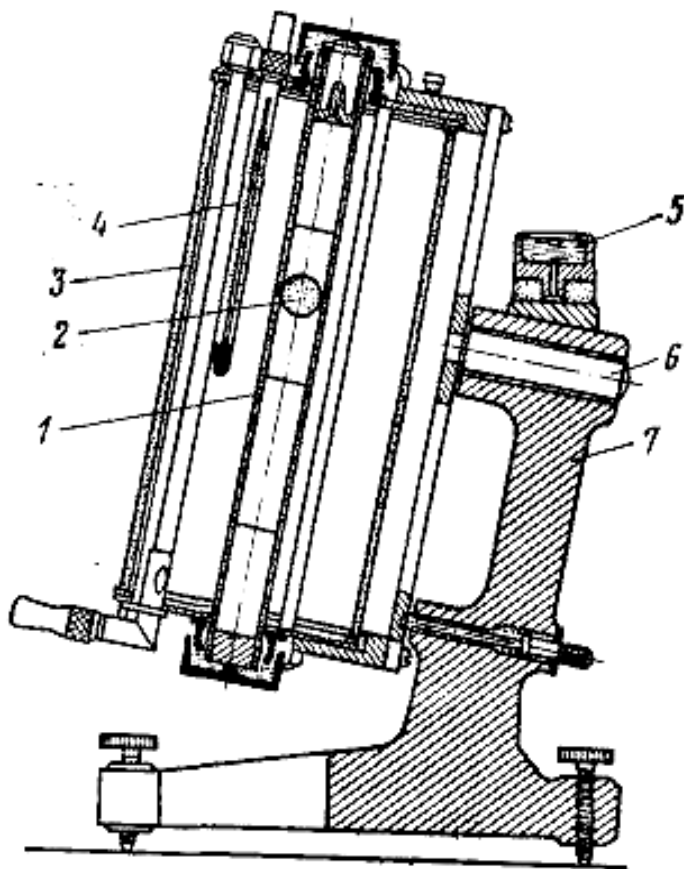


Рисунок 3.18 - Кульковий віскозиметр Гепплера:

1 - скляна трубка; 2 - кулька; 3 - циліндр для термостатування рідини; 4 – термометр; 5 - гумовий ковпачок для відводу надлишку рідини з трубки; 6 – ось для повороту термостату на 180°; 7 – підставка

З кулькових віскозиметрів, що випускаються промисловістю, найбільш поширені **віскозиметри Гепплера** (рисунок 3.18).

Хоча закон Стоксу, яким описується рух кульки, тут додержується частково, вони дозволяють досить точно вимірювати в'язкість. Кулька рухається в похилій трубці, утворюючи вузьку щілину зі стінкою. У структурованій рідині при проході через щілину структурні зв'язки руйнуються, тому точного відтворення результатів в двох послідовних вимірах може і не бути.

Прилад проградуєований для вимірювання в'язкості ньютонівських або слабоструктурованих рідин у діапазоні від $3 \cdot 10^{-4}$ до 60 Па·с. Паспортна помилка вимірювання не перевищує 0,5% для лабора-

торної моделі Прилад непридатний для систем, які мають граничне напруження зсуву. Розрахункова формула в'язкості:

$$\eta = K(\rho_k - \rho)t, \quad (3.13)$$

де K - константа віскозиметру, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ρ_k - щільність матеріалу кульки, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ — щільність рідини при температурі вимірювання, $\text{кг}/\text{м}^3$; t - тривалість переміщення кульки на ділянці h , с.

Розрахунок проводять з урахуванням даних таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Основні характеристики віскозиметра Гепплера

Номер кульки	Діаметр $d \cdot 10^3$, м	Маса $m \cdot 10^3$, кг	Щільність ρ_k , $\text{кг}/\text{м}^3$	Постійна кульки $K \cdot 10^6$	Границі вимірювання в'язкості, Па·с
1	15,805	4,9692	2404	0,009747	$(0,3..5)10^{-3}$
2	15,630	4,8338	2418	0,080	$(3..30)10^{-3}$
3	15,452	15,6567	8110	0,234	$(15..150)10^{-3}$
4	15,385	15,0490	8110	0,555	0,115 - 1,15
5	15,248	12,6496	8120	3,850	1 - 10
6	11,805	6,9910	8120	27,400	6 - 60

Розміри кульок вибрані так, щоб кожна область вимірювань перекривалася сусідньою приблизно на 30%. Час падіння кульки повинен складати 30 - 300 с.

Капілярний пристрій з сільфонами (рисунок 3.19, а), розроблений А. В. Горбатовим, В. Д. Косим, Г. Е. Лимоновим та ін., має датчик, який є трубкою з укріпленими по боках пружними елементами, - сільфонами, і перетворювач, пов'язаний з регулюючим приладом. Напрямна втулка розбірна і складається з верхньої і нижньої половин, остання жорстко зварена з основою. Обидві половини кріплять одну до одної гайками.

Пристрій працює наступним чином. Під час подрібнення фарш постійно переміщується насосом через пристрій, за допомогою якого безперервно вимірюються його структурно-механічні властивості. Завдяки малій довжині трубопроводу та невеликого тиску перетирання фаршу в насосі, а отже, і додаткова зміна структурно-механічних властивостей практично відсутні.

У момент проходження подрібненого фаршу крізь пристрій го-

ризонтальна трубка, знаходячись між пружними елементами - сільфонами, переміщується в подовжньому напрямі під дією сил тертя, які виникають між шарами фаршу та стінками трубки.

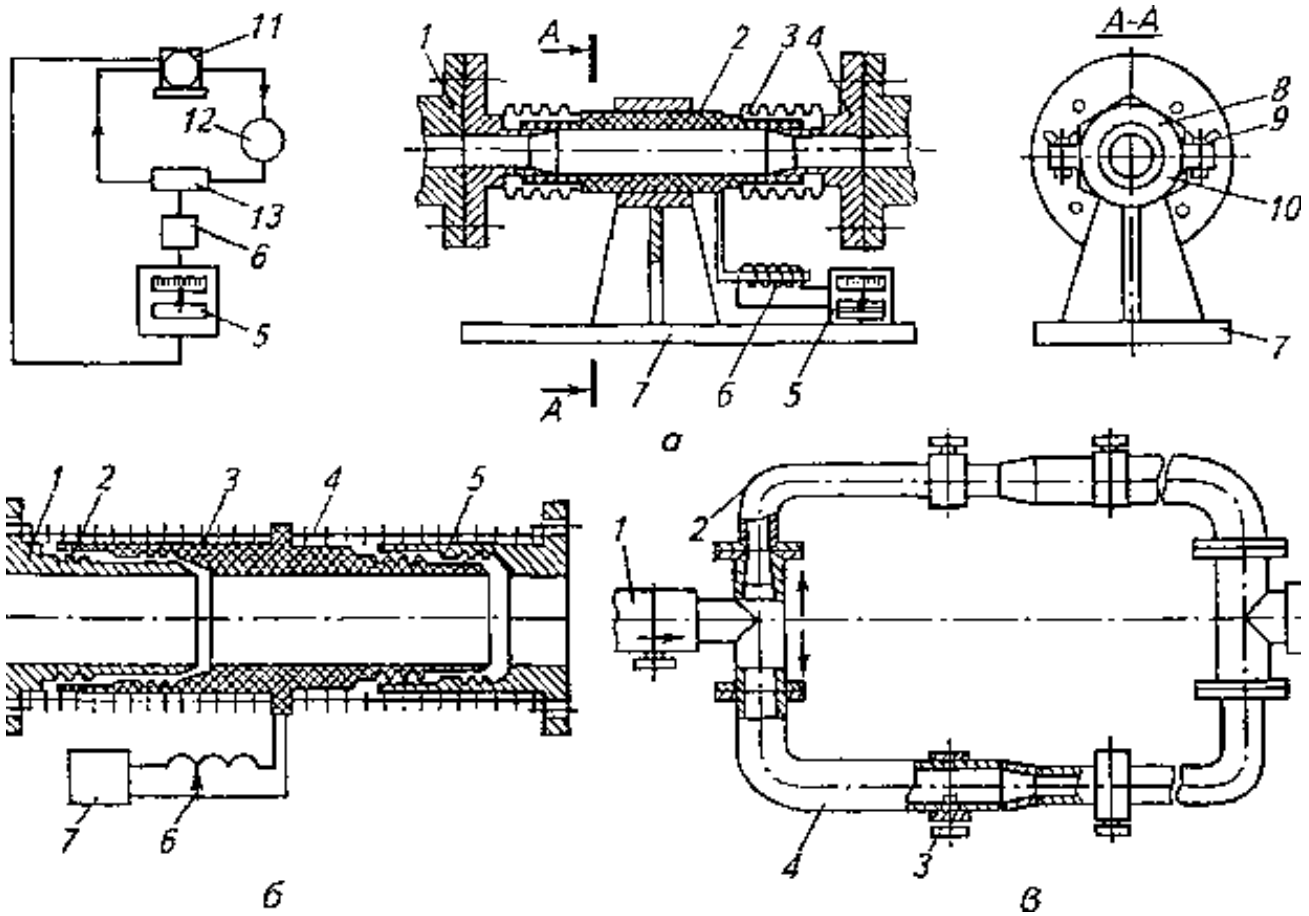


Рисунок 3.19 - Капілярні віскозиметри:

а - з елементами сільфонів : 1, 4 - патрубки з фланцями; 2 – трубка; 3 - сільфони; 5-реєструвальний прилад; 6 - перетворювач; 7-основа; 8, 10 - відповідно верхня і нижня частини направляючої втулки; 9 - баранчики; 11 - подрібнювач; 12 - насос; 13 - прилад сільфону в технологічній схемі;

б- з пружинними елементами: 1, 5 - патрубки; 2 - проточки; 3 – чутливий елемент; 4 - пружини; 6 - перетворювач; 7-реєструвальний прилад;

в - мостового типу: 1 - магістральний трубопровід; 2, 4 - капіляри - плечі моста з різними діаметрами; 3 - датчик тиску

Відстань, на яку переміщується трубка, залежить від міри готовності фаршу, тобто, від його ефективної в'язкості. Отже, швидкість руху фаршу або значення градієнта швидкості потрібно вибирати та-

кими, при яких зміна ефективної в'язкості від міри подрібнення є надчутливою. Після досягнення оптимальної міри подрібнення дані приладу через первинний перетворювач передаються вторинному регулюючому приладу, який дає команду на автоматичне відключення подрібнювача.

Капілярний пристрій з пружинами, розроблений Р. Х. Байгільдиним, А. В. Горбатовим, В. Д. Косим та іншими фахівцями, наведений на рисунку 3.19, б. Для поліпшення санітарно-гігієнічної обробки приладу та підвищення його чутливості до зміни структурно-механічних властивостей пружні елементи - сильфони замінені змінними пружинами. Жорсткість пружини обирають залежно від виду фаршу, тобто від діапазону зміни його властивостей, що підвищує точність вимірів. Для створення герметичності сполучення патрубку та чутливі елементи приладу виконані конусними і забезпечені лабіринтовим ущільненням. Принцип дії приладів базується на методі капілярної віскозиметрії, який припускає рівномірний рух середовища, що деформується та переміщується в ламінарному режимі; відсутність впливу ефекту пристінного ковзання; швидкість зсуву у будь-якої точці потоку є результатом дії прикладеного напруження.

У пристрої мостового типу (рисунок 3.19, в) при протіканні продукту через трубки різного перерізу виникає перепад тиску (розбаланс моста). Зі зміненням властивості продукту, змінюється і перепад тиску, який реєструється приладом. За наявності зворотного зв'язку цей пристрій може регулювати консистенцію фаршу. Показання мостового пристрою базуються на різниці швидкостей і втрат тиску в плечах моста. Тому, щоб забезпечити великий перепад тисків в плечах моста, були прийняті наступні значення швидкостей: для широких труб $\omega_D = 0,05...0,1$ м/с, для вузьких - $\omega_d = 1...1,5$ м/с.

Питання для самоконтролю

1. Які елементи конструкції є загальними для всіх типів капілярних віскозиметрів?
2. Чи залежить діаметр капіляра від в'язкості продукту, який досліджується?
3. Які переваги мають капілярні віскозиметри у порівнянні з ротаційними віскозиметрами?
4. Чим відрізняються універсальні капілярні віскозиметри Оствальда від капілярних віскозиметрів Уббелодє?

5. Які ще типи капілярних віскозиметрів ви знаєте?
6. У чому полягає різниця, якщо віскозиметр Уббелоде використовується як відносний або абсолютний?
7. Для яких рідин застосовується спосіб вимірювання в'язкості за допомогою падаючої кульки в широкій трубці?

3.3.3 Прибори з плоскопаралельним зазором

Ці прибори служать для вимірювань характеристик зсуву в області практично незруйнованих структур при малих величинах деформації. Прибори такого типу для досліджень різноманітних властивостей: в'язкості, пружності, періоду релаксації та інших були запропоновані П.А. Ребіндером, Д.М. Толстим, Б.А. Ніколаєвим.

У приладах плоскопаралельний зазор може бути розташований вертикально, горизонтально та похило.

Прилад з вертикальним розташуванням С. Я. Вейлера та П. А. Ребіндера буває двох видів; у першому (рисунок 3.20, а) кювета з досліджуванним матеріалом встановлюється нерухомо, в неї поміщається пластинка, яка приводиться до руху вантажем.

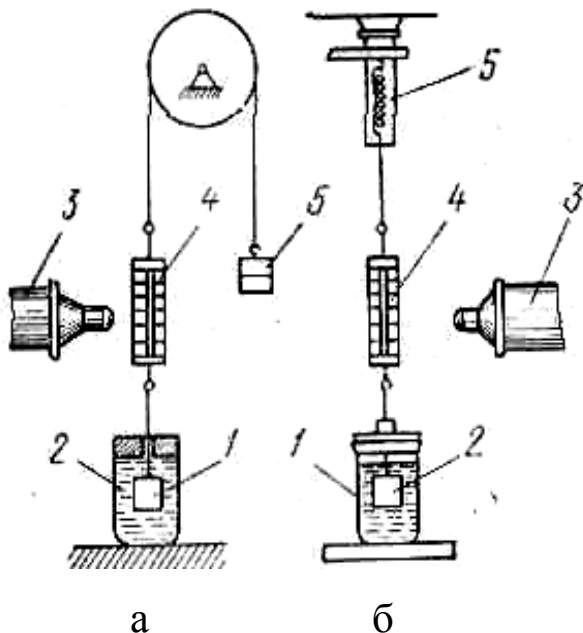


Рисунок 3.20 - Прилад С. Я. Вейлера і П. А. Ребіндера (а) та його модифікація (б): 1 - пластинка; 2 - кювета; 3 - мікроскоп; 4 – мікروشкала; 5 - вантаж (а) або пружина (б)

Між пластиною та ниткою встановлена мікрошкала, по якій за допомогою мікроскопа вимірюють деформацію. Час відлічують по секундоміру. У модифікації приладу (рисунок 3.20, б) пластина через мікروشкалу прикріплюється до задалегідь тарованої пружини. При опусканні кювети пружина подовжується, що вимірюється мікроскопом.

Напруження зсуву θ обчислюють по деформації пружини, відповідної цієї деформації навантаження P та бічної поверхні пластини F :

$$\theta = P/2F . \quad (3.14)$$

Гранична напруга зсуву θ_0 визначається по найбільшому навантаженню P_{\max} .

$$\theta_0 = P_{\max} / 2F . \quad (3.15)$$

Метод тангенціального зміщення пластини дозволяє знаходити не тільки θ_0 , але також модулі пружності, ефективну в'язкість, вивчати процес релаксації, а також знімати повні деформаційні криві $\dot{\gamma}(\theta)$ при різних швидкостях деформації. Прилади, які базуються на цьому методі, мають велику чутливість та застосовуються для дослідження властивостей у діапазоні - від слабо-структурованих золів і суспензій до твердообразних систем з високою міцністю.

Шарометр Д. М. Толстого з пластиною, яка зміщується горизонтально служить для знаходження констант пружно – пластично - в'язких властивостей мас з практично незруйнованими структурами. Визначають модуль швидкої еластичної деформації зсуву G_1 , модуль повільної еластичної деформації G_2 , найбільшу пластичну в'язкість η_0 та умовну статичну границю текучості:

$$G_1 = \theta h / \Delta h_0, \quad G_2 = \theta h / (\Delta h_m - \Delta h_0), \quad \eta_0 = (\theta - \theta_\tau / \dot{\gamma}), \quad (3.16)$$

де θ - напруження зсуву, Па; h - товщина шару продукту, м;

Δh_0 — початкова (умовно-миттєва) деформація, м; Δh_m — еластична деформація, м; $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву, с^{-1} .

Основними деталями шарометру, зображеного на рисунку 3.21, є пластини, між якими розміщується зразок продукту.

Розміри пластин: 0,05x0,02x0,006 м. Площини пластин, які примикають до продукту, мають рифлення, направлені у бік, протилежний напрямку зусиль, що деформують продукт. Деформацію зразків продукту вимірюють за допомогою пружної балочки з наклеєними на неї тензорезисторами. Зусилля зсуву на зразок створюють поворотом ексцентрика, гирями, які встановлюють на нерівноплечовому важелі приладу. Від цього важеля зусилля на продукт передається через рівноплечий важіль та верхню пластину 5.

На підставі методу, запропонованого Д. М. Толстим, Б. А. Ніколаєв [34] розробив **прилад для дослідження дисперсних колоїдних**

систем в плоскопаралельному зазорі на похилій площині при постійному статичному напруженні.

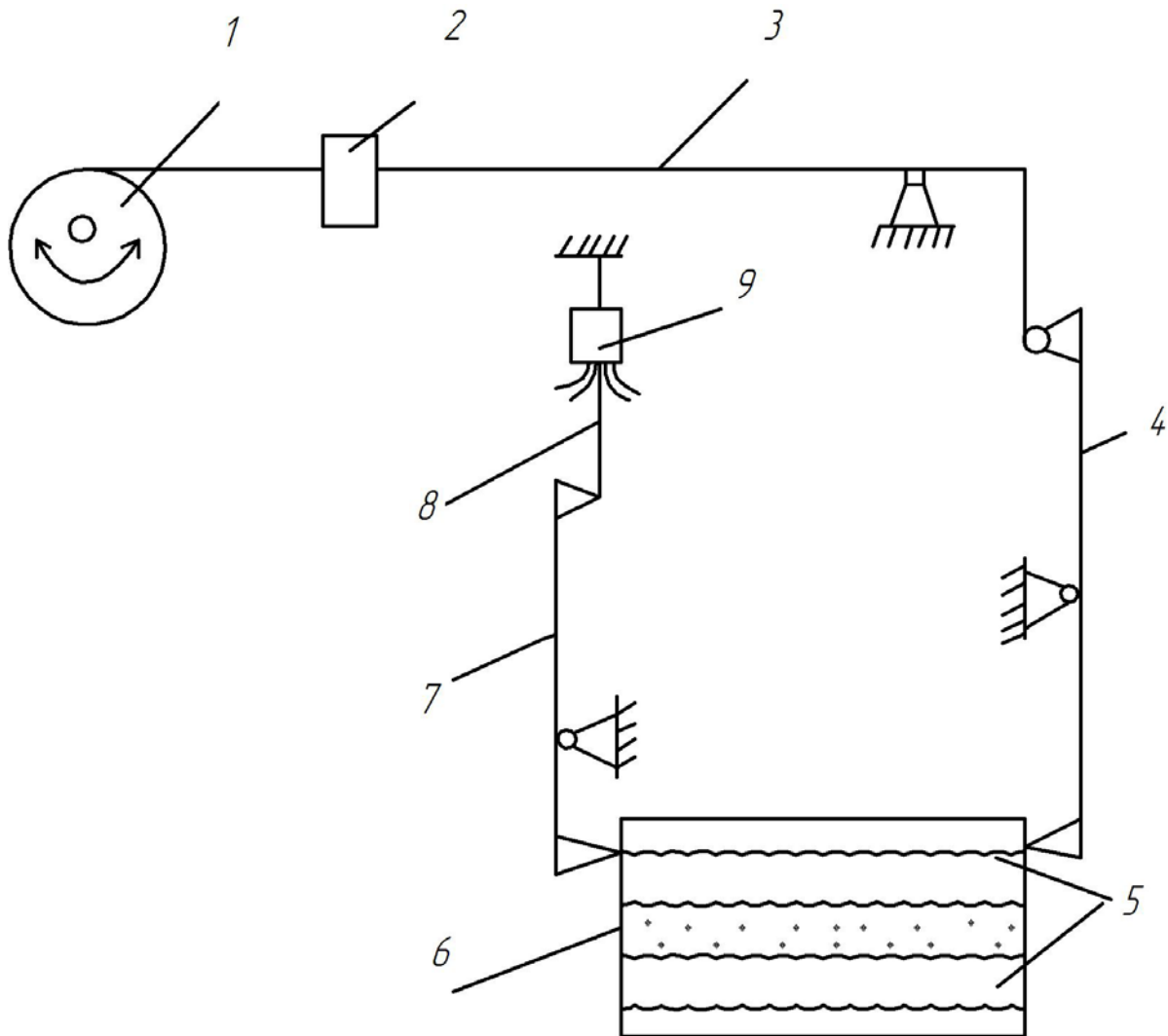


Рисунок 3.21 - Прилад Д. М. Толстого:

1-ексцентрик; 2 - гиря; 3 - нерівноплечий важіль; 4 - рівноплечий важіль; 5 - пластини; 6 – зразок, який випробується; 7 - важіль; 8 - балочка; 9 – тензорезистори

У ЛТІХПе створений **автоматичний шарометр для контролю процесу дозрівання кисломолочних продуктів**. Принцип дії приладу заснований на визначенні напруження тангенціального зсуву, яке виникає при зміщенні пластини в середовищі.

Контроль здійснюється без відбору проб при зануренні герметичного вимірювального перетворювача (рисунок 3.22) безпосередньо в резервуар з середовищем.

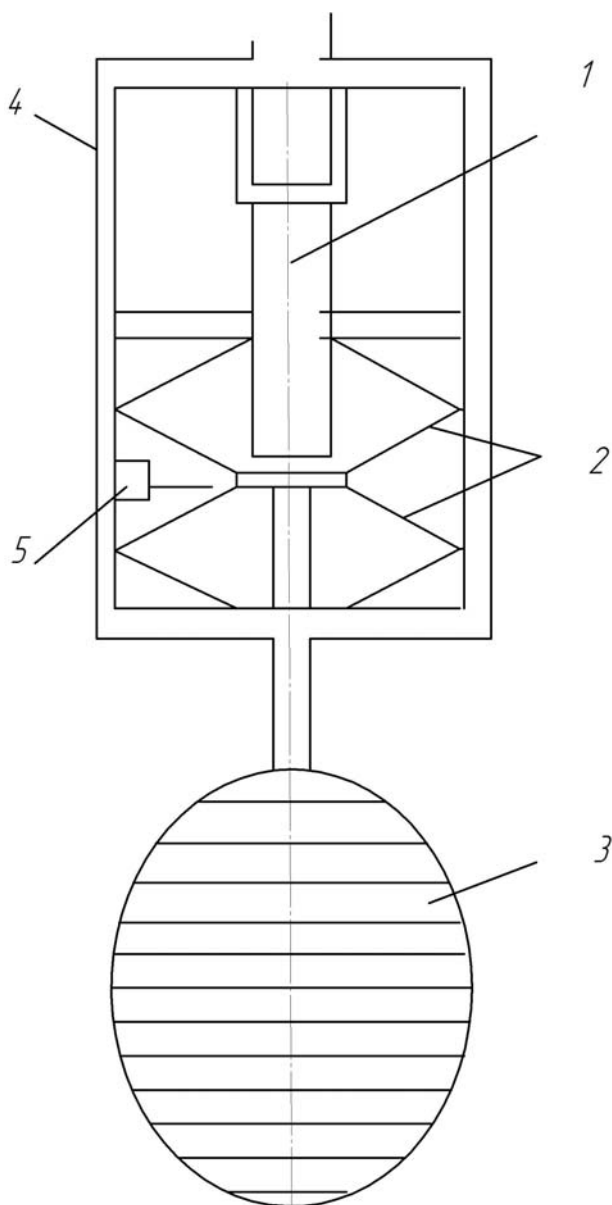


Рисунок 3.22 - Конструкція вимірювального перетворювача автоматичного шарометру системи ЛТІХПа:

- 1 - електромагнітна котушка приводу пластини;
- 2 - система підвісу;
- 3 —пластина; 4 - корпус вимірювального перетворювача;
- 5 – датчик реєстрації

Технічна: характеристика приладу: границі вимірювання тангенціального зсуву 5 - 40 Па; погрішність вимірювання $\pm 5\%$; час вимірювання близько 10 с; напруга живлення 220 В; габаритні розміри, м: блоку управління та живлення 0,3x0,2x0,3; вимірювального перетворювача 0,11x0,3.

Питання для самоконтролю

1. Для яких умов вимірювання призначені прилади з плоскопаралельним зазором?

2. Назвіть вчених, прилади з плоскопаралельним зазором яких отримали найбільше розповсюдження?

3. Яке розташування може мати плоскопаралельний зазор у цих приладах?

3. Які існують види приладів С. Я. Вейлера та П. А. Ребіндера, чим вони відрізняються?

4. За якими залежностями знаходять константи пружно – пластично - в'язких властивостей мас при вимірах з використанням шарометру Д. М. Толстого?

5. Який вчений розробив прилад для дослідження колоїдних систем в плоскопаралельному зазорі на похилій площині?

5. На чому заснований принцип дії автоматичного шарометру для контролю процесу дозрівання кисломолочних продуктів?

3.3.4 Пенетрометри та консистометри

Схема **конічного шарометру** запропонована П. А. Ребіндером та Н. А. Семененко.

Величина граничного напруження зсуву θ_0 обчислюється по максимальному зануренню конусу h_{max} у матеріал:

$$\theta_0 = K_\alpha gM / h_{max}^2 = KM / h_{max}^2, \quad (3.17)$$

де M - маса навантаження, яке діє на конус, кг (за вирахуванням величини, що компенсує тертя та опір пружини індикатора);

K_α - константа конусу, яка залежить тільки від кута при вершині, по П. А. Ребіндеру ($K=K_\alpha g$):

$$K_\alpha = (1/\pi) \cos^2(\alpha/2) \operatorname{ctg}(\alpha/2), \quad (3.18)$$

де α - кут при вершині конуса, град.

Константу конусу зазвичай визначають за даними Н. Н. Агранат, наведеними у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Дані для визначення константи конусу

α , град	30	40	45	60	89,33	90
K_α	0,958	0,530	0,417	0,214	0,0836	0,0683
K	9,4	5,2	4,1	2,1	0,82	0,67

Помилки дослідів у значній мірі залежать: систематичні - від точності виготовлення та вимірювання кута при вершині конусу (в інтервалі

30—60° достатня точність 0,1°); випадкові - від способу укладення продукту в судину, вихідній позиції конусу і так далі. Тривалість дослідів 180 с, час вимірювання має бути більше, ніж період релаксації.

На конічному **шарометрі КП-3** (рисунок 3.23, а) досліджуваний продукт поміщається в судині на підйомний столик, вершина конусу приводиться в зіткнення з поверхнею продукту. Конус навантажується гирями, і за допомогою індикатора визначається величина занурення конуса до його зупинки.

У МТІХПе розроблений **малогабаритний пенетрометр** (рисунок 3.23, б), що складається з основи, на якій закріплений рухомий

столік та вертикальна стійка. На останню встановлюється скоба з датчиком диференціально - трансформаторної системи передач. До одного кінця нитки прикріпленій рухомий шток датчика. На штоку розташовані тарілка, яка служить для установки додаткових вантажів, і змінна насадка. На іншому кінці нитки закріпленій вантаж для врівноваження маси штоку з тарілкою і насадкою. У комплект входять конуси з кутами при вершині 30, 45, 60, 90, 120°, а також диски.

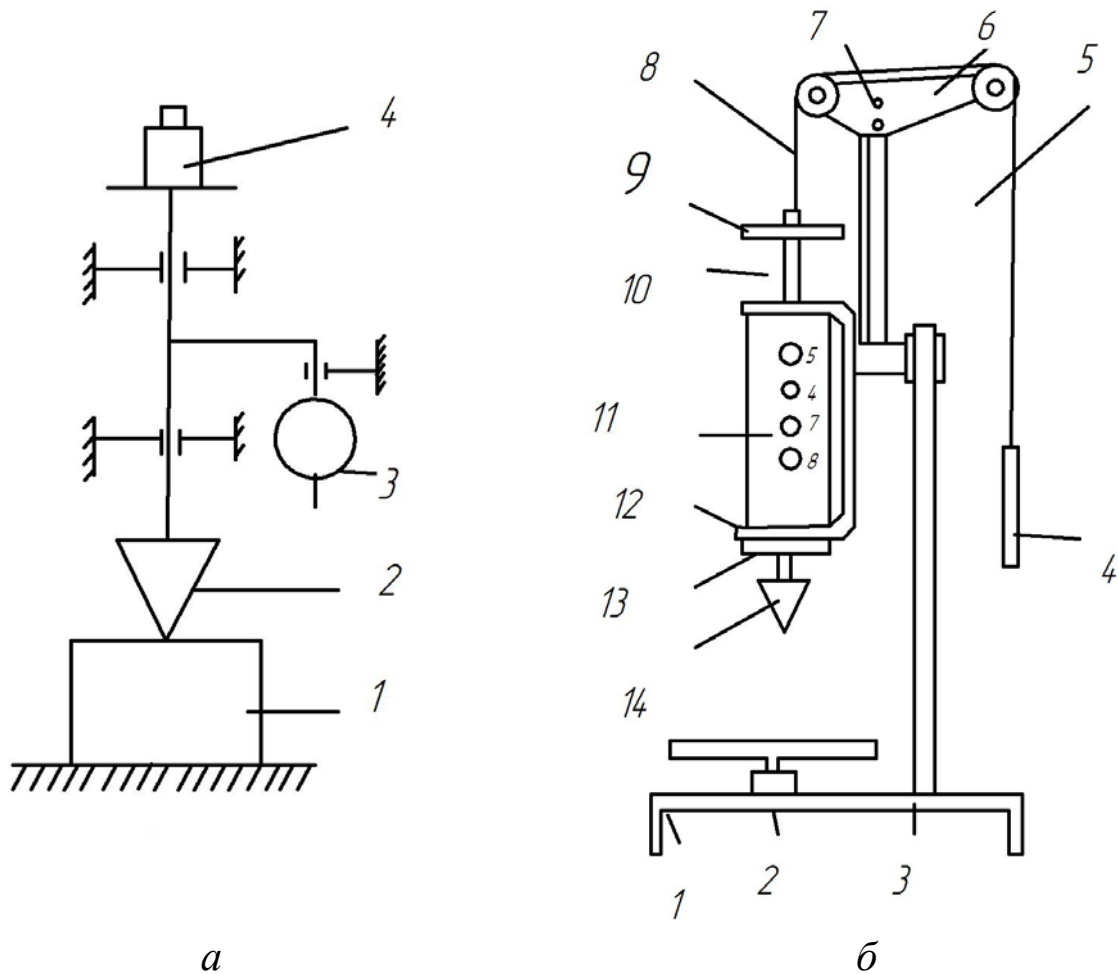


Рисунок 3.23 - Схеми пенетрометрів:

а - конічний шарометр КП-3:

1— судини зі зразком; 2 - конус; 3 - індикатор; 4 - вантаж;

б - малогабаритний пенетрометр МТІХПа:

1 основа; 2 - рухомий столик; 3 - стойка; 4 - вантаж; 5 - блок;
6 - стойка; 7 - кронштейн; 8 - нитка; 9 - тарілка; 10 - рухомий шток;
11 - датчик переміщення штоку; 12 - скоба; 13 - стопор; 14 - змінний
робочий орган

Технічна характеристика: границі вимірювання граничного напруження зсуву до $1 \cdot 10^6$ Па; напруга мережі 127, 220 В; габаритні розміри, м: 0,12x0,2x0,3; маса 4 кг.

Шарометр з пластиною (рисунок 3.24, в) застосований С. С. Жуковським та Л. М. Гуткиним для вимірювання граничного напруження зсуву. Його значення обчислюють за залежністю:

$$\theta_0 = gM / (2bh), \quad (3.19)$$

де M - маса рухомої частини приладу, кг; g - прискорення вільного падіння, m/s^2 ; b - ширина ножа, м; $b=0,025$ м; h - глибина занурення ножа в продукт, м.

Прилад складається з плоского ножа 0,2x0,025 м з штоком та індикатора для реєстрації переміщень штоку. Встановлено, що значення граничного напруження зсуву, зміряного на цьому приладі та ротційному віскозиметрі РВ-4, розрізняються не більш ніж на 5%.

Півсферичний консистометр (рисунок 3.24, г) для оцінки консистенції м'яса і ковбас має порожнистий корпус з півсферичним індикатором. Коли індикатор притискують до продукту, стискується пружина і хвостовик штока з нанесеними на нього діленнями виходить з корпусу. Вимірювання закінчують при зіткненні корпусу приладу з продуктом, тобто змінюються дві величини: переміщення штоку відносно корпусу та зусилля втискування.

Консистометр В. П. Табачникова та Е. Я. Баркова призначений для відбору проби і визначення граничного напруження зсуву сиру і подібних до нього продуктів (рисунок 3.24, д). Прилад складається з трубчастого корпусу - пробовідбірника із загостреною нижньою кромкою та головки, яка представляє собою динамометр обертального руху. Корпус пробовідбірника розташовують в строго вертикальному положенні на сирі і занурюють його в сир на певну глибину, про яку судять по відмітках на зовнішній поверхні пробовідбірника. Потім повертають головку динамометра за годинниковою стрілкою. При цьому собачка входить у зачеплення із зуб'ями храпового вінця і не дає головці повертатися під дією сили закручуваної пружини. Коли ця сила стане дорівнювати силам опору продукту (точніше, трохи перевищить їх), відбудеться повернення пробовідбірника, що супроводжується зрушенням продукту, а собачка зафіксує максимальне відхилення шкали приладу від нульової відмітки.

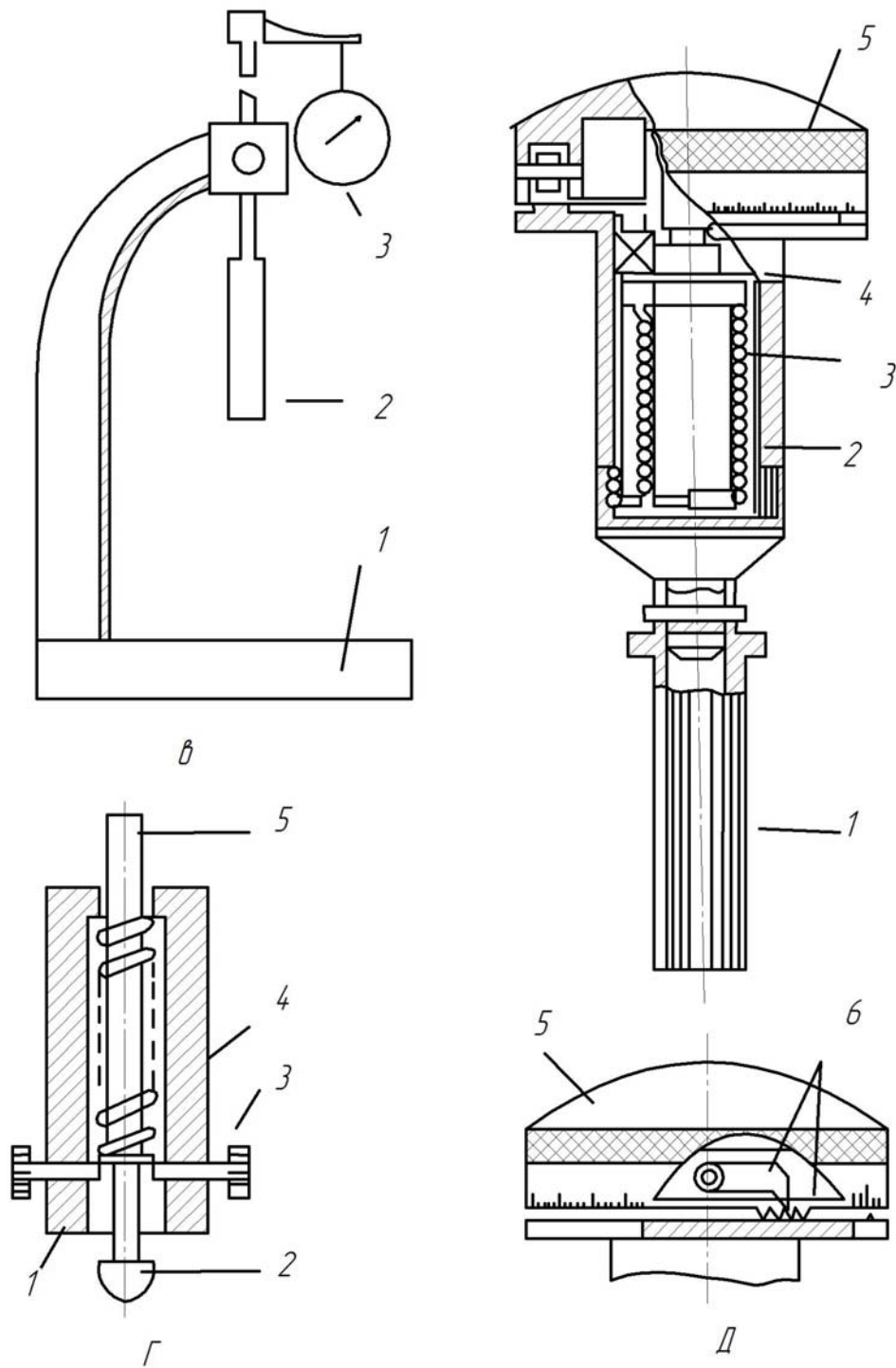


Рисунок 3.24 - Схеми пенетрометрів:

- в - пластинчатий пластометр С. С. Жуковського і А. М. Гуткіна:
 1 - підставка з кронштейном; 2—плоский ніж; 3 - індикатор;
- г - переносний консистометр: 1 - корпус; 2 - індентор; 3 - фіксатор;
 4 - пружина; 5 - хвостовик штока;
- д - консистометр В. П. Горбачникова і Е. Я. Баркова: 1 - корпус-пробовідбірник; 2 - динамометр; 3 - пружини; 4 - підшипник;
 5 - головка приладу; 6 - собачка та храповий вінець

Величина цього відхилення залежить від сили пружності пружини та граничного напруження зсуву продукту.

Граничне напруження зсуву θ_0 (Па) визначається за формулою, виведеною з рівності моментів: зовнішній момент $M_{кр}$ (Н·м), прикладений до головки, дорівнює моменту сили опору (зрізу) на циліндричній частині приладу та на його торці, який можна уподібнити диску:

$$\theta_0 = 12M_{кр} / [\pi D^2 h + d^3], \quad (3.20)$$

де D — максимальний діаметр частини продукту, яка зсовується, рівний діаметру циліндра, що описується краями ребер при їх обертанні, м; h — глибина занурення щупа в сир, м; d - внутрішній діаметр трубки, м.

Пенетрометр, запропонований О. М. Беленьким, А. І. Бескопильним та ін., призначений для визначення структурно-механічних характеристик матеріалів. Принцип дії приладу заснований на тому, що у випробовуваний матеріал упроваджують індентор ударним способом. Переносний електронний пристрій складається з елементу індентора, який навантажує, електронного блоку обробки результатів вимірів і датчика, що складається з постійних магнітів і котушки. При цьому датчик реєструє максимальне значення глибини та швидкості проникнення індентора в матеріал, додатне та від'ємне прискорення. Працює пристрій таким чином. Встановлюють насадку відповідної форми, яка дозволяє визначати характеристики міцності продукту, та зводять ударний механізм, який фіксується стопором. Потім механічну частину пристрою встановлюють на випробовуваний об'єкт і притискають до нього. Під дією пружини вибираються зазори, внаслідок чого індентор щільно прилягає до випробовуваної поверхні. Потім натискають на кнопку «Скидання», після чого пристрій готовий до вимірів. Натискають на пускову кнопку, яка давить на стопор, і під дією удару індентор занурюється в поверхню матеріалу. Параметри процесу впровадження індентора реєструються датчиком, який передає сигнали в електронний блок обробки результатів, вони висвічуються послідовно на цифровому індикаторі залежно від відповідної кнопки функціонального перетворювача. Перед тим, як приступити до наступного виміру, натискають на кнопку «Скидання».

Пенетрометр, запропонований Н. П. Елісєєвим та ін., має корпус, в нижній частині якого розміщені стіл з механізмом його переміщення, шток з вантажем і голкою, датчик переміщення, блоки виміру та управління. Підвищення точності досягається шляхом автоматизації визначення моменту дотику голкою випробовуваного продукту, що досягається за допомогою блоку, який реєструє збудження коливань голки.

Пенетрометр, розроблений В. П. Епіфановим, містить індентор з п'єзоелементом. Індентором є стрижень з наконечником у вигляді двосічного ножа змінного перерізу. Відношення площ перерізів у взаємно перпендикулярних площинах, паралельних осі стрижня, вибрано у границях 1:3...1:10. Достовірність визначення механічних характеристик пористих матеріалів підвищується в результаті того, що виключається вплив ущільнення матеріалу під індентором.

Пенетрометр, запропонований Н. І. Ширіним і Л. А. Сосновським, дозволяє визначити динаміку деформації, релаксаційні характеристики, адгезійну міцність, а також граничне напруження зсуву експрес - методом. Прилад має комплект змінних інденторів (круглі пластини, конуси, гребінки).

Шарометр, розроблений А. Н. Піроговим та ін., має три індентори і автоматичну систему управління їх роботою. Для кожного з інденторів задається програма, яка складається з центрування його з об'єктом дослідження, фіксації моменту їх зіткнення, тривалості витримки і вимірів, після чого дані реєструються на самописці.

Шарометр, створений В. М. Гончаровим та ін., має рухомий столик, на якому знаходиться об'єкт дослідження. При дотику продукту індентором замикається електроланцюг. Це викликає відключення електродвигуна підйому столика та відключення електромагнітної клямки, яка звільняє шток з конусом. Глибина занурення індентора вимірюється за шкалою індентора переміщення.

Комплекс напівавтоматичних пенетрометрів серії ПП розроблений під керівництвом В. Д. Косого. Прилад ПП-1 служить для виміру граничного напруження зсуву. В ньому шток з'єднується з поршнем, який переміщується в демпферному пристрої, що забезпечує плавне опускання конуса (рисунок 3.25).

Механізм, який реєструє переміщення конуса, є двома співвісними встановленими дисками. При переміщенні конусу диски приводяться в обертання за допомогою важелю, сполученого зі зубчастим сектором та гальмовим механізмом, який дозволяє зупинити один з дисків під

час контакту конусу з досліджуваним матеріалом.

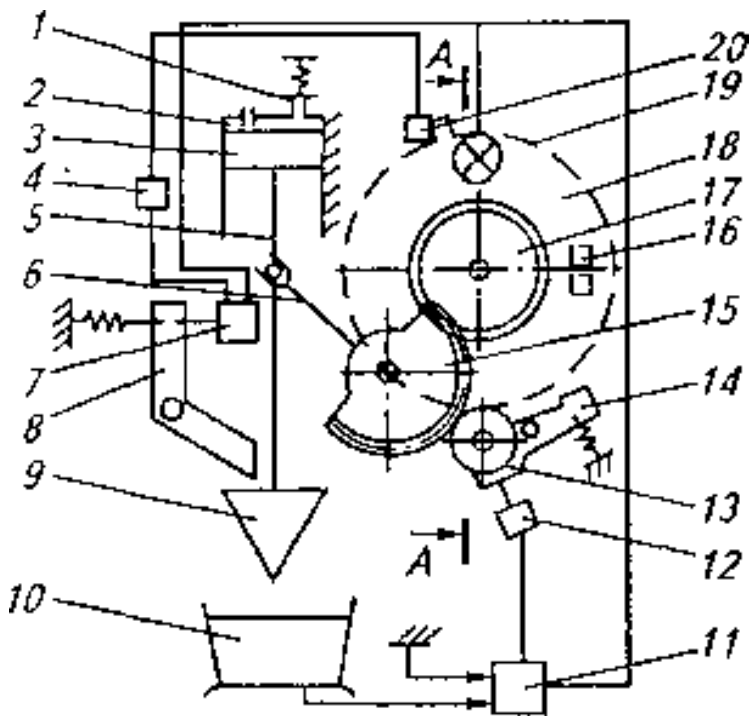


Рисунок 3.25 - Напівавтоматичний пенетрометр ПП-1:

- 1—голковий клапан; 2—циліндр;
- 3 — поршень; 4— пускова кнопка;
- 5—шток; 6— важіль механізму реєстрації; 7—пусковий електромагніт;
- 8— важіль для фіксації конуса;
- 9 — конус; 10— ємність; 11 — реле;
- 12 — електромагніт гальмового пристрою; 13 — ролик; 14— важіль гальмового механізму; 15— зубчастий сектор;
- 16 — обмежувальний виступ;
- 17— зубчасте колесо; 18 — другий диск;
- 19— перший диск; 20— мікрровимикач;
- 21 — рукоятка

Працює прилад таким чином. Досліджуваний продукт встановлюють в електропровідній ємності на контактну пластину. У первісному положенні конус знаходиться в крайньому верхньому положенні. Ролик забезпечує зчеплення таким чином, що радіальна риска другого диску збігається з початком шкали вимірювання першого диску. При натисненні на пускову кнопку живлення подається на електромагніт, який звільняє шток.

Під дією сили тяжіння вимірювальний механізм починає плавно опускатися; при цьому швидкість його переміщення обмежується часом надходження повітря в циліндр.

Одночасно важіль механізму реєстрації під дією штока повертає зубчасте колесо за допомогою зубчастого сектору, здійснюючи оберта-

льний рух першому диску, а від нього за допомогою ролика — другому диску. Обидва диски обертаються синхронно. При зіткненні конусу з продуктом електричний ланцюг замикається та включається електронне реле, через яке подається живлення на електромагніт. В результаті важіль гальмового механізму виводить ролик із зачеплення

з дисками, а фрикційною накладкою фіксується другий диск. Перший диск продовжує обертатися при переміщенні конусу в продукт, реєструючи глибину його занурення. Після закінчення вимірів прочитують показання приладу за шкалою вимірів.

Для повернення приладу в початкове положення держак, який обертається на одній осі з першим диском, повертають проти ходу стрілки годинника. При цьому другий диск обертається в тому ж напрямі в результаті взаємодії виступів, розташованих на дисках. Одночасно конус займає крайнє верхнє положення. Для розширення діапазону виміру граничного напруження зсуву маса рухомої частини приладу (штанга і конус) зменшена до мінімуму та дорівнює 0,04762 кг. Конус (порожнистий) має кут 60° . Для точності виміру бажано, щоб глибина занурення конуса дорівнювала 0,02...0,04 м. Це відповідає граничному напруженню зсуву 62,5...250 Па.

При більшому граничному напруженні зсуву конус обважнюють додатковими пластинами масою 0,04762 кг. Максимальна погрішність виміру глибини занурення конуса в продукт не перевищує $\pm 0,02$. Залежно від кількості додаткових вантажів ціна ділення шкали збільшуватиметься в прямій пропорційності.

Автоматична фіксація моменту контакту конусу з фаршем дозволила прискорити процес експерименту. Розміри приладу 0,21x0,1x0,27 м, маса 3 кг. Прилад живиться від мережі змінного струму частотою 50 Гц і напругою 220 В.

Таким чином, прилад характеризується зручністю обслуговування, підвищеною точністю вимірів і не залежить від індивідуальних здібностей лаборанта.

На рисунку 3.26 наведений **пенетрометр ПП-ЗМ**. У пенетрометрі при зіткненні індентора з продуктом замикається електричний ланцюг управління підсилювачем постійного струму, і на перший електромагніт подається живлення, внаслідок чого він притягує до себе пластину, що викликає об'єднання і одночасно обертання двох циліндрів. При цьому стрілка переміщається відносно шкали відліку. Повернення і фіксація індентора у верхньому положенні здійснюють за допомогою ручки і фіксатора. При цьому електричний ланцюг розривається, електромагніт знеструмлюється, а пластину зі стрілкою під дією сили тяжіння повертається в початкове положення.

Модернізований прилад ПП-ЗМ забезпечений додатково другим електромагнітом, який після закінчення заданого часу (5с) притягує пластину зі стрілкою, після чого відраховуються дані на приладі.

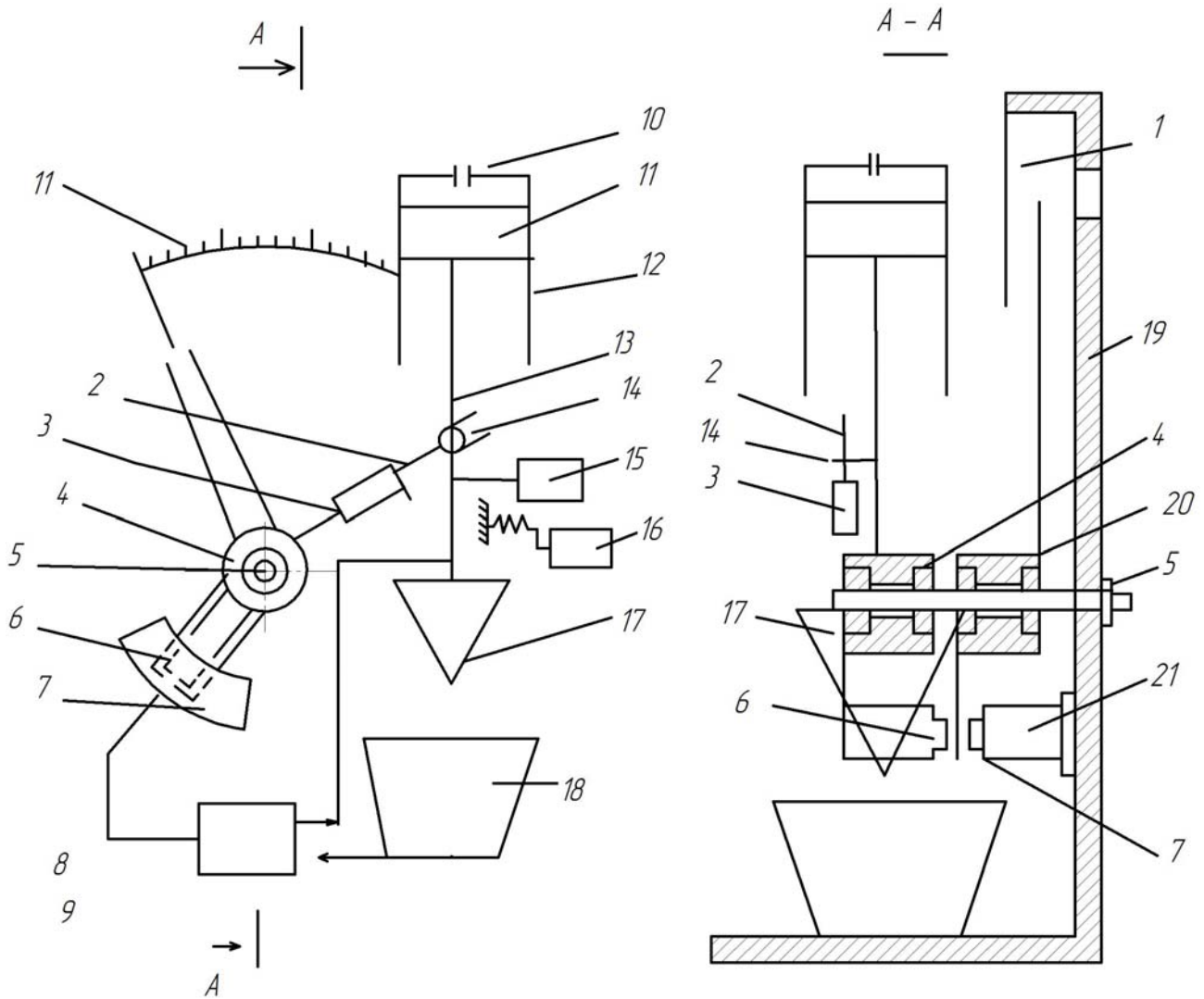


Рисунок 3.26 - Напівавтоматичний пенетрометр ПП-3М :

1 - шкала; 2 - важіль; 3 - противага; 4-циліндричний барабан, сполучений з штоком; 5 - вісь обертання циліндрів; 6 - електромагніт для фіксації моменту зіткнення індентора з продуктом; 7 - гнучка пластина; 8 - підсилювач; 9 - контактна пластина; 10-демпфуючий отвір (жиклер); 11 - поршень; 12 - циліндр; 13 - шток; 14 - палець; 15 – ручка підйому індентора; 16 - фіксатор ручки підйому або пускова кнопка; 17 – індентор (конус); 18 - ємкість; 19 - корпус; 20 - циліндричний барабан, сполучений з вимірювальною стрілкою; 21 - електромагніт для фіксації міри penetрації

Електрична схема приладу забезпечує заданий час penetрації. Прилад дозволяє працювати в двох режимах: вимірювати максимальну глибину занурення індентора (граничне напруження зсуву) та міру

пенетрації, тобто глибину занурення індентора протягом заданого часу. Для перемикання режимів роботи служить тумблер.

В універсальному напівавтоматичному пенетрометрі ПП-4 (рисунок 3.27) ліквідований демпферний пристрій циліндр-поршень.

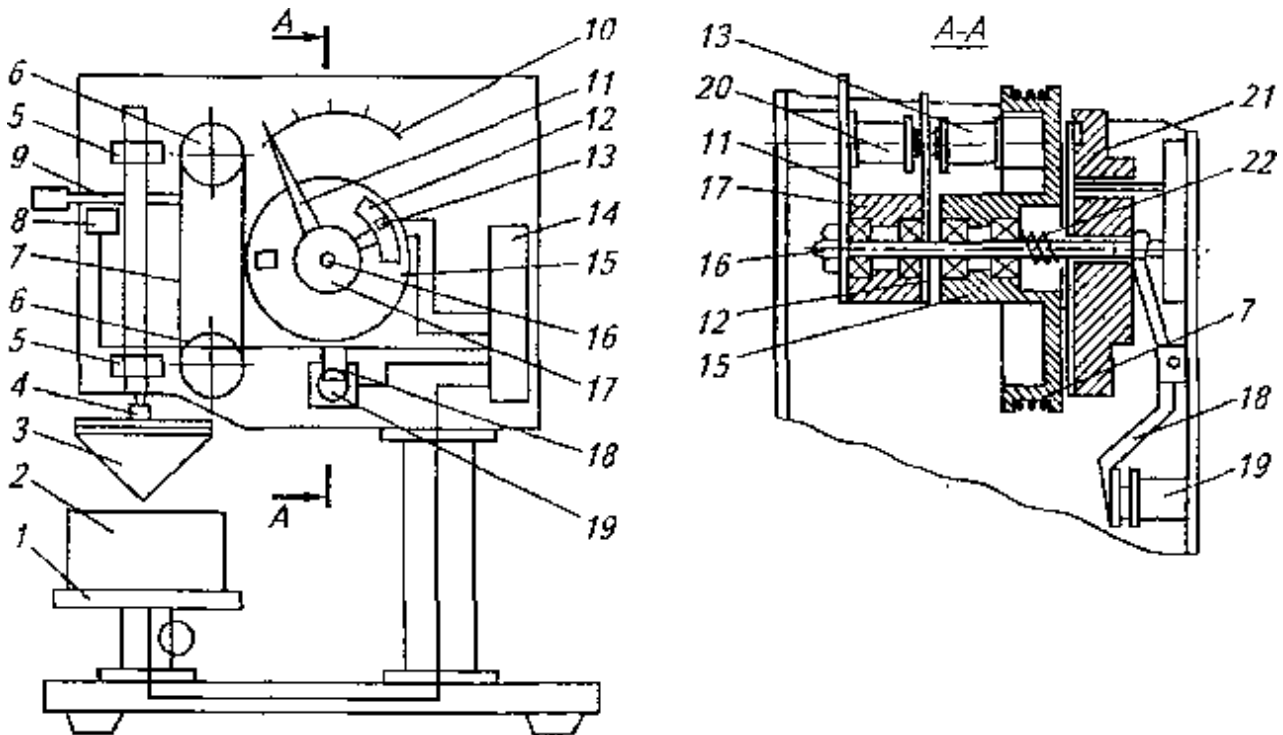


Рисунок 3.27 - Напівавтоматичний пенетрометр ПП- 4 :

- 1 - підйомний столик; 2 - місткість для досліджуваного продукту;
 3 - рифлений конус; 4 - шток; 5 - напрямні; 6 - ролики; 7-тросик;
 8 - електромагніт фіксації штоку; 9 - руків'я; 10 - шкала; 11 - стрілка;
 12 - пружна пластинка; 13 - електромагніт вимірювального вузла;
 14 - блок управління з реле часу; 15 - шків; 16 - вісь; 17 - барабан;
 18 - кронштейн; 19 - гальмовий електромагніт; 20 - електромагніт фіксації вимірів; 21 - гальмовий диск; 22- пружина

Механізм реєстрації переміщення індентора сполучений за допомогою стержня і троса з штоком, який забезпечує прямолінійну залежність повороту стрілки відліку від переміщення індентора, тобто рівномірний відлік. Блок управління, забезпечений реле часу, пов'язаний з гальмовим пристроєм, диск якого розташований на однієї осі зі шківом механізму реєстрації переміщення індентора та електромагнітами фіксації початку виміру та показань приладу.

При контакті індентора з продуктом спрацьовує гальмовий пристрій, який гасить інерцію рухомої частини приладу, що підвищує то-

чність вимірів. Габаритні розміри приладу 0,27x0,14x0,34 м, маса 5 кг. Прилад працює від мережі змінного струму частотою 50 Гц та напругою 220 В.

Напівавтоматичний пенетрометр ПП- 5 (рисунок 3.28) розроблений з метою отримання на одній пробі продукту значень двох величин: міри penetрації та граничного напруження зсуву при мінімальному часі.

На відміну від попередніх моделей, цей прилад має два механізми реєстрації, кожен з яких складається з барабана зі стрілкою і пружною пластиною та блоку управління. Перед включенням пристрою в роботу необхідно за допомогою барабанних перемикачів, винесених на передню панель пенетрометра, встановити час спрацьовування залежно від виду продукту. При вимірі міри penetрації час відраховують в секундах (3...10с), а граничного напруження зсуву - в хвилинах(2...5 хв). Наприклад, для ковбасних фаршів цей час складає від 5с до 3 хв. В іншому робота цього пристрою аналогічна роботі попередніх. Напівавтоматичні пенетрометри ПП дозволяють контролювати якість як готового виробу, так і фаршів на різних стадіях технологічної обробки експрес-методом.

Розглянуті пенетрометри серії ПП прості по конструкції і мають нескладну електронну схему.

На базі приладів серії ПП розроблений **пенетрометр серії ПМДП**, який надалі був модернізований(ПМДП- 2). Пенетрометри ПМДП базуються на методі занурення індентора певної маси з постійною швидкістю в продукт на заздалегідь заданий час. Глибина занурення фіксується цифровою індикацією. Особливість приладу в тому, що він дозволяє під час досліджень однієї проби продукту фіксувати два значення penetрації за різну тривалість занурення індентора.

Прилад оснащений комплексом інденторів різних видів та додатковими вантажами, що робить його придатним для великого асортименту різних матеріалів з широким діапазоном реологічних властивостей. Автоматична фіксація моменту зіткнення індентора з продуктом та електронна система реєстрації даних забезпечують високу точність вимірів. Погрішність виміру складає $\pm 0,1$ мм. Реверсивний двигун автоматично піднімає індентор у початкове положення після проведення вимірів, залишаючи отримані дані на обох цифрових індикаторах. Дані на приладі скидаються тільки після натиснення на кнопку "Пуск" при наступному вимірі.

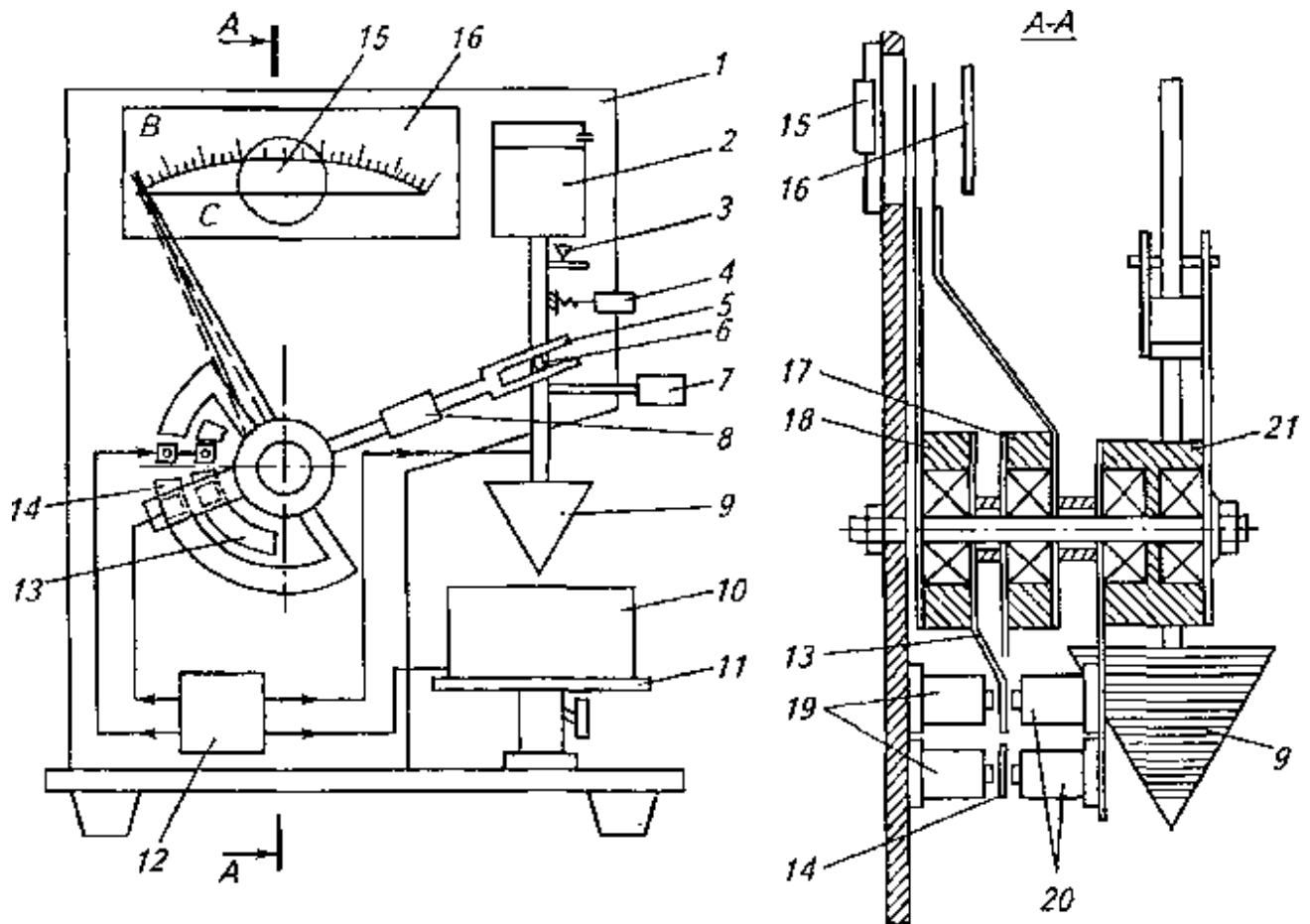


Рисунок 3.28 - Напівавтоматичний пенетрометр ПП- 5 :

- 1-корпус; 2 - демпферний пристрій; 3 – мікровимикач; 4 - фіксатор;
 5 - важіль; 6 - палець на штоку; 7-ручка підйому індентора;
 8 - противага; 9 – конус (індентор) з штоком; 10 - ємкість;
 11 - підйомний столик; 12 - блок управління; 13, 14 - пластини для
 фіксації відповідно до міри penetрації або максимальної глибини
 занурення індентора; 15 - рухома лінза; 16 - шкала; 17, 18 - барабани
 з вимірювальними стрілками для відліку максимальної величини
 занурення індентора та міри penetрації; 19 - магніти для фіксації
 стрілок при закінченні виміру; 20 - магніти для фіксації моменту зі-
 тнення індентора з продуктом; 21 - барабан з пластиною та магні-
 тами фіксації

Пенетрометр ПМДП наведений на рисунку 3.29.

У приладі застосована вимірювальна система, яка складається з двох дисків, що вільно обертаються, з'єднаних редуктором. На першому диску на однаковій відстані одно від іншого по концентричних колах виконані отвори.

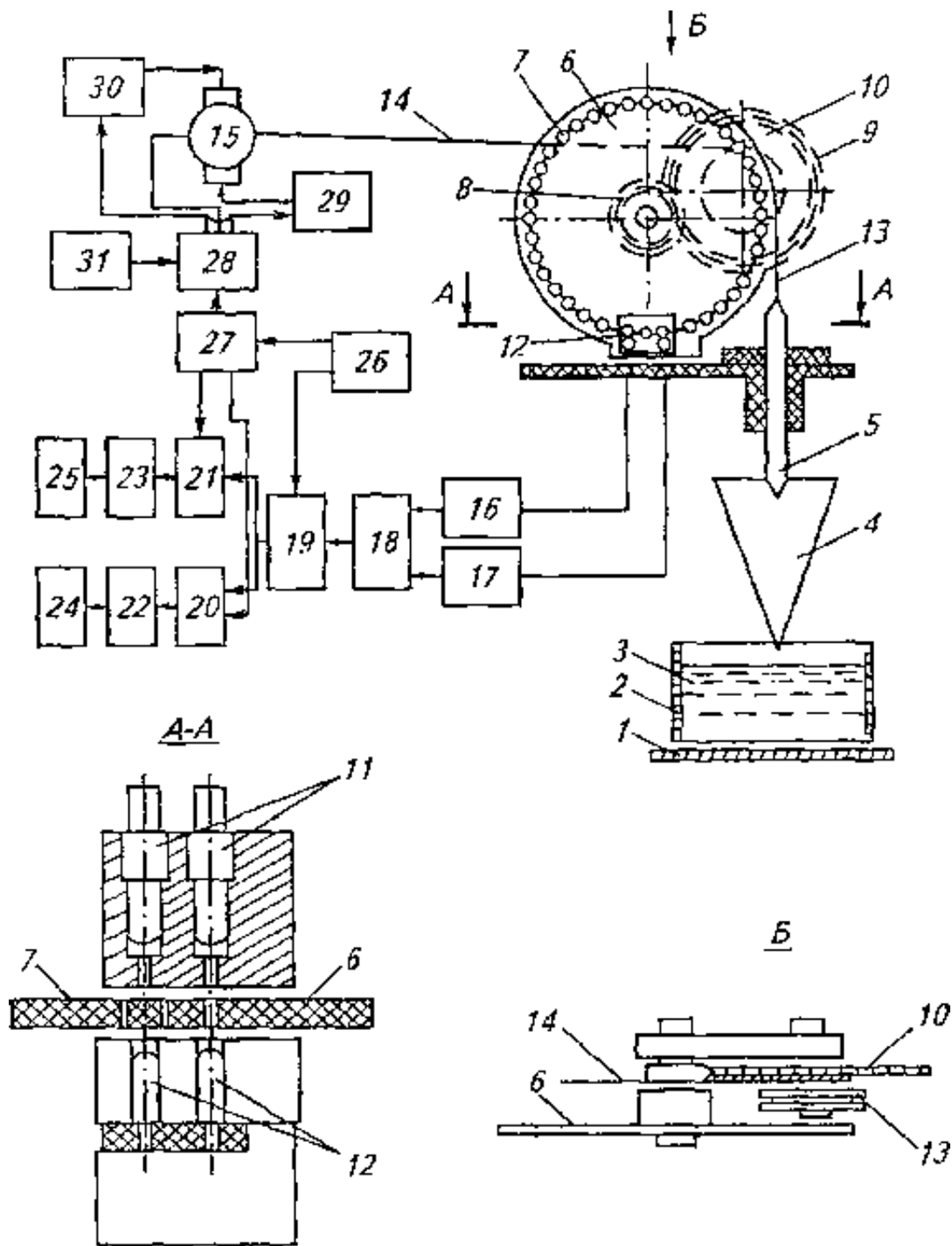


Рисунок 3.29 - Принципова схема пенетрометра ПМДП :

1 - предметний столик; 2 - ємкість; 3 - продукт; 4 - індентор; 5 - шток;
 6, 10 - диски; 7 - отвори; 8, 9 - шестерні; 11 - джерела світла; 12 - фоторезистори;
 13, 14 - гнучкі троси; 15 - електродвигун; 16, 17 - тригери; 18-сумматор;
 19, 20, 21 - логічні елементи; 22, 23 - лічильники - дешифратори; 24, 25 - цифрові індикатори;
 26 - електронний ключ; 27 - таймер; 28 - блок управління; 29, 30 - електромагнітне реле;
 31 - кнопка "Пуск"

На одній лінії з центром отворів розташовані з одного боку джерела світла, з іншого – фоторезистори. Другий диск має два шківки, на яких одним кінцем закріплені два гнучких троси. У моделі ПМДП-1 один з тросів пов'язаний з валом електродвигуна, а другий - зі штоком індентора.

У моделі ПМДП- 2 троси замінені рейковою системою. Прилад має цифровий блок, що складається з тригерів, сполучених з фоторезисторами штекером, який підключений до двох каналів індикації та симетричних тригерів. Кожен канал індикації складається з послідовно включених елементів: логічного елементу 2І-НБ, лічильника-дешифратора, цифрового індикатора та електронного ключа.

У пенетрометрі ПМДП передатне відношення складає 1:5, використовуються дві пари джерел світла та фоторезисторів.

Порядок роботи на пенетрометрі ПМДП наступний. Перед виміром шток з індентором знаходиться в початковому положенні та утримується тросом. Для приготування проби ємкість у вигляді циліндричної чаші щільно набивають фаршем, потім відпресовують його тиском Зразки виробів готують у вигляді циліндра заввишки 40...50 мм. При пуску приладу включається електродвигун, який, обертаючись за годинниковою стрілкою, розкручує трос, а штанга з індентором починає опускатися, приводячи в обертання перший диск з отворами. При обертанні першого диску на фоторезистори потрапляють по черзі світлові промені від джерел світла, що викликає стрибкоподібні зміни опору фоторезисторів, які є елементами тригерів. Тригери виробляють прямокутні імпульси з частотою зміни опору фоторезисторів. У суматорі імпульси підсумовуються та подаються на логічний елемент. У приладі автоматично фіксується момент, при якому індентор торкається продукту, внаслідок чого включаються електронний ключ та таймер. Перший подає струм на вхід першого логічного елементу, а другий - на входи наступних двох логічних елементів, після чого лічильник починає рахувати імпульси, які поступають від суматора та висвічуються на індикаторі.

Після розкручування троса на певну довжину, яка відповідає можливій максимальній глибині занурення індентора в продукт, електродвигун зупиняється, хоча шток з індентором за інерцією продовжує занурюватися. Досягши першого заданого часу (5...60 с) таймер подає сигнал на вхід логічного елементу, внаслідок чого до першого лічильника не пропускаються імпульси, які поступають від суматора при подальшому опусканні індентора. Після закінчення максималь-

ного часу (1...3 хв) таймер подає сигнал сумарного імпульсу на другий вхід логічного елемента, дані якого фіксуються другим індикатором. Одночасно включається електродвигун, який намотує на вал проти годинникової стрілки трос, що приводить в обертання диски, піднімаючи при цьому шток з індентором в початкове положення.

Пенетраційний метод оцінки консистенції пластично - в'язких та пружно - еластичних продуктів широко використовується в розвинених промислових країнах (США, Німеччина, Швейцарія, Японія та ін.), де прилади, які базуються на цьому методі, випускаються серійно різними фірмами.

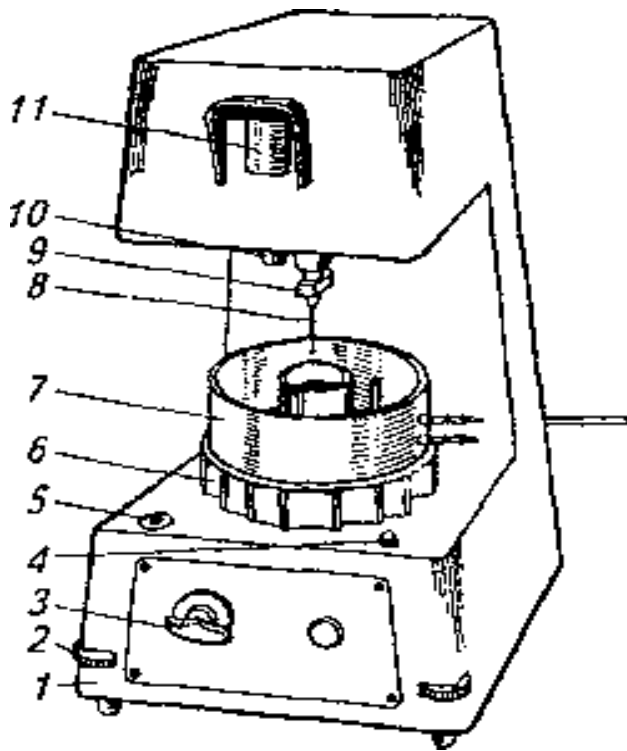
Пенетрометри ОВ-204, ОВ-203, ОВ-205 фірми Labor (Угорщина) наведені на рисунку 3.30.

У пенетрометрі ОВ-203 пуск та зупинку приладу після закінчення заданого часу здійснюють натисненням кнопки. Час вимірюють секундоміром, глибину penetрації відлічують за круглою шкалою, градуйованою на 360°. Границею виміру є 630 одиниць penetрації (0...0,063 м), габаритні розміри 0,32x0,3x0,75 м, маса близько 6 кг.

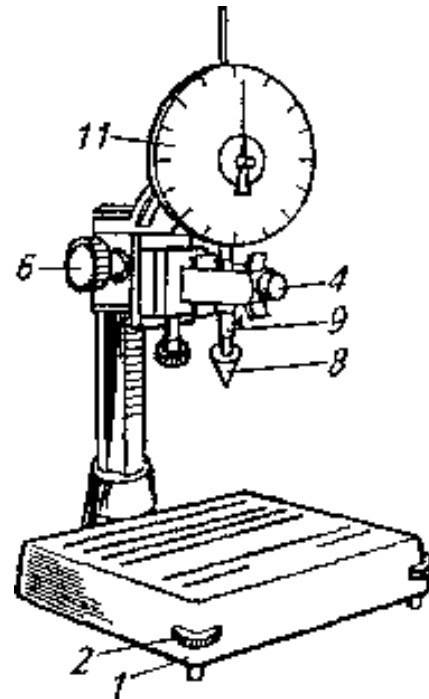
Автоматичні пенетрометри ОВ-204, ОВ-205 мають реле часу та гальмовий механізм. Ступінь penetрації можна відраховувати безпосередньо по шкалі за допомогою оптичної системи. Час penetрації вибирають залежно від виду продукту. Воно відповідає часу закінчення миттєвої деформації. Величина занурення індентора за цей час повинна складати не менше 70...80 % максимального значення. Точність спрацьовування реле часу 0,1 с.

В цих приладах передбачена можливість і ручного управління роботою приладу. Габаритні розміри приладу 0,39x0,28x0,54 м. Напруга мережі 220 В, частота 50 Гц. У приладів ОВ- 204 споживна потужність 50 Вт, маса близько 20 кг, у приладів ОВ-205 споживна потужність 25 Вт, маса 15 кг. Внаслідок того що стабільний стан приладу настає тільки після прогрівання, його слід включати за 30 хвилин до початку вимірів. Нульова корекція шкали, по якій відлічують міру penetрації, здійснюється гвинтом з накатною голівкою. Випробовуваний об'єкт встановлюють на столик та поєднують голку або конус з поверхнею матеріалу, не проникаючи в нього. Перед наступним випробуванням напрямну треба повернути у верхнє положення.

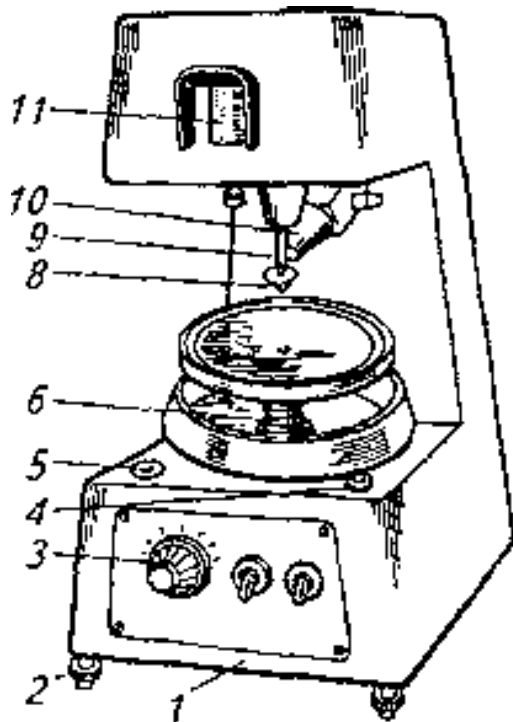
Використовуються **автоматичні пенетрометри АР 4/1 і АР 4/2** (Німеччина). Автоматичний пенетрометр АР4/2 (Німеччина), зображений на рисунку 3.31, складається з випробувального приладу та електромеханічного датчика часу.



а



Б



в

Рисунок 3.30 - Пенетрометри фірми Labor різних модифікацій:

- а - ОВ-204; б - ОВ-203; в - ОВ 205;
 1 - станина; 2 - настановні гвинти;
 3 - регулятор часу пенетрації;
 4 - кнопка пуску; 5 - рівномір;
 6 - підйомний гвинт; 7 - ємкість для термостатування;
 8 - індентор; 9 – затискна голівка,
 10 - лампа для освітлення робочого простору; 11 – шкала відліку

Технічна характеристика: діапазон вимірювання 0 - 0,04 м; тривалість випробування 5 - 130 с (ступенями в 5 с); температурний інтервал 10 - 35⁰С; габаритні розміри, м: основного приладу 0,258x0,17x0,578; датчика часу 0,32x0,272x0,16.

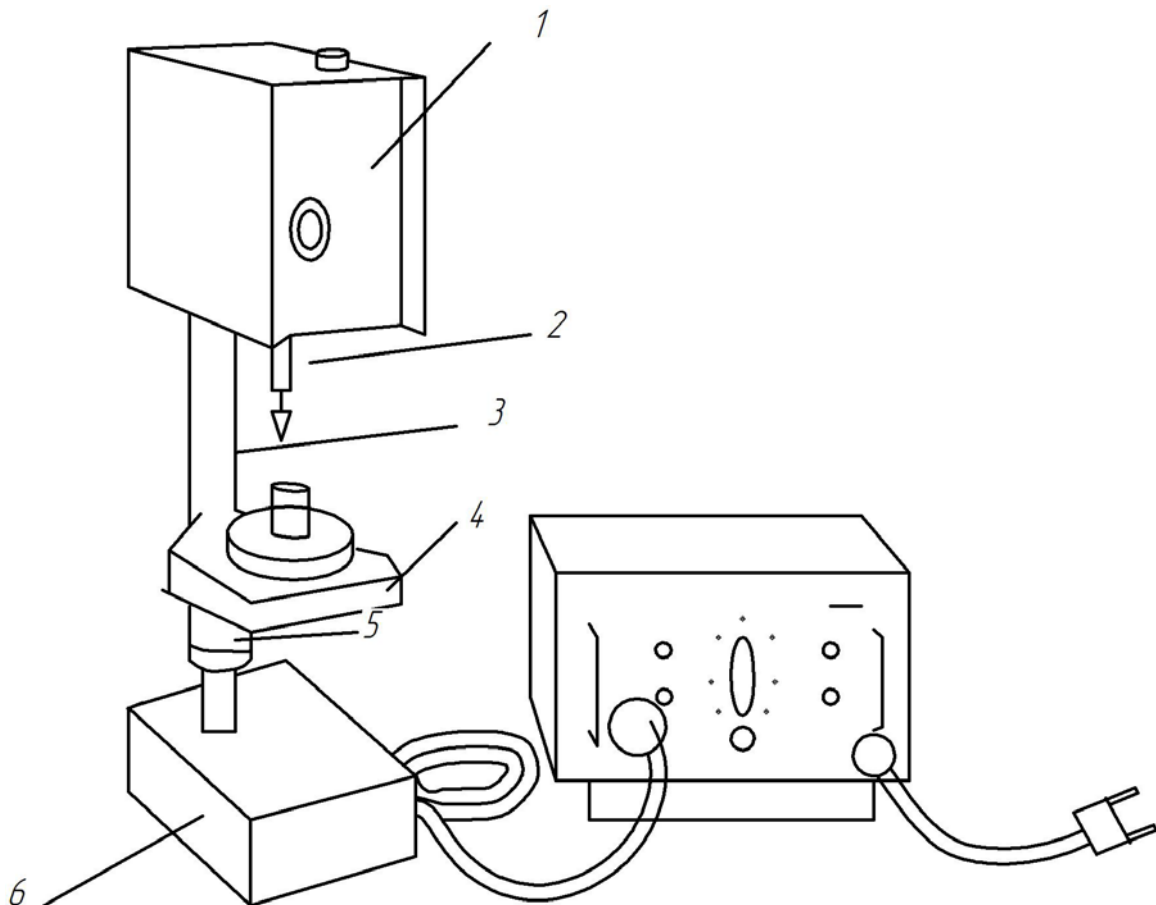


Рисунок 3.31 - Автоматичний пенетрометр Ap4/2:

- 1 - вимірювальна головка; 2 - падаюча система; 3 - стійка;
4 – вимірювальний столик; 5- гайка; 6 - плита

В Англії виробляють універсальні **пенетрометри "Сета - 1700 і - 1710", "Сетематик"**.

Розглянуті прилади ґрунтуються на методі впровадження індентора в продукт під дією сили тяжіння за певний час. Відмінність між цими приладами полягає в тому, що стикання індентора з продуктом здійснюється різними методами за допомогою приблизної та точної регульовальної системи (механічна, оптична, електрична), а також цифровою або стрілочною.

Пенетрометри PR-10 та PR-20 (Німеччина) відрізняються один від одного наступним. Перший з них вимірює величину впровадження індентора в продукт при заданому зусиллі впродовж певного часу, а другий фіксує зусилля, необхідне для проникнення індентора з постійною швидкістю в продукт на задану глибину. Можливе визначення зусилля при видаленні індентора з продукту. Прилад PR-20 має 10

програм вимірів різних реологічних характеристик і може додатково забезпечуватися автоматичним пристроєм для зміни досліджуваних проб впродовж тривалих серій експериментів.

Динамічний конічний пенетрометр (США) призначений для виміру реологічних характеристик в широкому інтервалі. Знімні пристрої дозволяють проводити випробування продуктів з малими значеннями реологічних характеристик, застосовуючи один елемент вантажу, а для продуктів з високими значеннями характеристик - обидва елементи вантажу.

Електронний реометр ЯМАМОТО (Японія) широко використовують в лабораторних умовах. Конструктивні особливості цього приладу полягають в тому, що в ньому змінний індентор сполучений безпосередньо з датчиком для виміру зусилля, а столик для вимірюваної проби має електропривод.

Цей прилад дозволяє впродовж 10 с одночасно проводити автоматичні контрольні виміри зусилля занурення індентора в продукт за допомогою спеціального стрілочного лічильника з системою фіксації максимального значення зусилля та глибини занурення індентора - електронною системою з цифровою індикацією. Для збільшення точності вимірів зусилля лічильник має дві ступені регулювання. Швидкість руху столика, на якому знаходиться випробовувана проба, і швидкість занурення індентора в продукт. Це універсальний лабораторний стаціонарний прилад, який має високу ступінь точності вимірів завдяки відсутності ремінного приводу та реле часу. Він простий у використанні. В Японії він використовується при стандартизації якості пластично-в'язких і пружно - еластичних продуктів. Окрім перерахованих переваг прилад має і недоліки. Конструкція реометра складна, окремі вузли приладу (наприклад, система виміру зусилля, електронний блок та ін.) у разі поломки замінюються повністю, внаслідок чого вартість і обслуговування занадто високі. Значна маса приладу 8 кг та габарити 0,27x0,26x0,42 м не дозволяють його використати безпосередньо на робочих місцях.

Пенетрометр ППМ- 4, розроблений Дослідницьким центром ім. М. В. Келдиша спільно з МГУПБ, використовують для контролю якості пружно - еластичних продуктів за величиною динамічного граничного напруження зсуву. Принцип дії приладу базується на методі ручного впровадження індентора в продукт. Після досягнення заздалегідь заданого зусилля опору продукту глибина занурення індентора фіксується за допомогою цифрової індикації. Прилад має барабан з

чотирма пружинними гільзами та забезпечує зусилля стискування 5; 20; 50 і 100 Н для зміни границь виміру реологічних характеристик. Прилад ППМ- 4 забезпечує високу точність виміру реологічних характеристик.

Принципова схема приладу ППМ- 4 наведена на рисунку 3.32. Прилад складається з наступних елементів: корпусу, штоку зі знімним індентором, який забезпечує передачу зусилля, що викликаються опором продукту, барабана з гільзами фіксованого зусилля (5; 20; 50; 90 Н), рухливої штанги з опорою. Опора, яка прилягає під час виміру до поверхні продукту, закріплена на штоку за допомогою шарнірних опор та спеціального механізму. При відхиленні приладу від нормалі до поверхні продукту в межах до 20° опора забезпечує торкання індентора, фіксуючи початок відліку даних. Рухлива штанга сполучена з редуктором. На вихідному валу редуктора є перфорований диск - складова частина електронно-оптичного перетворювача. Створюваний опорою тиск на продукт в процесі виміру не перевищує 100 Па. За допомогою барабана гільза із заданим зусиллям встановлюється в робоче положення. Досягнувши заданого зусилля опору продукту, спрацьовує механізм формування сигналу. На корпусі встановлені: вимикач ланцюга живлення, світлоцифрові індикатори, які показують величину занурення індентора в продукт, і світловий індикатор, що сигналізує досягнення заданого зусилля. Джерело живлення 9 В, електронні плати встановлені в руків'ї приладу, на якому є гніздо для підключення зовнішнього живлення.

Прилад працює таким чином. Включають ланцюг живлення; встановлюють опору на об'єкт дослідження і впроваджують індентор у продукт. Опора, знаходячись на поверхні продукту, переміщається відносно індентора.

Поступальний рух опори перетворюється через редуктор в обертальний рух перфорованого диска електронно-оптичного перетворювача. Імпульси перетворювача поступають в лічильник. Глибина занурення індентора в продукт у вигляді імпульсів фіксується на тризарядному цифровому індикаторі. Зусилля опору продукту, яке він оказує на індентор, передається через шток на стрижень гільзи. Досягнувши заданого зусилля, стрижень гільзи починає переміщатися, формуючи при цьому сигнал в електронно-оптичному перетворювачі, який висвічується на цифровому індикаторі. Одночасно включається світловий індикатор, який сигналізує про закінчення вимірів, з нього прочитують отримані результати дослідження.

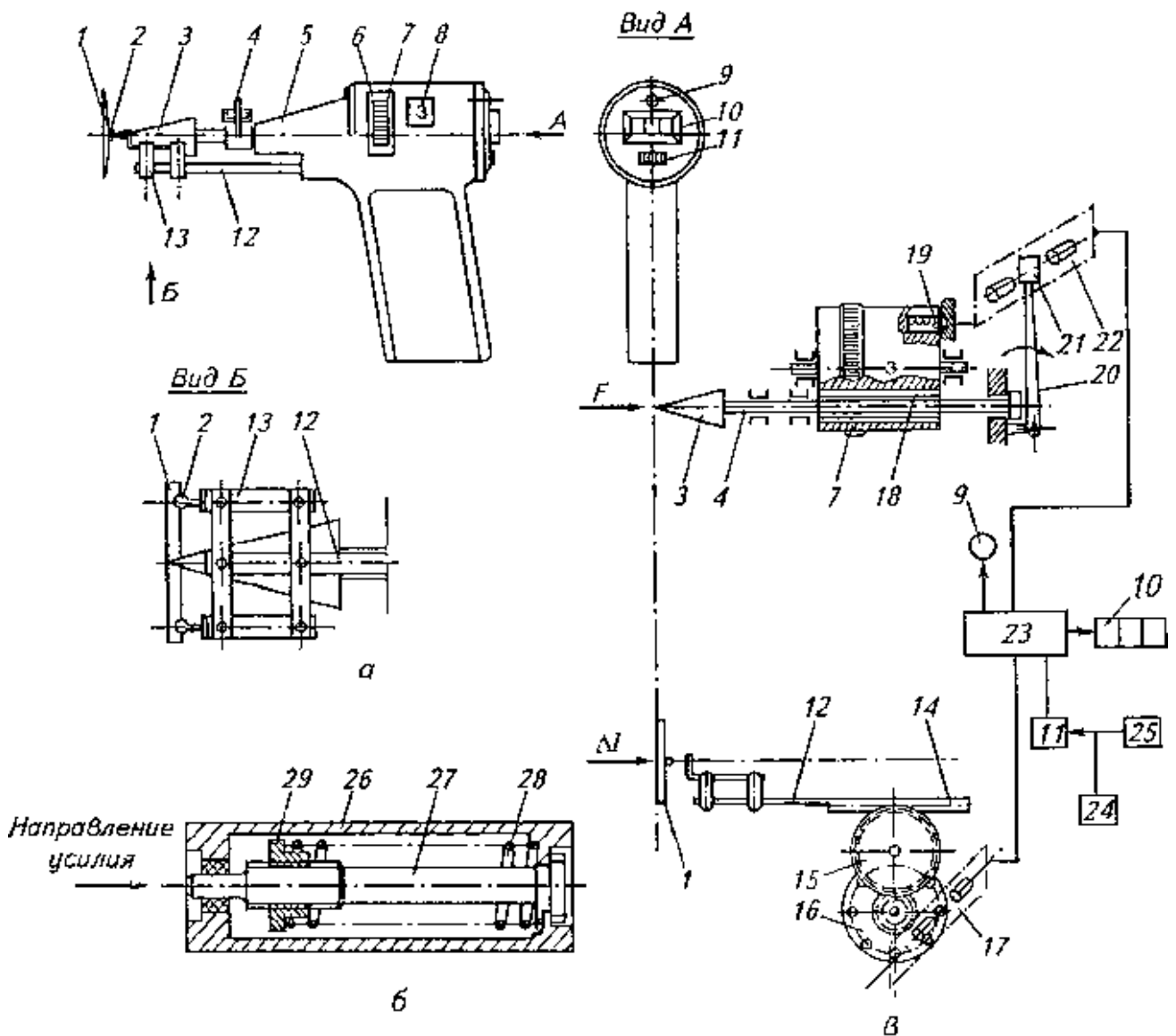


Рисунок 3.32 - Пенетромтр ППМ- 4:

а-принципова схема; б- гільза фіксованого зусилля; в – електронно-оптичний перетворювач силового та лінійного показників;
 1 - опора; 2 - кульова опора; 3 - знімний індентор; 4 - шток; 5-корпус;
 6 - вікно фіксатора зусилля; 7-барaban; 8 - вікно контролю значення сили; 9 - світловий індикатор; 10 – світлоцифрові індикатори;
 11 - вимикач ланцюга живлення; 12 - рухлива штанга; 13 – шарнірний механізм; 14 - зубчаста рейка; 15 - редуктор; 16 – перфорований диск;
 17 - електронно-оптичний перетворювач; 18 - гільзи з фіксованим зусиллям; 19 - кульковий стопор; 20 - кінематична ланка; 21 - шторка;
 22 - електронно-оптичний перетворювач; 23 - лічильник; 24 - джерело живлення; 25 - гніздо підключення; 26 - корпус фіксованого зусилля;
 27 - стрижень; 28 – пружина; 29 - опора під пружину

Питання для самоконтролю

1. За якими залежностями обчислюється величина граничного напруження зсуву при дослідженнях з використанням конічного шарометру П. А. Ребіндера Н. А. Семененко?

2. За якими залежностями обчислюється величина граничного напруження зсуву при дослідженнях з використанням шарометру С. С. Жуковського та Л. М. Гуткіна?

3. Для виміру характеристик яких продуктів призначений консістометр В. П. Табачникова та Е. Я. Баркова?

4. Конструкції яких пенетрометрів, розроблених вітчизняними та зарубіжними дослідниками, ви знаєте?

5. Конструкції яких шарометрів, ви знаєте?

3.4 Методи та прилади для вимірювання компресійних характеристик

Разом зі зрушенням об'ємний або осьовий стиск, а також осьовий розтяг є основними типами механічної деформації продуктів. Способи вимірювання цих характеристик наведені на рисунку 3.33.

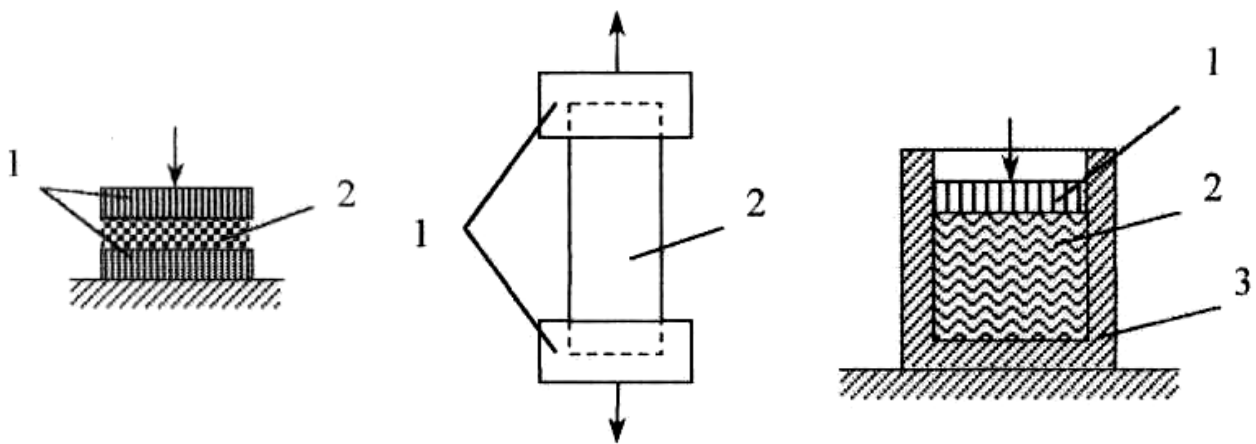


Рисунок 3.33 - Принципові схеми приладів для вимірювання компресійних характеристик:

а - осьовий стиск: 1 - пластини; 2 - продукт;

б - осьовий розтяг: 1 - затискачі; 2 - продукт;

в - односторонній об'ємний стиск: 1 - поршень; 2 - продукт;
3 – циліндр

3.4.1 Прилади для осьового стиску продукту

Методика роботи практично однакова для всіх приладів. Конструктивні схеми розрізняються за способом приводу пластини: знизу (рисунок 3.34) та зверху (рисунок 3.35), від електродвигуна або безпосередньо від вантажу.

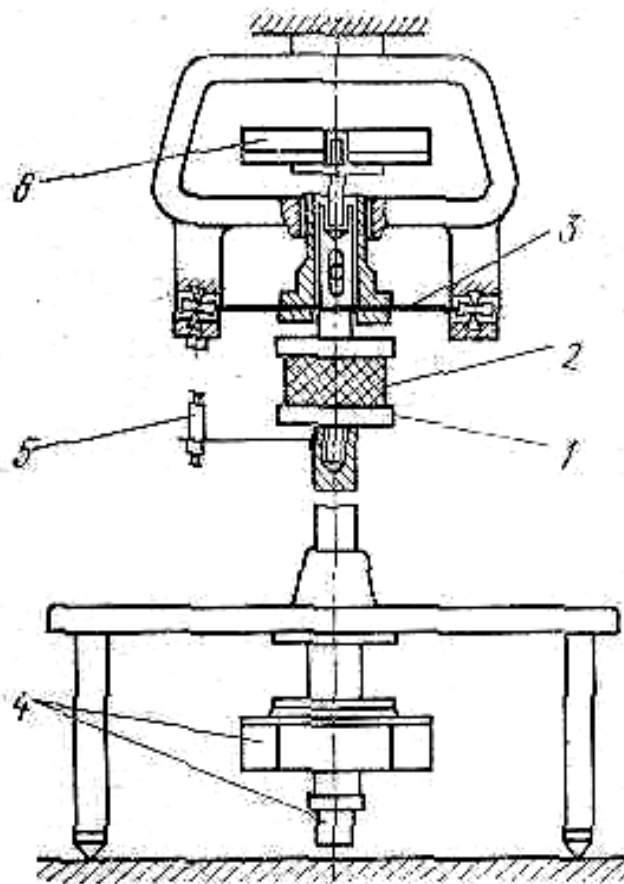


Рисунок 3.34 - Універсальний прилад ВДІМПА для вимірювання компресійних характеристик при осьовому стиску м'ясопродуктів:

- 1 - рухомий шток; 2 - зразок продукту;
- 3 - тензометрична балка; 4 - редуктор і коробка швидкостей; 5 – електричний датчик; 6 - тримач вантажів;

вимірювального органу, які є круглими пластинами однакової системи. Зразок закріплений на рухомому штоку, а вимірювальний орган кріпиться в порожнистому патроні.

Універсальний прилад ВДІМПА (рисунок 3.34) складається з основи, до якої жорстко приєднані реверсивний електродвигун з редуктором та коробка передач.

На вихідному валу коробки встановлений рухомий шток з утримувачем робочого органу зі зразком продукту. На основі встановлена стійка з кронштейном на якому розташована тензобалка з тензорезисторами. У центрі тензобалки знаходиться порожнистий патрон, що має крізний отвір, в який вставляють одне з вимірювальних пристосувань. У центрі кронштейна є отвір, через який в отвір вимірювального пристосування входить хвостовик утримувача вантажів.

Вимірювальне пристосування для визначення осьового стиску і адгезії складається з утримувачу і

Дефометр МТІММПа дозволяє реєструвати одночасно деформації та навантаження у часі Стиск зразку здійснюється між двома полірованими пластинами завдяки переміщенню верхньої пластини штовхачем, розташованим у напрямних. Нижня пластина нерухомо закріплена на основі. Прилад приводиться до дії від електродвигуна постійного струму. У верхній частині корпусу встановлений столик з тензометричною балкою. Штанга - гайка отримує оборотно - поступальний рух від гвинта, сполученого з електродвигуном через редуктор і варіатор. Циклічні навантаження на зразок створюють заміною шківів ексцентриком. Зусилля стискування сприймається пружним елементом з тензометричними датчиками, які підключені до вимірювального самописного потенціометру.

Деформація зразку реєструється резистором змінного опору, підключеним до самописного потенціометра. Прилад (рисунок 3.35) дозволяє досліджувати характеристики продуктів при осьовому стиску та розтягу.

Між пластинами поміщають зразок продукту, верхню пластину підводять до зразку без навантаження і встановлюють відмітку осцилографа на нуль. Під час випробування при включеному приводі механізму опускання - підйому пластини записують напруження - час. Випробування повторюють при різній швидкості деформації зразків. Погрішність приладу складає $\pm 3\%$. Прилад також може використовуватися для визначення липкості продуктів.

Прилад Б. А. Николаєва і А. С. Шпігельгляса [34] складається із станини, в якій переміщається опорна стойка столика. Випробовуваний продукт поміщається між паралельними площинами дисків; верхній з них може переміщуватися під дією вантажу; він пов'язаний з рейкою, що входить в зачеплення з шестернею, на осі якої закріплена стрілка.

На столику укладають зразок та визначають його первісний розмір, потім швидко піднімають столик і встановлюють вантаж. Визначають величину миттєвої деформації за шкалою, а також зміну деформації, відлічуючи час по секундоміру. На приладі можна визначити миттєво-пружну деформацію, модуль пружності стиску, в'язкість і граничне напруження зсуву матеріалу.

Визначення характеристик харчових продуктів при осьовому стиску може проводитися також на деяких типах пенетрометрів, наприклад АР4/2, при заміні індикатора робочим органом у вигляді круглої пластини.

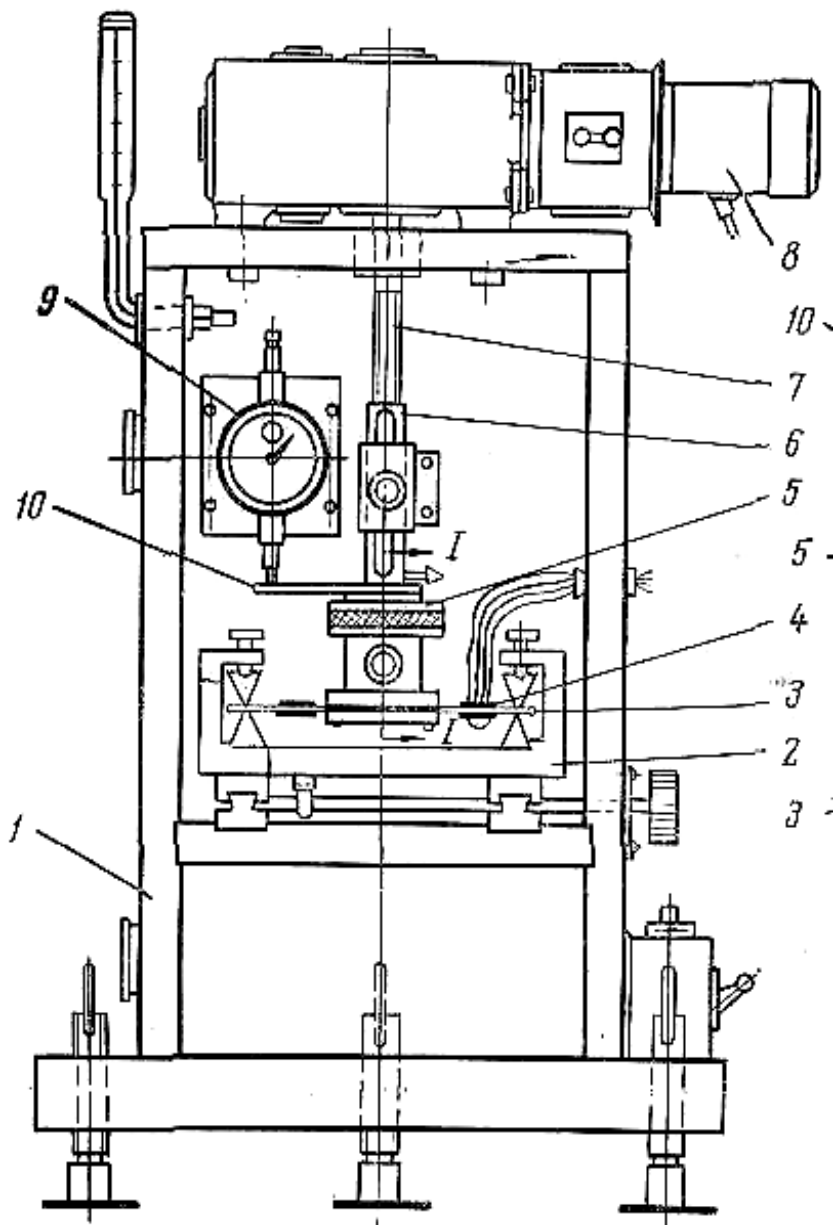


Рисунок 3.35 - Прилад для вимірювання компресійних характеристик та адгезії продуктів:

- 1 - корпус;
- 2 - висувний столик ;
- 3 - тензометрична балка; 4 – тензодатчики; 5 - кріплення нижньої пластини;
- 6 - рухома штанга-гайка; 7 – гвинт;
- 8 – корпус;
- 9 – електродвигун;
- 10 - пластина-поперечка

3.4.2 Прилади для об'ємного стиску продукту

Компресійний калориметр Мосм'ясокомбінату та МТІ-ММПа, наведений на рисунку 3.36. дозволяє визначати як реологічні, так і теплофізичні властивості пластично-в'язких продуктів при різних тисках. Прилад складається з циліндра, усередині якого з протилежних сторін встановлені поршні. Верхній поршень закріплений нерухомо на корпусі, нижній поршень закріплений на рухомому штоку, з яким нерухомо сполучений плунжер індукційної котушки. Деформації можна спостерігати візуально і записувати за допомогою потенціометра по сигналах, отриманих від переміщення сердечника в індукційній котушці.

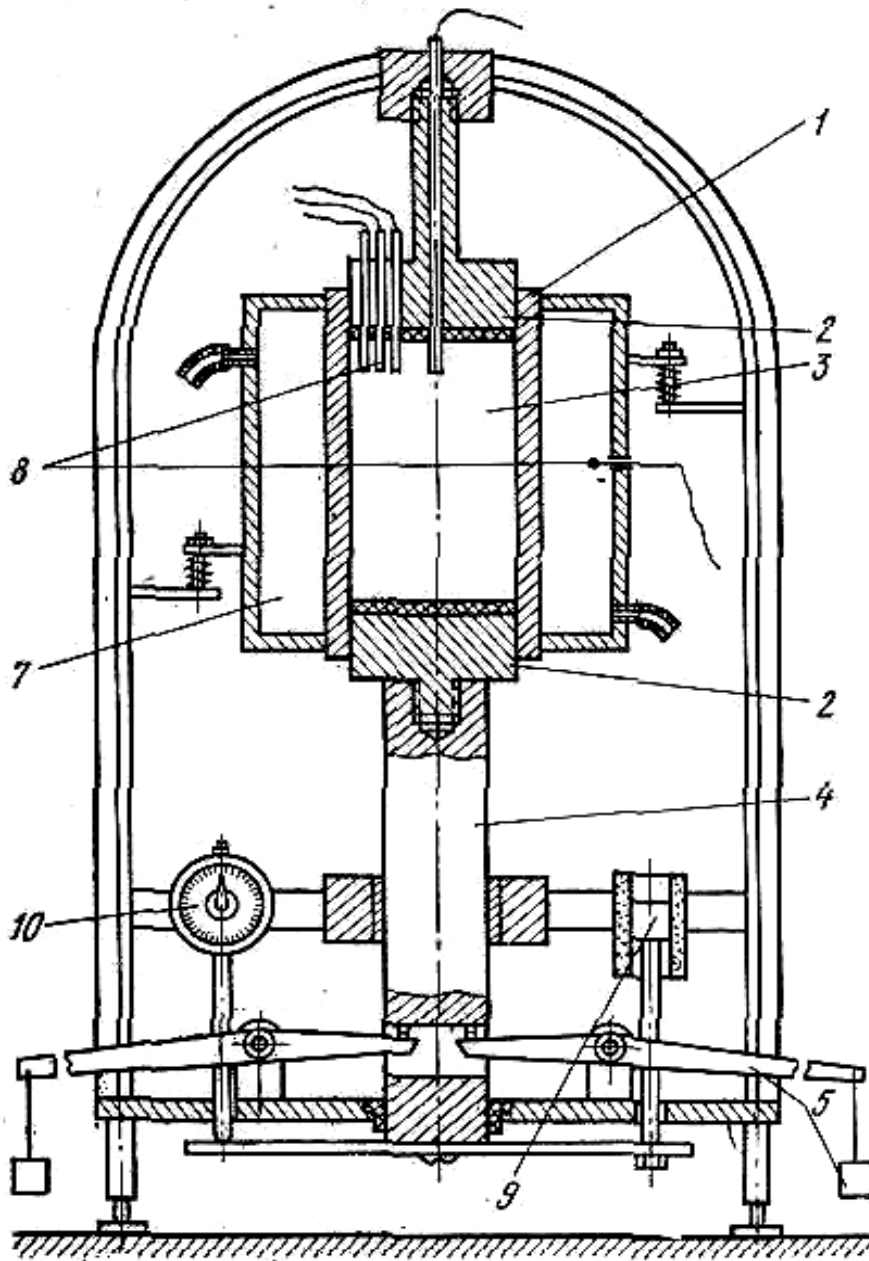


Рисунок 3.36 -
Прилад для
вимірювання
компресійних ха-
рактеристик при об'-
ємному стиску про-
дуктів.
Компресійний ка-
лориметр:

- 1 - вимірювальний
циліндр; 2 – порш-
ні; 3 — продукт;
- 4 – рухомий шток;
- 5 – вантажі;
- 7 - водяна сорочка;
- 8 – термопари;
- 9 – плунжер;
- 10 - індикатор го-
динного типу

Консистометр Геплера (рисунок 3.37) використовується в дослідницьких і виробничих лабораторіях. До недоліків приладу можна віднести те, що вимірювальний циліндр вміщує малу кількість продукту. Модернізація приладу, яка полягає у виготовленні нових циліндрів різного діаметру, дозволила усунути цей недолік.

Результати експериментів, проведених на цих приладах, дозволяють обчислити відносні деформації та побудувати кінетичні залежності. Оскільки маса продукту в циліндрі відома, ці ж експерименти дають можливість визначити щільність при різних тисках. Тиск на продукт від поршню розраховується по масі вантажів, тиск на стінку — зміряти месдозами. Знаючи бічний тиск в трьох точках по висоті

циліндра, можна скласти картину розподілення тиску в циліндрі.

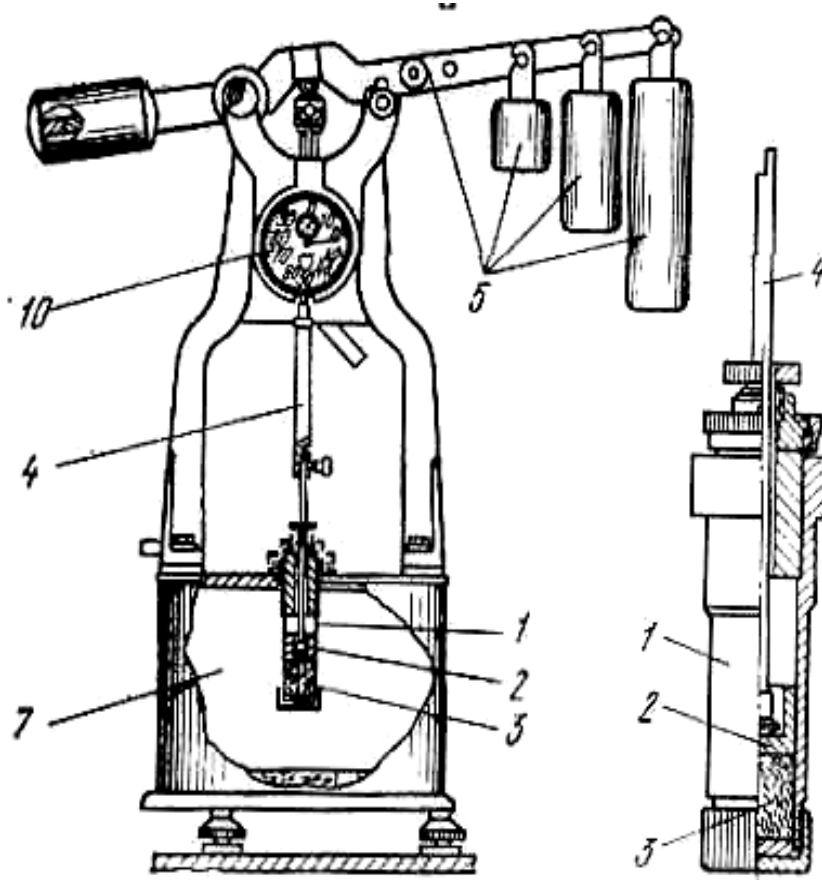


Рисунок 3.37 - Прилад для вимірювання компресійних характеристик при об'ємному стиску продуктів. Консистометр Гепплера:

- 1 — циліндр для продукту; 2 — поршень;
- 3 — продукт;
- 4 — шток, який передає зусилля тиску;
- 5 — устаткування, яке створює тиск;
- 7 — термостат;
- 8 — водяна сорочка;
- 9 — термопарі;
- 10 - індикатор годинникового типу

Для вивчення впливу вібрації при об'ємному стиску продукту використовують прилад Ю. А. Мачихина та А.С. Максимова. Він має циліндр з водяною сорочкою, датчик тиску та поршень, який навантажується гвинтовою системою. У нижній частині приладу встановлений вібропоршень, жорстко пов'язаний з ексцентриковим вібратором, який створює коливання в продукті.

3.4.3 Прилади для розтягу продукту

У приладі Ю. А. Мачихина, В. Н. Данилова та Г. П. Комогорова, наведеному на рисунку 3.38, деформації піддають зразки (наприклад, тісто) з постійними розмірами.

Кінці плаваючого на поверхні розчину зразку закріплюються в затисках, один з яких нерухомий. Вимірювальна частина є мірною лінійкою, закріпленою на напрямній. Концентрація сольового або цукрового розчину підбирається такою, щоб зразок вільно плавав на поверхні. Навантаження зразку проводиться за допомогою вантажів.

Фіксатор звільняє стрижень, і під дією вантажу зразок подовжується. Після припинення деформації стрижень фіксується та записується величина подовження. Деформація зразку проводиться до розриву.

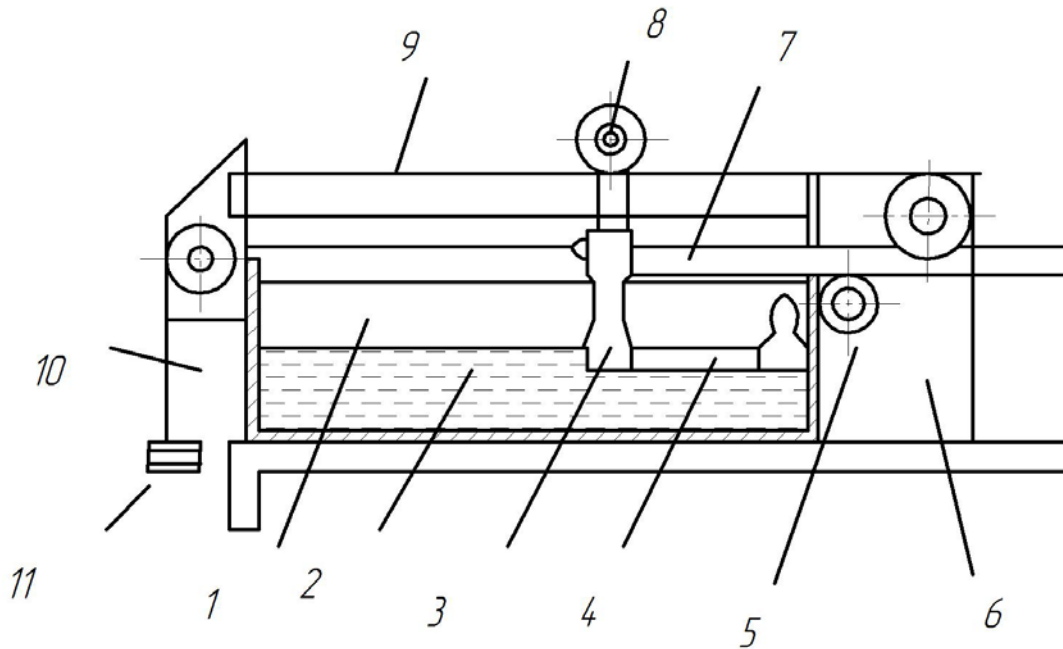


Рисунок 3.38 - Прилад для вимірювання характеристик при розтягу продуктів з горизонтально розташованим зразком:

- 1 - ванна; 2 - розчин; 3 - затиски; 4- зразок продукту; 5 - ролик;
6 - кронштейн; 7- стрижень; 8 - ролик; 9 - мірна лінійка; 10 - нитка;
11 - вантаж

Технічна характеристика: діаметр зразку 0,01 м; довжина 0,1 м; максимальне абсолютне подовження зразку 0,3 м; габаритні розміри приладу, м: 0,15x0,15x1,0 м.

Прилад Н. І. Назарова та Ю. В. Калініна має вертикальне розташування зразку (рисунок 3.39). Зразок, закріплюється в затисках та піддається розтягу за допомогою гвинта. Зразок розміщується в закритій камері, де розташовані гігрометр, нагрівальний елемент, термометр електроконтакту та вентилятор. Зусилля від зразка передається на пружний елемент. Зразок має прямокутний перетин.

Отримана осцилограма має дві ділянки: перша характеризує пружні властивості матеріалу; друга - пластичні (границя міцності σ_M та відносне залишкове подовження ε).

Ці величини визначаються за формулами:

$$\sigma_n = P_n / F_0. \quad \varepsilon = [(l_k - l_0) / l_0] 100\%, \quad (3.21)$$

де P_n - максимальне навантаження у момент пластичної деформації, Н; F_0 - початковий поперечний перетин зразку, м²; l_0, l_k - початкова довжина зразку та у момент розриву, м відповідно.

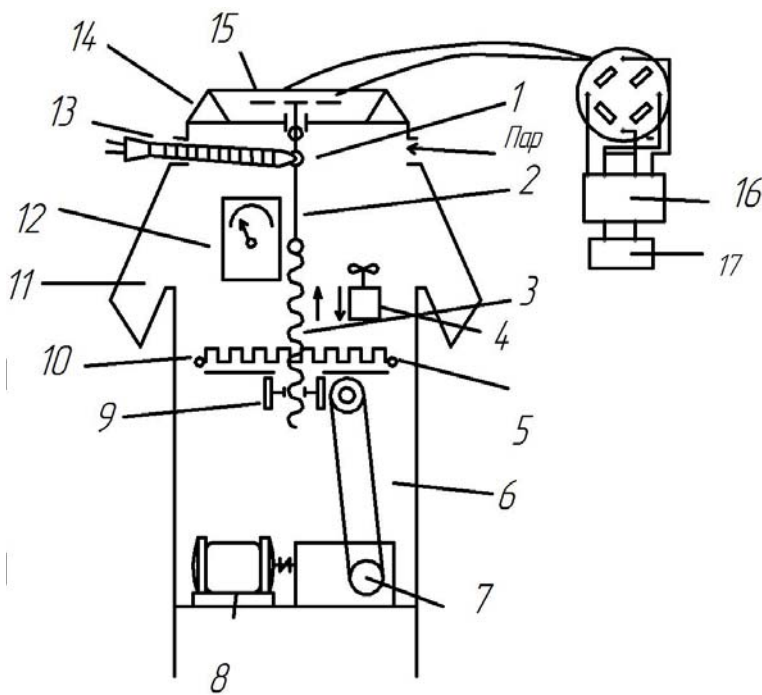


Рисунок 3.39 - Прилад для вимірювання характеристик при розтягу продуктів з вертикально розташованим зразком:

- 1 - затиски; 2 - зразок;
- 3 - гвинт; 4 - вентилятор;
- 5 - камера; 6 - ланцюгова передача; 7 - коробка передач; 8 - електродвигун;
- 9 - гайка; 10 - нагрівальний елемент; 11 - рукави;
- 12 - гігрометр; 13 - термометр; 14 - пружний елемент; 15 - тензодатчики;
- 16 - підсилювач;
- 17 - осцилограф

Для дослідження розтягу (зазвичай хлібопекарського тіста) користуються приборами, в яких циліндр з тіста закріплюють горизонтально та деформують вертикальною силою, прикладеної до середини. На приборі визначають модуль пружності, вплив тривалості замісу і відлежи, а також вплив обробки тіста на його пластичні властивості.

На рисунку 3.40 наведена схема **екстенсографу фірми «BRABENDER»**. Тісто замішується до певної консистенції, ділиться на шматки по 0,15 кг, потім з них за допомогою валків формують циліндри, які надалі піддаються відлежи протягом 45 хв. Від переміщення тісто утримується скобами. Важіль 8 отримує рух від електродвигуна та переміщується з постійною швидкістю перпендикулярно до осі циліндру. Зусилля, що виникають при розтягу, через систему важелів 3 передаються механізму 4, до якого приєднаний важіль, що записує.

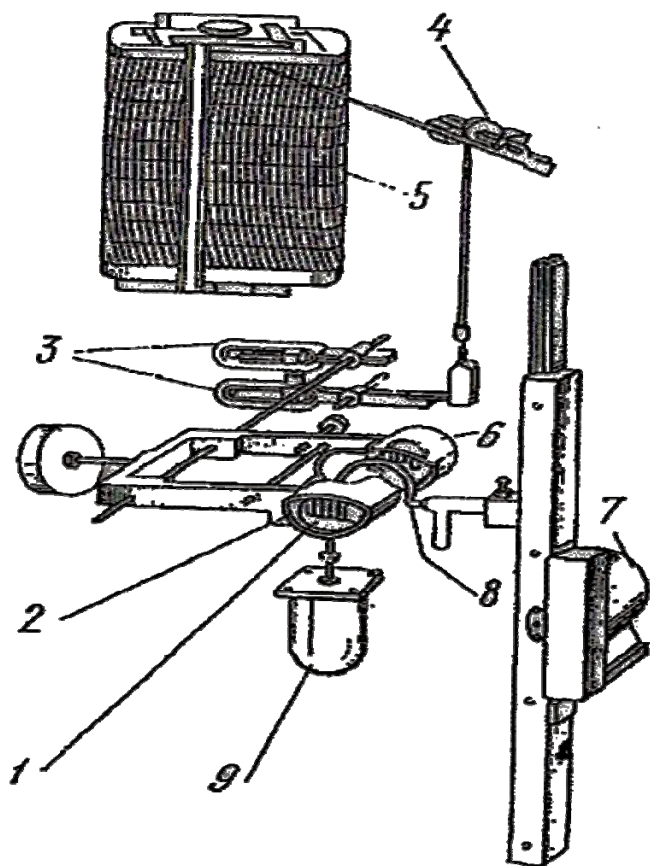


Рисунок 3.40 – Екстенсограф:

- 1 – тестовий циліндр; 2 – утримувач;
 3 – система важелів; 4 – механізм запису;
 5 – прилад для реєстрації;
 6 – скоба; 7 – електродвигун;
 8 – важіль; 9 - амортизатор

4. Які характеристики можна визначати з застосуванням для вимірів приладу Б. А. Николаєва і А. С. Шпігельгляса?

5. Які властивості продукту дозволяє визначити компресійний акалориметр Мосм'ясокомбінату та МТІММПа?

6. Які величини дозволяють визначати результати експериментів, проведених на консистометрі Гепплера?

7. Для яких умов при об'ємному стиску продукту використовують прилад Ю. А. Мачихина та А.С. Максимова?

8. Який принцип роботи має прилад Ю. А. Мачихина, В. Н. Данилова та Г. П. Комогорова?

9. Які ділянки має осцилограма, і що визначається за цією осцилограмою, отриманою на приладі Н. І. Назарова та Ю. В. Калініна?

Пристрій для реєстрації 5 включається одночасно з двигуном. На папері, який переміщується зі швидкістю 390 мм/хв, малюється крива розтягу тіста – екстенсограма. При обриві тестового джгута пристрій реєстрації авто-матично вимикається.

Питання для самоконтролю

1. Які основні типи механічної деформації продуктів та способи вимірювання цих характеристик?

2. Чи відрізняються методики роботи для всіх приладів для осьового стиску продукту?

3. Які вузли має вимірювальне пристосування для визначення осьового стиску і адгезії універсального приладу ВНДІМПа?

10. Який принцип роботи екстенсографу фірми «BRABENDER»?

3.5 Універсальні прилади

Універсальна випробувальна машина «Інстрон» (Англія) застосовується у ряді країн для визначення реологічних властивостей м'яса, готових м'ясопродуктів та інших виробів. На ній можна випробувати зразки на розтяг, стиск, знакозмінні навантаження, кручення, визначають релаксацію напружень, чутливість продукту до швидкості деформації, підраховують енергію деформації і релаксації.

Рухома траверса машини приводиться до руху двома гвинтами та вільним від люфту пристроєм. Швидкість вимірювання реологічних властивостей регулюється системою синхронного двигуна, який незалежно від навантаження забезпечує постійну швидкість деформації зразку. Велика точність показань машини дозволяє застосувати її для контролю деяких якісних характеристик м'яса і м'ясопродуктів.

Для збільшення точності виміру певної групи продуктів підбирають відповідний датчик навантаження, за допомогою якого можна регулювати верхню і нижню границі вертикального переміщення траверси. Електронні блоки управління дозволяють в широких межах змінювати швидкість деформації зразків (від 0,5 до 1000 мм/хв), значення деформуєчих навантажень (від 0,1 Н до 5 кН).

Для виміру структурно-механічних характеристик об'єктів у встановлену на траверсі вимірювальну голівку за допомогою спеціального адаптера кріплять активний робочий елемент. Під ним на спеціальному тримачі розміщується відповідний пасивний елемент або ємкість з досліджуваним об'єктом. Активний робочий елемент, деформуючи або руйнуючи досліджуваний об'єкт, сприймає його реакцію і передає на тензочутливий елемент вимірювальної голівки, де силова дія на тензодатчик перетворюється в електричний сигнал, який поступає в блок управління самописця. Перо самописця викреслює на рухливій діаграмній стрічці криву, яка характеризує залежність зміни реакції досліджуваного об'єкту від тривалості дії активного робочого елемента. Тобто, універсальні прилади забезпечують вимір комплексу структурно-механічних характеристик достатньо точно, і отримані експериментальні дані їх достовірні. Проте для визначення параметрів за допомогою цих приладів потрібен тривалий час на проведення експерименту та обробку експериментальних даних. Тому універса-

льні прилади не придатні для вживання у виробничих умовах при оцінці якості продукції і для врахування міри обробки продукту на всіх стадіях технологічного процесу. Для цієї мети необхідні прилади, які дозволяють визначати експрес - методом або в потоці основні величини, що реагують більшою мірою на зміну технологічних і механічних чинників.

Альвеограф (виробник Chopin, Франція) (рисунок 3.41) призначений для визначення реологічних властивостей тіста (пружна і загальна деформація тіста, робота деформації тіста, еластичність).



Рисунок 3.41 – Загальний вигляд альвеографу

Альвеограф передбачає проведення експерименту при постійній вологості тіста. Цей прилад пропонується до постачання виключно у складі приладу альвео-консистограф. Альвео-консистограф є альвеографом, місильна ємкість якого обладнана датчиком тиску для визначення консистенції (в'язкості) змішаного тіста. За консистенцією тіста судять про водопоглинальну здатність борошна і, виходячи з цього значення, дозують при замісі тіста таку кількість води, яка приводить до здобуття тістом оптимальної консистенції (їй відповідає

тиск 2200 мбар). Відповідно альвеоконсистограф передбачає проведення експерименту при постійній консистенції тіста. Користувач, працюючи на альвео-консистографі, може не враховувати оптимальну консистенцію тіста, а замішувати його при постійній вологості. Тобто альвео - консистограф дозволяє провести експеримент з тими ж параметрами, що і альвеограф. Установка відповідних налаштувань, а також виведення результатів аналізу виробляються через спеціальний блок-приставку альвеолінк, який входить до комплекту.

На початку кожного робочого дня проводиться калібрування тиску повітря. Після його проведення здійснюють заміс тіста. При роботі з альвеографом на заміс подають 250 г борошна та 2,5% розчин солі в кількості, залежній від вологості борошна (при використанні борошна з фактичною вологістю 15% вносять 125 мл розчину солі, що відповідає вологості тіста 43,3%). При роботі на альвео-консистографі виробляють заміс, використовуючи ті ж інгредієнти в тих же кількостях, але при цьому реєструють тиск тіста в процесі його замісу. Якщо тиск відрізняється від 2200 мбар, то прилад автоматично видає рекомендацію змінити кількість борошна та води, після чого заміс проводять знову стільки разів, доки тиск тіста не досягатиме 2200 мбар.

Після замісу тісто випресовують, ділять на шматки, розкочують, формують та ставлять на відлежу в камеру. Після відлежи млинчик тіста укладають на приймальний столик, який фіксується за допомогою кільця, після чого виробляють його надування у форму кулі до розриву. На початковому етапі експерименту при збільшенні тиску повітря проба тіста проявляє свої пружні властивості. Далі під тиском повітря тісто роздувається в кулю та проявляє свої пружно-пластичні властивості. У певний момент часу відбувається розрив кулі, тісто проявляє свої властивості міцності.

Альвеограф/альвео-консистограф використовується для оцінки технологічних властивостей борошна та визначення його цільового призначення. Так, борошно, яке дає тісто з порівняно високою загальною і низькою пружною деформацією придатне, наприклад, для приготування печива.

Випробувальна машина (текстурометр) TA.XT plus, виробник STABLE MICRO SYSTEMS (Англія) - сучасний інструмент для вивчення реологічних властивостей речовин.

Випробувальні машини компанії STABLE MICRO SYSTEMS (рисунок 3.42) дозволяють проводити фундаментальні, емпіричні та

імітуючи тести для дослідження реологічних властивостей твердих речовин, в'язких рідин, порошоків і гранульованих матеріалів.



Рисунок 3.42 – Загальний вигляд випробувальної машини TA.XT plus

Вони дозволяють оцінити твердість, еластичність, міцність, в'язкість, текучість, консистенцію, адгезію та інші параметри продуктів.

Безперечні переваги даних приладів — універсальність (можливість використання як для нових розробок, так і для технологічного контролю; можливість проводити тести відповідно до міжнародних стандартів і специфічні дослідження; великий вибір приставок для широкого кругу вживань, отримання найбільш точних результатів та уловлювання щонайменших відмінностей зразків.

Сфери застосування. Молочна промисловість: щільність сирів, маргарину, масла; консистенція вершків, йогуртів. М'ясна промисловість: щільність/жорсткість м'яса, риби, м'ясних та рибних продуктів. Аналіз гелів: міцність, сила розриву та пружність гелів. Кондитерська промисловість: твердість та ламкість шоколаду, карамелі, бісквітів,

печива; клейкість ірисок, патоки; властивості мармеладу; тягучість патоки, меду, карамелі шорсткість драже, зацукрованих горіхів; розтікаємість глазури. Хлібо - булочна промисловість та виробництво макаронних виробів: жорсткість/м'якість пиріжків, хліба, круасанів, печива, тістечок та їх зміна при зберіганні; властивості тіста; твердість, еластичність, міцність та липкість готових макаронних виробів; ламкість сухих макаронних виробів. Дослідження фруктів та овочів.

Можливості моделі TA.XT plus.

Повністю програмоване багатостадійне дослідження текстури. Користувач може задавати індивідуальну послідовність рухів траверси при різних швидкостях та на різних відрізках для проведення будь-яких найбільш складних випробувань. Висока швидкість руху траверси (до 40 мм/с з тензодатчиком вагою 5 або 30 кг) дозволяє імітувати реальні ситуації та оцінювати стійкість зразку до різких діянь. Наявність обмежувачів дозволяє встановлювати безпечний робочий хід пробника. Дана модель має можливість збору даних з частотою до 500 точок в секунду, що при малій швидкості (до 0.01 мм/с) дозволяє отримувати найбільш точні результати. Постійна деформація та швидкість деформації. Швидкість руху траверси може змінюватися пропорційно висоті зразку в даний момент. Тобто, тест можна проводити, підтримуючи постійною швидкість деформації зразку шляхом стиску або розтягу. Багатоканальний збір даних. Протягом тесту прилад може збирати дані від зовнішніх пристроїв (до 4 каналів), наприклад датчиків температури та вологості зразку. Прилад можна відкалібрувати вантажем будь-якої ваги аж до максимального, передбаченого даним тензодатчиком.

Автоматичне розпізнавання тензодатчика приладом. Прилад може бути укомплектований тензодатчиками 1, 5, 30 та 50 кг. Інформація про тензодатчик (максимальне зусилля, дані калібрування та серійний номер) автоматично прочитується приладом у момент установки. Передбачений також захист від перевантаження. Програмне забезпечення Texture Exponent містить ряд нових функцій, які полегшують роботу та дають нові аналітичні можливості.

Характеристики: зусилля до 50 кг (0,5 кН) (змінні тензодатчики 1, 5, 30 і 50 кг); відхилення по зусиллю 0,1 г; робочий хід 0,1 – 295 мм, 0,1 – 530 мм (модель із збільшеною висотою); відхилення по відстані 0,001 мм; швидкість від 0,01 до 40 мм/с (при 50 кг – до 20 мм/с); точність до 0,1%; частота збору даних до 500 точок/с по кожному каналу; розміри 665 x 280 x 440 мм; вага 16,2 кг.

Розділ 4

СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ М'ЯСНИХ ПРОДУКТІВ

4.1 Характеристики зсуву м'ясних продуктів

4.1.1 Характеристики зсуву рідинообразних та ньютонівських систем

Ньютонівські рідини характеризуються динамічним коефіцієнтом в'язкості, а структуровані – ефективною в'язкістю. К структурованим рідинам відносяться: цільна кров, сироватка крові, білкові розчини, желатинові бульйони, розплавлені жири при температурах, які близькі до температур плавлення жиру. Структуровані рідини мають динамічний просторовий каркас, властивості якого визначають поведінку рідини в потоці.

Один і той же продукт у залежності від інтенсивності механічного впливу, вологості або температури може переходити з ньютонівської рідини в структуровану та навпаки. Реологічні властивості рідиннообразних продуктів мають самостійне значення для розрахунку машин і, крім того, дозволяють глибше оцінювати процеси, пов'язані з переробкою сировини та продуктів і оцінкою їх якості.

Залежність в'язкості η (Па·с) від температури м'ясо-кісткового бульйону в області 40 – 90⁰С описується степеневим рівнянням [14]:

$$\eta = a_1 T_*^{a_2}, \quad (4.1)$$

де T_* - безрозмірна відносна температура; a_1 , a_2 - емпіричні коефіцієнти.

Емпіричні коефіцієнти мають наступні значення: $a_1 = 0,01905 e^{19,3C}$; $a_2 = 1,26C + 0,92$; C - масова доля сухих речовин; границі змінення C складають від 0 до 0,2 кг сухих речовин на 1 кг бульйону; при $C = 0,01 - 0,05$ рівняння дає занижені результати.

Величини в'язкості м'ясо-кісткового бульйону при різній концентрації та температурі наведені у таблиці 4.1 [14]. Ці дані отримані на капілярних віскозиметрах та віскозиметрі Гепплера [40, 41].

Клейові та желатинові бульйони при одній і тій же концентрації мають різну в'язкість. Це визначається способом отримання бульйону та кількісним співвідношенням білків в ньому, тобто розміром часток продуктів розпаду глютину.

Таблиця 4.1 – Залежність в'язкості $\eta \cdot 10^3$ (Па·с) м'ясо-кісткового бульйону від концентрації та температури

Концентрація сухих речовин, кг на 1 кг бульйону	Температура, °С					
	40	50	60	70	80	90
0,20	11,99	9,23	7,45	6,22	5,32	4,63
0,18	8,94	6,92	5,62	4,71	4,04	3,53
0,14	4,98	3,89	3,19	2,69	2,33	2,05
0,10	2,77	2,19	1,81	1,54	1,34	1,19
0,06	1,54	1,23	1,03	0,88	0,77	0,69
0,02	0,86	0,70	0,59	0,51	0,45	0,40
0,01	0,74	0,60	0,51	0,44	0,39	0,35
0,00	0,64	0,52	0,44	0,38	0,34	0,30

На практиці часто використовують для вимірювання в'язкості прилади (наприклад, віскозиметр Енглера), які визначають в'язкість в умовних одиницях (градусах Енглера, °E).

При необхідності перерахування умовних одиниць в абсо-

лютні застосовують залежності для кінематичного коефіцієнту в'язкості $\nu = \eta / \rho$ (м²/с):

Уббелодє

$$\nu = \left(0,0732^{\circ E} - \frac{0,063}{\circ E} \right) 10^{-4}; \quad (4.2)$$

Фогеля

$$\nu = 0,076^{\circ E} (1 - \frac{\circ E}{100}) 10^{-4}. \quad (4.3)$$

Умовна в'язкість в градусах Енглера (°E) стандартного розчину

клею (17,75% сухої речовини) при 30⁰С складає від 1,8 до 6 ⁰Е, що відповідає динамічному коефіцієнту в'язкості від 0,01 до 0,045 Па·с. В'язкість м'ясо-кісткового бульйону при тих же умовах – більш стабільна величина, яка дорівнює 2,1 ⁰Е (0,013 Па·с). Розчини желатину тієї же концентрації при 40⁰С мають в'язкість 6-40 ⁰Е (0,045-0,3 Па·с).

При збільшенні масової долі сухих речовин в'язкість крові зростає, а при збільшенні температури – зменшується, що наведено в таблиці 4.2 [21].

Таблиця 4.2 - Залежність в'язкості крові та плазми крові $\eta \cdot 10^3$ (Па·с) від масової долі сухих речовин та температури

Масова доля сухих речовин, кг на 1 кг крові	Температура, ⁰ С			
	10	20	30	40
Кров				
0,261	92	59	46	36
0,213	31	19	14	10
0,182	15	10	7	5
0,152	11	7	6	4
Плазма крові				
0,1920	18,3	12,0	8,3	6,7
0,1635	11,5	7,7	5,5	4,5
0,1190	5,6	3,9	2,9	2,4
0,0835	3,1	2,3	1,8	1,5

Стабілізована кров та плазма крові при масової долі сухих речовин, яка дорівнює 0,26, являють собою типичну степеневу рідину, в'язкість якої визначається рівнянням $\eta = B_*^0 \dot{\gamma}^{-m}$, у якому $B_*^0 = 0,3$ Па·с, $m = 0,27$.

При меншій масової долі змінення в'язкості у залежності від градієнту швидкості не описується степеневим законом, оскільки плазма крові є ньютонівською рідиною. При підвищенні масової долі сухих речовин в'язкість крові зростає менш інтенсивно у порівнянні з в'язкістю бульйону.

В'язкість меланжу осіннього збору, який зберігався 7 місяців при температурі -6⁰С, вимірювали в інтервалі температур 20-70⁰С за допомогою ротаційного віскозиметру «Реотест 2». Була виявлена аномалія в'язкості в інтервалі градієнтів швидкості від 3 до 437 с⁻¹.

Для опису кривих течії використовували рівняння Гершеля - Балклі $\theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\gamma}^n$ (1.52), де емпіричні коефіцієнти для інтервалу температур 20-60⁰С мали наступні значення:

$$\theta_0 = 1,841 \cdot 10^{-3} t^2 - 0,198t + 5,41;$$

$$B_1^* = 4,99 \cdot 10^{-4} t^2 - 0,0615t + 2,03; \quad n = 2,16 \cdot 10^{-3} t + 0,545. \quad (4.4)$$

Розрахункові значення граничного напруження зсуву та ефекти-

вної в'язкості наведені в таблиці 4.3. Різке збільшення граничного напруження зсуву при 70⁰С обумовлене денатурацією білків.

Таблиця 4.3 – Структурно – механічні характеристики меланжу

Температура °С	Граничне напруження зсуву, Па	Ефективна в'язкість $\eta_{E\Phi} \cdot 10^3$ (Па·с) при градієнті швидкості $\dot{\gamma}$, с ⁻¹						
		1	10	50	100	200	400	1000
20	2,19	3186,0	605,9	243,3	171,9	123,7	90,2	60,3
40	0,44	804,0	201,2	95,8	71,8	54,4	41,6	29,3
60	0,16	294,0	80,2	41,3	32,1	25,1	19,8	14,6

В'язкість виробничих композицій жиру автори визначали за допомогою віскозиметрів Гепплера та капілярних [13].

Значення в'язкості топлених жирів наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – В'язкість топлених жирів

Температура °С	Жир				
	Яловичий	Баранячий	Свинячий	Кістяний	Риб'ячий
60	0,0210	0,0220	0,0195	0,0186	0,0076
80	0,0125	0,0137	0,0120	0,0116	0,0046
100	0,0084	0,0094	0,0082	0,0081	0,0031

Точно описує фізичну суттєвість температурних змінень в'язкості жиру рівняння Френкеля – Ейрінга:

$$\eta = Ae^{E/RT}$$

Постійні для експоненціальної залежності в'язкості жиру, яка отримана при багаторазових дослідженнях виробничих композицій топленого свинячого жиру 1 сорту, наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Коефіцієнти до рівняння Френкеля – Ейрінга

Область температур °С	$A \cdot 10^5$, Па·с	E , кДж/кмоль (ккал/кмоль)
65-100	1000	20800 (4960)
40-65	32,5	30500 (7280)

В'язкість жиру в області температур до 65-70⁰С при нагріві та охолодженні має різні значення. При переході за верхню температурну границю аномалія в'язкості зникає, жир стає істинно – в'язкою рідиною. При охолодженні нижче 27⁰С, якщо механічне діяння відсутнє, у жирі починається утворення суцільного кристалізаційного каркасу, жир утрачає текучість. Залежність між йод-

нічне діяння відсутнє, у жирі починається утворення суцільного кристалізаційного каркасу, жир утрачає текучість. Залежність між йод-

ним числом жиру та в'язкістю, яка зменшується, пропорційно збільшенню йодного числа для температур від 60 до 90⁰С [40].

Добре описує температурні змінення в'язкості рівняння Бачинського $\eta = \nu / (\nu - \omega)$. Величина граничного об'єму лежить в області між питомим об'ємом рідини та твердого тіла.

Експериментально визначені температурні залежності щільності та питомого об'єму: щільність свинячого жиру з температурою пов'язана співвідношенням $\rho = 915 - 0,5t$, питомий об'єм $\nu = (10, +0,0065t)10^{-4}$. Модуль в'язкості дорівнює 3,75м²/с.

Для розрахунку ефективної в'язкості свинячого жиру (Па·с) в області температур від 12 до 26⁰С запропонована залежність [13]:

$$\eta_{E\Phi} = 7,05 \cdot 10^3 e^{-0,082t - 0,757 \ln \dot{\gamma}}, \quad (4.5)$$

яка справедлива при змінненні градієнту швидкості від 0,167 до 4,5 с⁻¹.

Таблиця 4.6 – В'язкість (Па·с) свинячого топленого жиру

Темпе- ра- тура, °С	Градієнт швидкості, с ⁻¹						
	0,1	0,2	0,4	1,0	2,0	4,0	10,0
12	15060	8910	5275	2636	1560	923	461
16	10850	6420	3800	1899	1124	665	332
20	7820	4626	2737	1368	809	479	239
25	5190	3070	1816	908	537	318	159

Експериментальні данні для цієї залежності отримані на ротційному віскозиметрі «Реотест», та наведені у таблиці 4.6.

Питання для самоконтролю

1. Якою величиною характеризуються ньютонівські рідини, а якою – структуровані?
2. За якими умовами один і той же продукт може переходити з ньютонівської рідини в структуровану?
3. Чому клейові та желатинові бульйони при однієї і тієї же концентрації мають різну в'язкість?
4. Як залежить в'язкість крові від масової долі сухих речовин та температури?
5. З чим пов'язаний факт, в'язкість жиру в області температур до 65-70⁰С при нагріві та охолодженні має різні значення?

4.1.2 Характеристики зсуву твердообразних систем

Характеристики зсуву твердообразних систем описуються різними реологічними параметрами, які визначаються обраною математичною моделлю тіла та її відповідністю реальним умовам течії. Деформаційна поведінка продукту в області практично незруйнованих структур при напруженнях, які менш граничного напруження зсуву, характеризують кінетичними кривими деформації, модулями пружності, періодами релаксації та найбільшою ефективною в'язкістю практично незруйнованої структури [13, 40].

При деформування сосискового фаршу дотичними напруженнями різної величини з застосуванням віскозиметру РВ – 8 були отримані криві розвитку та спаду деформацій. По цим кривим визначені основні характеристики фаршу області практично незруйнованих структур, які наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Структурно – механічні характеристики сосискового фаршу області практично незруйнованих структур

Найменування характеристики	Границі змінення напруження, Па	Значення величини
Модуль миттєвої пружності, Па	Менш 100	$1,23 \cdot 10^4$
Модуль пружної післядії, Па	100-150	$0,8 \cdot 10^4$
Ефективна в'язкість при деформаціях повзучості, Па·с	150-200	$16 \cdot 10^5$
Статичне граничне напруження зсуву, Па	-	250 (300)
Найбільша ефективна в'язкість, Па·с	250-350	$5 \cdot 10^5$

По кінетичним кривим визначений спектр розподілення періодів релаксації деформацій при різних, але постійних для кожного досліду напруженнях зсуву [41]. При тривалості τ дії дотичних напружень більш ніж 25, 50, 75 і 100с величина періодів релаксації деформацій τ_0 буде мати відповідні значення: 310, 150, 97, 72 с. Порядок значень наведених характеристик для більшості видів фаршу зберігається.

Деформаційна поведінка продуктів (ковбасного, рибного, м'ясного фаршів, паштетів) при напруженнях, які перевищують граничне напруження зсуву, характеризують граничним напруженням зсуву та в'язкістю у залежності від прийнятої математичної моделі. Оскільки ці характеристики визначаються при високих градієнтах швидкості та напруженнях зсуву, вони є найбільш суттєвими у порів-

нянні з іншими для розрахунку перемішування продуктів в робочих органах машин та апаратів. Вони також більш глибоко характеризують внутрішній стан об'єкту, тобто його якісні показники [13, 27, 44].

В області лавинного руйнування структури залежність ефективної в'язкості від градієнту швидкості степенева і описується рівнянням $\eta_{E\Phi} = B_0^* \dot{\gamma}_*^{-m}$. Окрім того фаршу притаманні гістерезисні явища. Узагальнюють гістерезисні явища криволінійні поверхні залежності ефективної в'язкості від напруження зсуву та тривалості його прикладення, як наведено на рисунку 4.1.

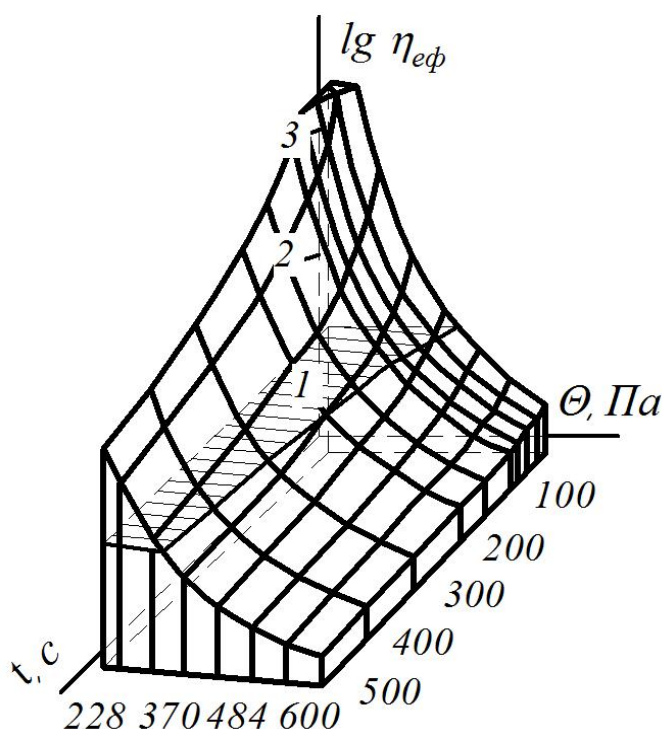


Рисунок 4.1 – Залежність логарифму ефективної в'язкості від напруження зсуву та тривалості його прикладення для фаршу «Руських» сосисок

Степенева залежність характеризує, як розташовані лінії на криволінійній поверхні вздовж її діагоналі.

Значення основних характеристик зсуву виробничих композицій ряду м'ясних продуктів, що виміряні при температурі 10⁰С, наведені у таблиці 4.8.

При виготовленні харчових продуктів їх склад або склад початкової суміші, температура, тривалість витримки та інші фактори можуть відрізнятися від обумовлених стандартом [23, 52]. Тому важливо розглянути вплив деяких основних технологічних факторів на величини характеристик зсуву. Ці дані дозволяють обґрунтовувати параметри оптимального процесу та, базуючись на них, розробити передумови для автоматичного управління технологічними процесами.

Вплив концентрації водневих іонів (рН) на характеристики зсуву фаршу досліджено в інтервалі значень рН від 3 до 10 [13]. Встановлено, що при рН коло 5,0, досягається найбільша текучість (найменші значення в'язкості та граничного напруження зсуву). При збільшенні або зменшенні рН на одиницю у бік від значення, яке відповідає мінімуму в'язкості, її величини можуть збільшуватися до 4-5 разів.

Вплив температури на характеристики зсуву фаршу вивчений в області від 2 до 35⁰С [13, 14]. В процесі технологічного циклу температура коливається від 2 до 20⁰С. Збільшення температури викликає зниження значень всіх реологічних характеристик, за виключенням темпу руйнування структури. З підвищенням температури в'язі у водно – білково – сольових прошарках ослаблюються у результаті зменшення в'язкості розчину, що веде до ослаблення міцності структури.

Таблиця 4.8 – Значення величин характеристик зсуву виробничих композицій різних видів м'ясного фаршу

Найменування сирого фаршу	Граничне напруження зсуву, Па	Пластична в'язкість, Па·с	Коефіцієнти до рівнянь $\eta_{E\Phi} = B_0 \dot{\gamma}_*^{-m}$, $\eta_{E\Phi} = B(w/w_1)^{-m} = Bw_*^{-m}$		
			B	B_0^*	m
Яловичина кутерована (з водою)	700	18-20	6,1	510	0,73
Свинина напівжирна кутерована (з водою)	650	19-22	6,0	480	0,72
Ковбаса					
Любітельська	700	18-28	5,0	610	0,79
Докторська	540	16-19	4,3	430	0,75
Чайна	500	-	3,5	430	0,79

Вплив тривалості витримки на характеристики сирого фаршу важливо знати як при виконанні експериментальних досліджень, так і для знаходження оптимального часу осадки ковбасних виробів [13, 14]. Після механічного діяння на сирий продукт для поліпшення його якості необхідний «відпочинок» з ціллю відновлення структури (осадка ковбас, витримка тіста). У перші дві години старіння фаршу величини його характеристик зсуву незмінні. При витримці 4-10 годин характеристики зсуву збільшуються до максимуму. Таким чином, час витримки 4-6 годин є критичним, коли закінчується процес самодовільного зміцнення і волога повністю насичає всі в'язі, які маютьяся.

Залежність реологічних характеристик фаршу докторської ковбаси від тривалості старіння та температури наведена на рисунку 4.2.

Вплив вологості на характеристики зсуву сирого фаршу був досліджений при змінненні відносної вологості W від 0,55 до 0,8 кг вологи на 1 кг загальної маси сирого фаршу (вологоміст U відповідно складає від 1,2 до 4,0 кг на 1 кг сухого залишку) [13, 14].

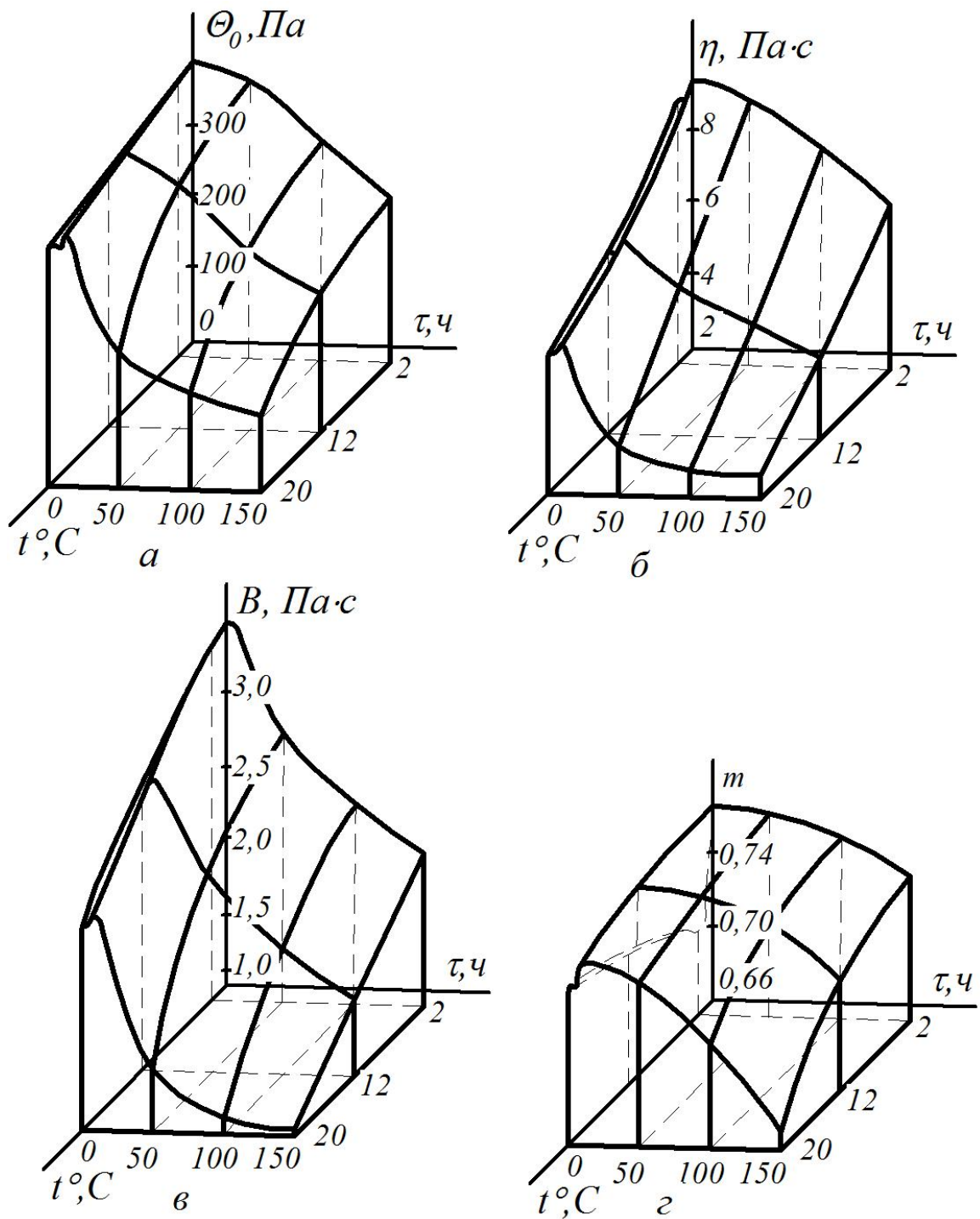


Рисунок 4.2 – Залежність реологічних характеристик фаршу докторської ковбаси від тривалості старіння та температури:
 а – граничне напруження зсуву; б – пластична в'язкість;
 в – ефективна в'язкість при одиничній швидкості;
 г – темп руйнування структури

Підвищення вологості фаршу веде до стовщення рідинних прошарок дисперсного середовища між частками, зменшує концентрацію

білків у розчині прошарок, знижуючи їх в'язкість. Тому міцність структури та значення характеристик зсуву фаршу знижуються. При цьому темп руйнування структури от вологості не залежить та при її змінні залишається постійним. Одночасно відбувається розвиток зустрічного процесу – збільшення діаметру в'язових волокон завдяки осмотичному перерозподіленню вологи. Процес стовщення водних прошарок, який викликає зменшення міцності структури, значно гальмується зворотнім процесом – набуханням в'язових волокон, збільшенням їх поверхні та пов'язанням вологи, який сприяє зростанню міцності. Сумарна дія цих процесів дає порівняно невелике зниження міцності структури фаршу. Наприклад, збільшення вологості від 0,66 до 0,76 знижає характеристики зсуву фаршу у 2,5-3,5 разів.

Вплив жирності на характеристики зсуву фаршу якісно оцінюється по різному [13, 14]. Зі збільшенням кількості жиру (від 0 до 50%) границя текучості та в'язкість значно зростають при температурі 15⁰С, при температурі 20⁰С ці характеристики зростають незначно, а при 30⁰С характеристики зі збільшенням вмісту жиру знижуються.

Збільшення температури веде до зниження границі текучості та в'язкості, яке було тим сильніше, чим вище вміст жиру у фарші. Приблизно при 24⁰С вміст жиру не впливав на реологічні характеристики фаршу. Для свинячого топленого жиру критичною температурою є 26,5⁰С. Якщо температура нижче, жир набуває суцільний просторовий каркас кристалізаційного типу.

Дослідження впливу додатків до рецептури на характеристики зсуву викликані необхідністю створювати оригінальні технології комбінованих м'ясо - рослинних продуктів з підвищеним вмістом білків, жирів, вітамінів, макро- та мікроелементів, речовин пребіотичної дії та інших харчових добавок [23].

Були проведені експериментальні дослідження структурно-механічних характеристик трьох зразків напівфабрикату яловичої печінкової паштетної маси, виготовленої за стандартною рецептурою та з додаванням пребіотичної суміші (порошки кореня цикорію та топінамбуру у співвідношенні 30:70%) у кількості 10%, 15%. Дослідження проводилися в науково-дослідницької лабораторії кафедри загальноінженерних дисциплін ДонНУЕТ. Для визначення реологічних показників використовували ротаційний віскозиметр Rheotest RN4.1. Температура 21⁰С була сталою протягом експерименту.

Паштет відноситься до систем з некліточною кристалічною структурою та знаходиться у пластично - в'язучому стані. Паштет є

трюхфазною системою, має рідке дисперсійне середовище та тверду дисперсну фазу, він також насичений пухирчиками повітря. Дисперсна фаза представлена в ньому білковими частинами та агрегатами, частками жиру, найменшими частинами м'язової і жирової тканин; дисперсне середовище - водяним розчином деяких м'язових білків, інших органічних з'єднань та електролітів. За своєю структурою паštети належать до пов'язано дисперсних структур, в яких одна з фаз структурно закріплена і не може вільно переміщуватися.

На рисунку 4.3 зображені криві змінення ефективної в'язкості та напруження зсуву за часом виміру у залежності від швидкості зсуву зразків напівфабрикату.

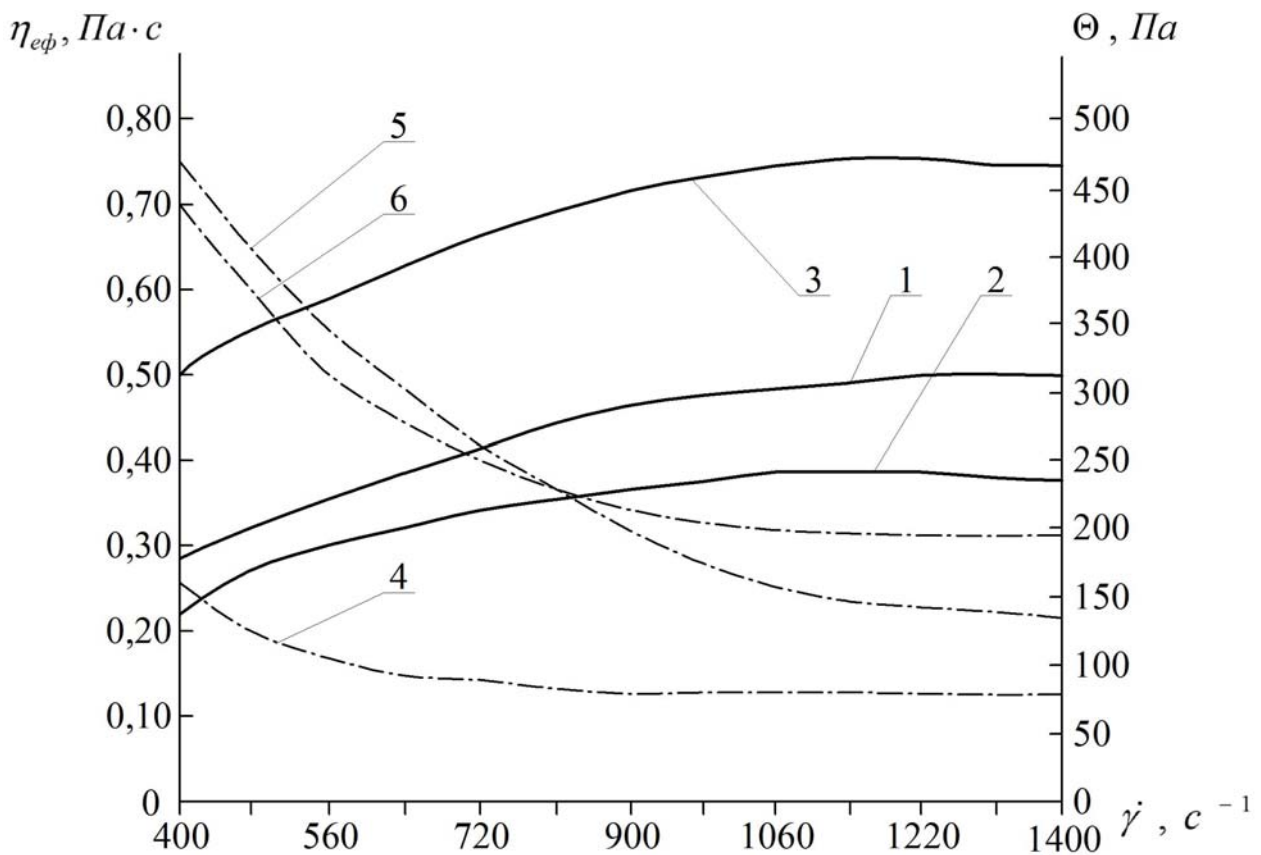


Рисунок 4.3 - Криві зміни в'язкості та напруження зсуву зразків:

1 - напруження зсуву зразку (суміші 10%); 2 – напруження зсуву контрольного зразку; 3 – напруження зсуву зразку (суміші 15%); 4 – ефективна в'язкість контрольного зразку; 5 - ефективна в'язкість зразку (суміші 10%); 6 – ефективна в'язкість зразку (суміші 15%)

Вигляд кривих текучості характерний для течії в'язко – пластичних систем, вони мають границю текучості, в'язкість є функцією

швидкості зсуву, крива течії починається не з початку координат. Течія зразків з достатньо високою точністю описується рівнянням Кассона. Закони течії зразків напівфабрикату яловичої печінкової паштетної маси наведені у таблиці 4.9. Найбільше відхилення розрахункових значень від експериментальних складає 5 % .

Таблиця 4.9 - Закони течії зразків

Зразок	Закони течії	R^2
Стандартна технологія	$\theta^{\frac{1}{0,29}} = 142^{\frac{1}{0,29}} + (0,15 \cdot \dot{\gamma})^{\frac{1}{0,29}}$	0,96
10% суміші	$\theta^{\frac{1}{3,43}} = 127^{\frac{1}{3,43}} + (0,08 \cdot \dot{\gamma})^{\frac{1}{3,43}}$	0,99
15% суміші	$\theta^{\frac{1}{4,50}} = 102^{\frac{1}{4,50}} + (0,01 \cdot \dot{\gamma})^{\frac{1}{4,50}}$	0,98

Криві в'язкості та напруження зсуву мають для паштету, отриманого за стандартною рецептурою, та для паштетів з додаванням пребіотичної суміші подібний вигляд, тобто з підвищенням градієнту швидкості в'язкості зменшується та стабілізується перед переходом в область руйнованої структури, значення напруження зсуву зростають. Паштет, виготовлений за стандартною рецептурою має значно менші кількісні значення в'язкості та напруження зсуву.

На кривих течії можна виділити три ділянки. Перша ділянка (приблизно до 700 1/с) характеризується різким зменшенням значень в'язкості зі збільшенням градієнту швидкості зсуву, тобто відбувається часткове руйнування структури. Друга ділянка (від 700 до 1400 1/с) відрізняється значно меншими змінами в'язкості. На третьої ділянці при швидкостях зсуву перевищуючих 1400 1/с ефективна в'язкість стає постійною, що означає повне руйнування структури. Тобто, паштетні маси, які досліджувалися, володіють стійкою структурою, руйнування якої починається тільки після досягнення визначеного напруження зсуву.

Експериментальні дані показують, що реологічні характеристики залежать від рецептури паштетів, оскільки кількісні значення величин характеристик паштету, виготовленого за стандартною рецептурою та паштетів з додаванням пребіотичної суміші суттєво відрізняються. Паштети, які містять суміш, мають при одному і тому ж значенні градієнту швидкості зсуву більші кількісні значення величин

в'язкості та напруження зсуву. Коливання величини напруження зсуву достатньо значні, зі зростанням процентного вмісту пребіотичної суміші зростають значення цієї величини. Це свідчить про поліпшення здібності утримувати форму та міцності продукту.

У таблиці 4.10 наведені значення максимальних характеристик до руйнування структури зразків.

Таблиця 4.10 - Значення максимальних характеристик зразків

Зразки	Час, с	В'язкість, Па·с	Граничне напруження зсуву, Па	Гранична швидкість зсуву, 1/с
Стандартна технологія	549,6	0,155	224,5	1450
10% суміші	759,7	0,234	316,1	1350
15% суміші	705,6	0,302	432,6	1430

Були проведені експериментальні дослідження структурно-механічних характеристик м'ясних фаршів з додаванням напівфабрикату на основі печериць та насіння гарбуза [23]. Досліджувалися з використанням віскозиметру Rheotest RN4.1 при температурі 20⁰С три зразки м'ясного фаршу: зразок №1 (контрольний) - яловичина подрібнена на м'ясорубці; зразок №2 - яловичий фарш з додаванням напівфабрикату у кількості 10%; зразок №3 - яловичий фарш з додаванням напівфабрикату у кількості 30%.

На рисунку 4.4 зображені криві течії зразків, які досліджувалися, побудовані за даними експерименту. Фарші володіють стійкою структурою, оскільки руйнування починається після досягнення визначеного напруження. Було встановлено, що при підвищенні процентного вмісту напівфабрикату досягається найбільша текучість, оскільки одержані найменші значення в'язкості та напруження зсуву.

При підвищенні швидкості зсуву в'язкість маси зменшується. Більш різке зниження відбувається при змінненні швидкостей до 20 с⁻¹ (на 98 %) та спостерігається лінійна залежність в'язкості від швидкості зсуву. При швидкості зсуву до 200 с⁻¹ в'язкість спадає уповільнено та при перевищенні цієї швидкості залишається практично постійною, що свідчить про повне руйнування структури всіх зразків.

Додавання напівфабрикату суттєво знижує напруження зсуву. Наприклад, при швидкості зсуву 200 с⁻¹ напруження зсуву контрольного зразку $\theta_0 = 828 \text{ Па}$, для зразку з додаванням 10% напівфабрикату

$\theta_0 = 776$ Па, для зразку з додаванням 30% напівфабрикату $\theta_0 = 624$ Па, тобто при підвищенні процентного вмісту напівфабрикату θ_0 зменшилося у 1,3 рази.

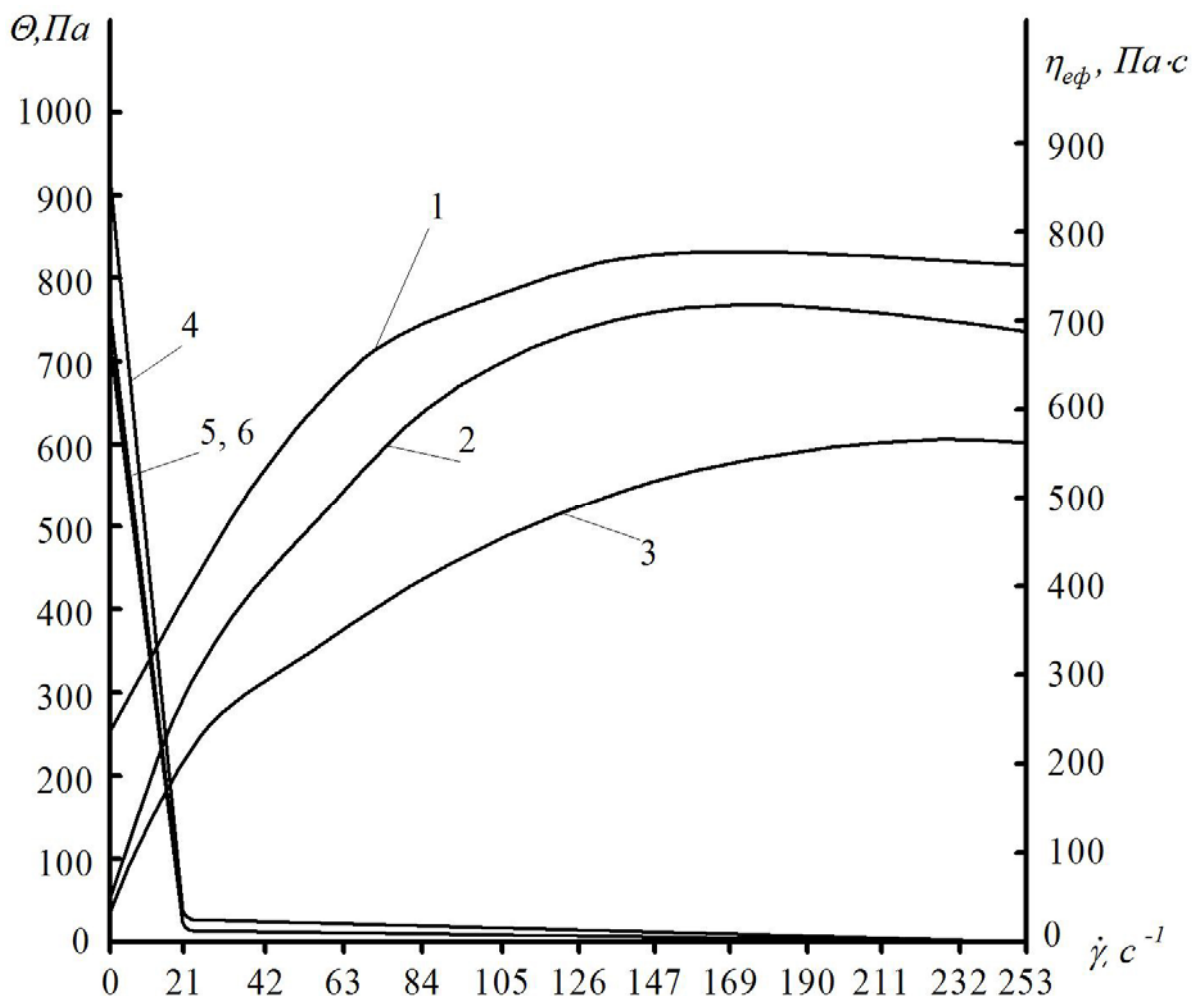


Рисунок 4.4 - Криві течії зразків:

1 – напруження зсуву контрольного зразку; 2 - напруження зсуву зразку (напівфабрикату 10%); 3 – напруження зсуву зразку (напівфабрикату 30%); 4 – ефективна в'язкість контрольного зразку; 5, 6 – ефективна в'язкість зразків з додаванням напівфабрикату відповідно 10% та 30%

Властивості фаршу залежать від співвідношення міцно - та слабозв'язаної вологи. При збільшенні кількості напівфабрикату в зразках частка слабозв'язаної вологи зменшується, а міцнозв'язаної відповідно підвищується. Підвищення вологості фаршу веде до стовщення рідинних прошарок дисперсного середовища між частками, зменшує концентрацію білків у розчині прошарок, знижуючи їх

в'язкість. Тому міцність структури та значення характеристик зсуву фаршу знижуються. Процес стовщення водних прошарок викликає зменшення міцності структури значно гальмується зворотнім процесом – набуханням м'язових волокон, збільшенням їх поверхні та зв'язуванням вологи, який сприяє зростанню міцності. Сумарна дія цих процесів дає невелике зниження міцності структури фаршу.

Для всіх зразків, які досліджувалися, криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву з високим коефіцієнтом кореляції апроксимуються функцією закону Гершеля – Балклі $\theta = \theta_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$. Чисельні значення коефіцієнтів рівняння наведені у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 - Значення коефіцієнтів до рівняння Гершеля – Балклі

Зразок	Коефіцієнти рівняння			
	θ_0	k	n	σ
Контроль	0,01	220	0,27	0,91
10 %	0,01	252	0,22	0,93
30%	0,01	891	0,36	0,99

Результати досліджень свідчать, що додавання напівфабрикату на основі печериць та насіння гарбуза у м'ясні фарші призводить до суттєвих змін їх структурного стану, змінюючи значення реологічних характеристик. Зниження механічної міцності та пружності призводить до підвищення ніжності та соковитості готового продукту.

Досліджений вплив тиску на характеристики сирого фаршу [13, 14]. При збільшенні тиску значення всіх характеристик збільшуються за виключенням пластичної в'язкості, яка практично не залежить від тиску. Змінення величин реологічних характеристик при різних тисках пояснюється перерозподіленням дисперсійного середовища та зміненням розміру часток у гідратних оболонках. Тиск викликає переорієнтацію часток, більш компактно їх упаковку з одночасним деформуванням; кількість та об'єм повітряних порожнин зменшується.

Вплив вологовмісту, жирності та тиску на характеристики зсуву був досліджений комплексно при температурі 20-22⁰С для різних композицій ковбасних фаршів протягом 2 годин після їх приготування. Узагальненні дані наведені на рисунках 4.5, 4.6.

Для визначення величин характеристик при різній рецептурі сирого ковбасного фаршу температурою біля 20⁰С запропоновані рівняння:

$$Z = a_0 e^{a-bU(1-e \lg Y)}; \quad m = a_0 + (a - c \lg Y), \quad (4.6)$$

де Z - граничне напруження зсуву, пластична та ефективна в'язкості

в області напружень, які перевищують граничне напруження зсуву;
 a_0 - значення відповідної фізичної величини при оптимальному
ступеню подрібнення для обезжиреного, сухого фаршу;
 a , b , c - емпіричні коефіцієнти.

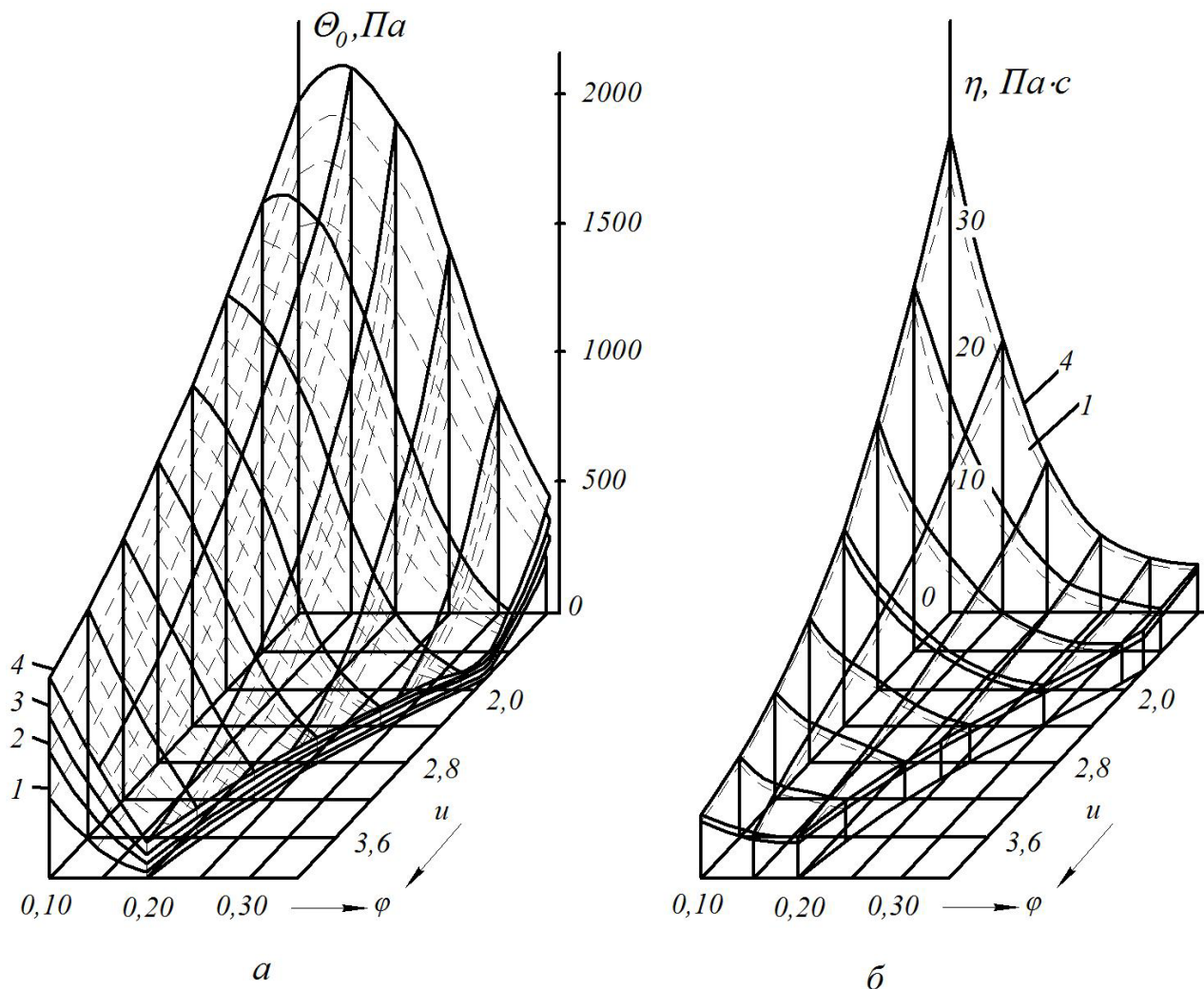


Рисунок 4.5 – Залежність від жирності (кг/кг сирого фаршу) та вологовмісту (кг вологи/кг сухого залишку):

а – граничного напруження зсуву; б – пластичної в'язкості; при різних тисках: 1 – 0; 2 – 200 кПа; 3 – 500 кПа; 4 – 1000 кПа

$$a = a_1 + a_2\varphi + a_3\varphi^2, \quad b = b_1 + b_2\varphi + b_3\varphi^2, \quad c = c_1 + c_2\varphi + c_3\varphi^2; \quad (4.7)$$

де φ - жирність, кг жиру на 1 кг фаршу; U - вологовміст, кг вологи на 1 кг сухого залишку; $Y = p \cdot 10^{-5} + 1$ - модуль абсолютного тиску; p - гідростатичний тиск.

Коефіцієнти рівнянь наведені у таблиці 4.12.

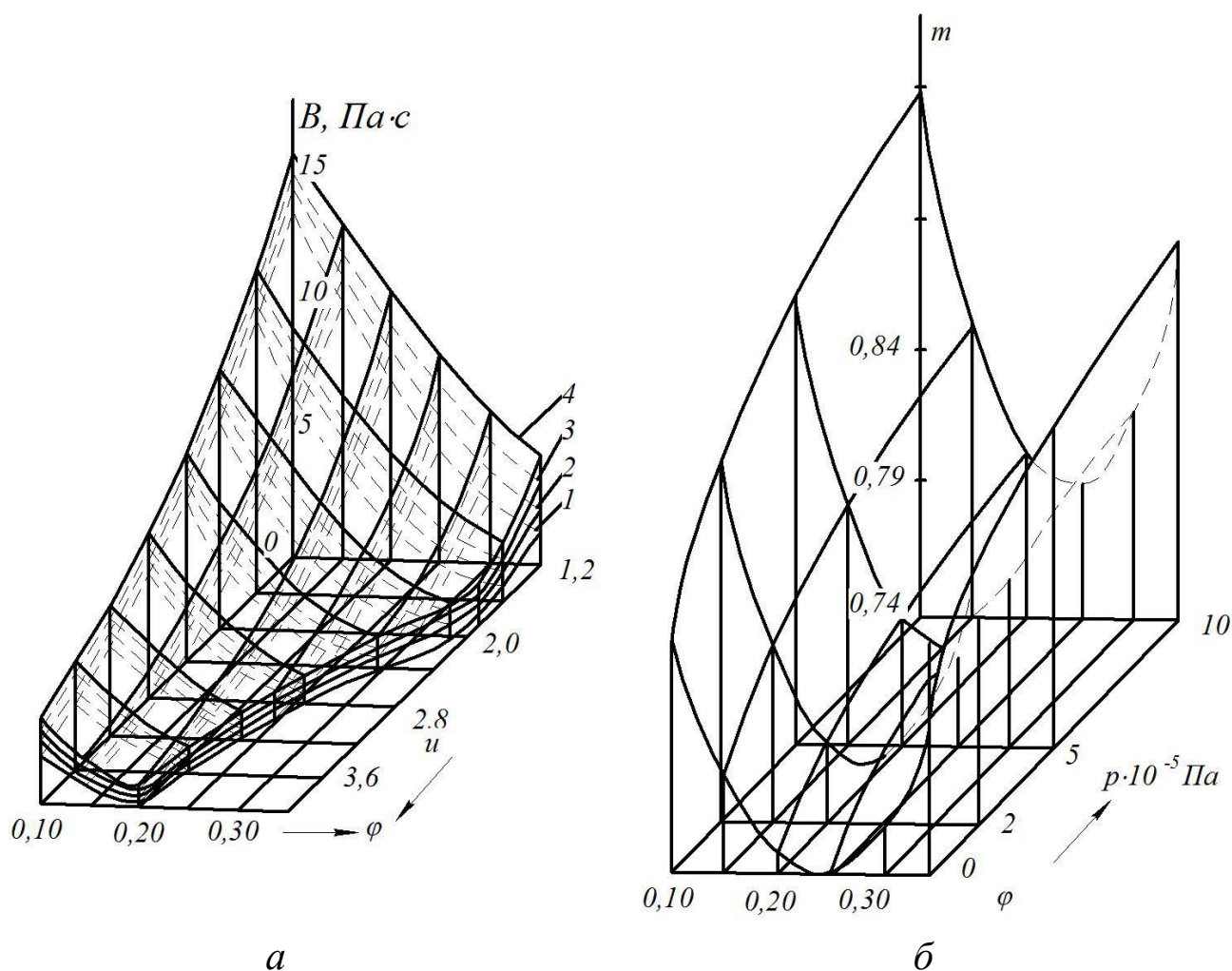


Рисунок 4.6 – Залежність від жирності (кг/кг сирого фаршу) та вологовмісту (кг води/кг сухого залишку):

а – ефективної в'язкості при одиничній швидкості; б - темп руйнування структури при різних тисках: 1 – 0; 2 – 200 кПа; 3 – 500 кПа; 4 – 1000 кПа

Вивчався вплив високого тиску на характеристики зсуву паштету з використанням ротаційного віскозиметру «Rheotest RN4.1» [23]. Об'єктами реологічних досліджень були 3 зразки печінкового паштету «Любительський»: №1 – сировина для отримання паштету; №2 - паштет, оброблений протягом 20 хвилин тиском 600МПа; №3 – паштет, отриманий класичним способом. Температура протягом експерименту була 20°C, коливання температури не більш ніж 0,1°C. На рисунку 4.7 зображені криві течії печінкового паштету, отримані за даними експерименту.

Таблиця 4.12 – Значення коефіцієнтів для розрахунку характеристик зсуву тонкоподрібнених ковбасних фаршів

Реологічна характеристика	a_0	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3
Граничне напруження зсуву, Па	1480	0	7,0	0	0,30	0	27,0	0,49	-1,0	0
Пластична в'язкість (Па·с) при жирності кг жиру на 1 кг фаршу від 0 до 0,15 від 0,15 до 0,40	365 18960	0 0	-14,0 -50,5	0 76,5	1,05 1,75	-2,44 -9,05	0 13,7	0 0	0 0	0 0
Ефективна в'язкість при одиничній швидкості, Па·с	30	0	0	0	0,50	0	18,0	0,10	0,80	0
Темп руйнування структури	1,005	0	-2,21	4,6	-	-	-	-0,2	1,44	-3

Первісний сирий фарш, а також паштети, отримані в результаті термічної обробки та обробки високим тиском, відносяться до неньютонівських твердообразних систем з вираженою псевдопластичністю.

Зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість зменшується і стабілізується при переході в область зруйнованої структури. При перевищенні швидкістю зсуву значення 40 c^{-1} швидкість змінення в'язкості значно зменшується. Для реологічних характеристик печінкового паштету, виготовленого з використанням термічної обробки, відбувається збільшення значень, пов'язане зі змінням стану білкових молекул. Коагуляційні змінення білків при нагріванні ведуть до якісного змінення структури паштету, який втрачає в'язко - пластичні властивості сирого фаршу, паштет починає текти як твердообразне тіло.

Високий тиск порушує гідрофобні взаємодії, зменшуючи об'єм системи. Був використаний тиск 600 МПа, при якому спостерігається необоротна денатурація білків, прямопропорційна величині тиску та тривалості його дії. Коагуляційні змінення білків приводять до переходу від в'язкопластичного типу течії до псевдопластичного.

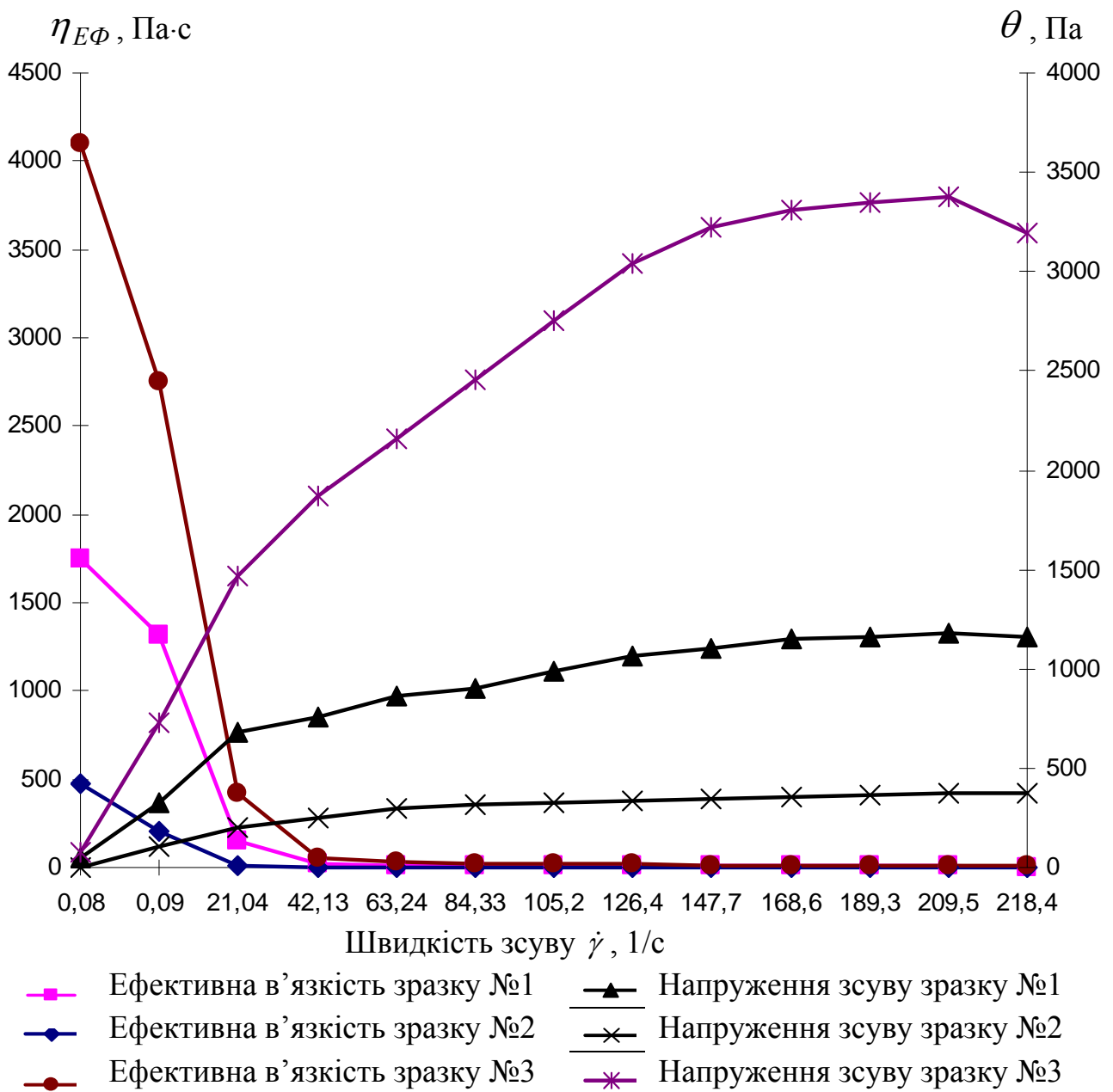


Рисунок 4.7 – Криві течії печінкового паштету

Паштет, оброблений високим тиском, характеризується більшою однорідністю, меншою в'язкістю, міцністю, щільністю та соковитістю у порівнянні з паштетом, отриманим за класичною технологією, що пов'язане з різним ходом денатураційних процесів при теплової обробці та обробці високим тиском.

З високою ступеню точності залежність напруження зсуву від градієнту швидкості зсуву описує рівняння загального закону Кассона

на $\theta^n = \theta_0^n + (\eta \cdot \dot{\gamma})^n$. Залежність в'язкості зразків від градієнту

швидкості зсуву описується експоненціальними законами. У таблиці 4.13 наведені рівняння, які описують криві течії зразків.

Таблиця 4.13 – Рівняння опису кривих течії

Реологічна характеристика	Тип зразку	Законои течії	Коефіцієнт детермінації R^2
Напруження зсуву (Па)	Зразок №1	$\theta^{\frac{1}{6,488}} = 26^{\frac{1}{6,488}} + (0,002\dot{\gamma})^{\frac{1}{6,488}}$	0,942
	Зразок №2	$\theta^{\frac{1}{6,574}} = 146^{\frac{1}{6,574}} + (0,001\dot{\gamma})^{\frac{1}{6,574}}$	0,954
	Зразок №3	$\theta^{\frac{1}{5,412}} = 115^{\frac{1}{5,412}} + (0,286\dot{\gamma})^{\frac{1}{5,412}}$	0,949
В'язкість (Па·с)	Зразок №1	$\eta = 483 \exp(-0,420\dot{\gamma})$	0,999
	Зразок №2	$\eta = 1546 \exp(-0,111\dot{\gamma})$	0,976
	Зразок №3	$\eta = 3455 \exp(-0,100\dot{\gamma})$	0,955

На рисунках 4.8 – 4.10 наведені поверхні відгуку залежностей реологічних характеристик властивостей та градієнту швидкості зсуву зразків паштету.

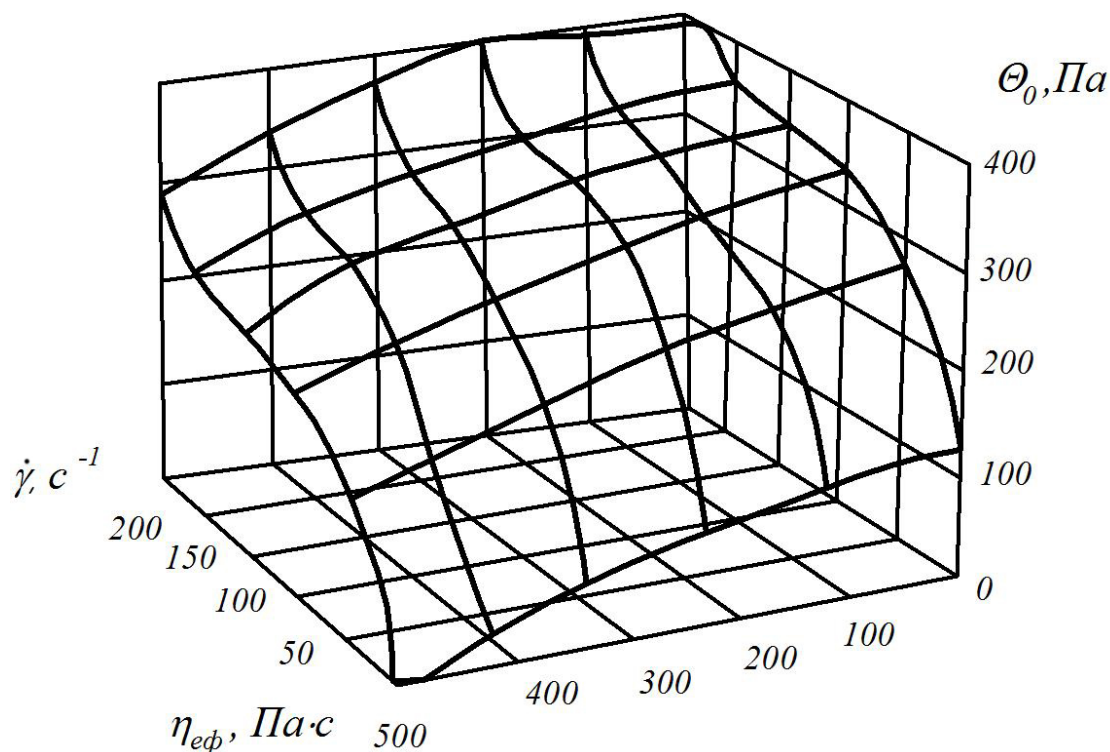


Рисунок 4.8 - Поверхня відгуку залежності структурно - механічних властивостей та градієнту швидкості зсуву для сирого зразку паштету

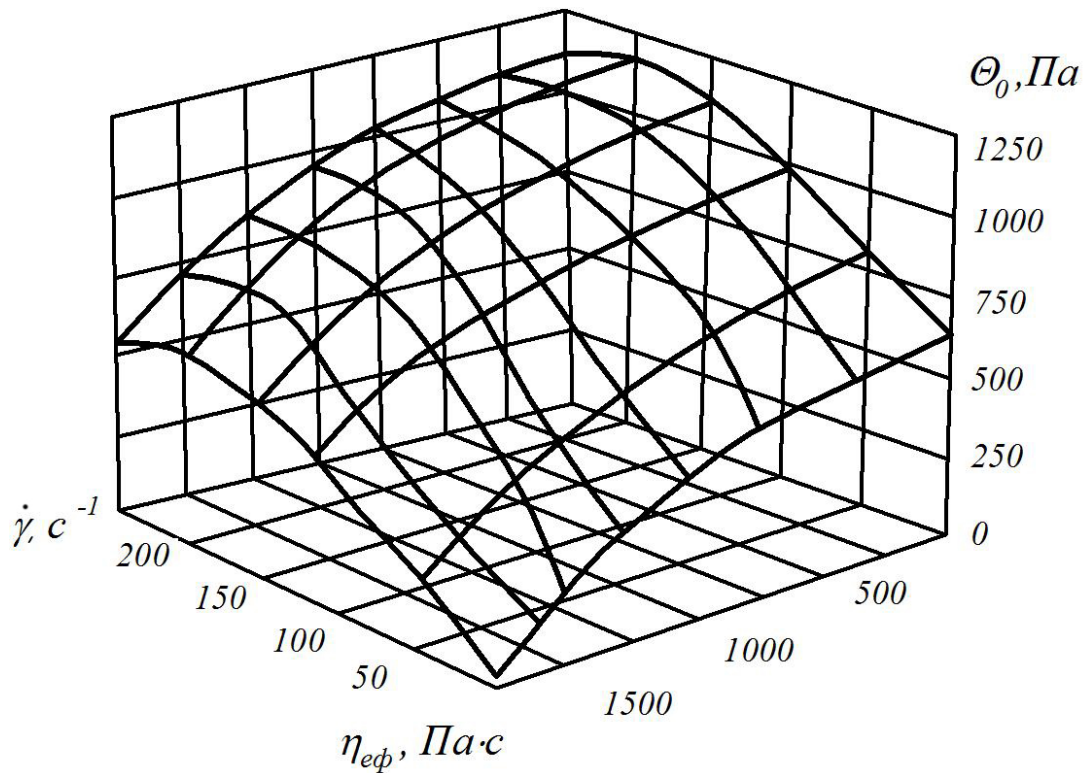


Рисунок 4.9 - Поверхня відгуку залежності структурно - механічних властивостей та градієнту швидкості зсуву для зразку паштету, обробленого протягом 20 хвилин тиском 600Мпа

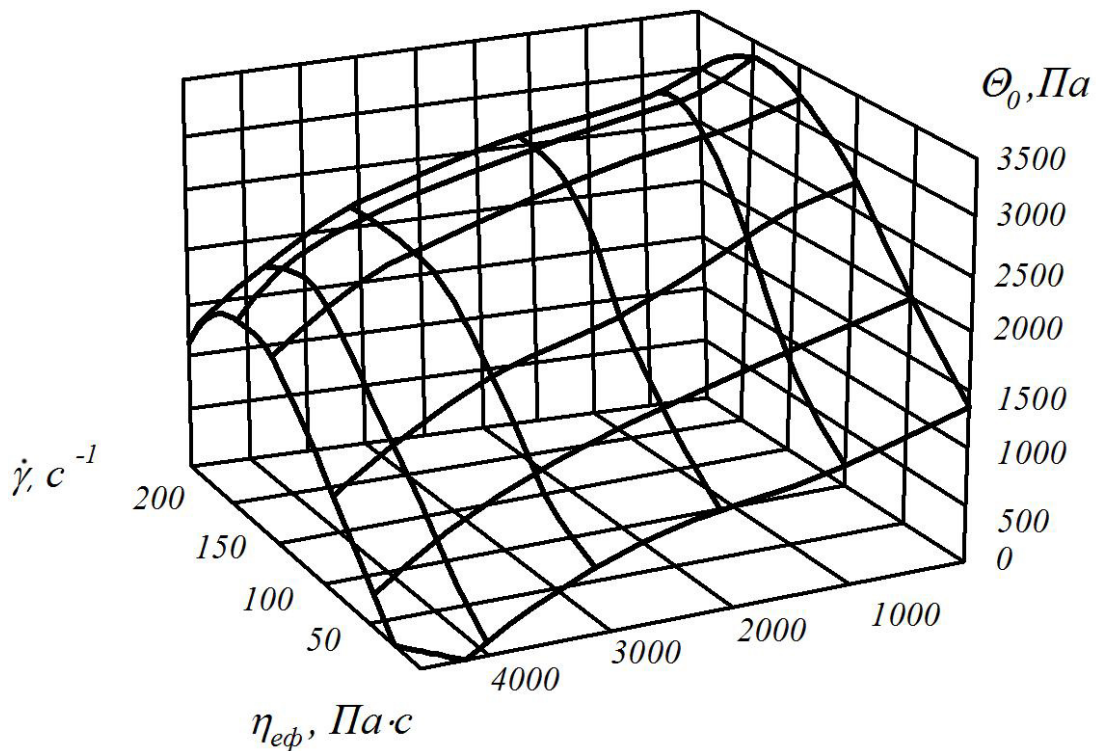


Рисунок 4.10 - Поверхня відгуку залежності структурно - механічних властивостей та градієнту швидкості зсуву для зразку паштету, отриманого класичним способом

У таблиці 4.14 наведені рівняння опису залежностей структурно - механічних властивостей та швидкості зсуву.

$$\theta = a + b\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2 + d\eta_{E\Phi}, \quad (4.8)$$

де a, b, c, d - константи рівнянь.

Таблиця 4.14 – Рівняння опису залежності структурно – механічних властивостей та швидкості зсуву

Тип зразку	Рівняння	R^2
Зразок №1	$\theta = 126 + 4,031\dot{\gamma} + 0,026\dot{\gamma}^2 - 0,029\eta_{E\Phi}$	0,999
Зразок №2	$\theta = 624 + 3,123\dot{\gamma} + 0,009\dot{\gamma}^2 - 0,070\eta_{E\Phi}$	0,999
Зразок №3	$\theta = 1397 + 9,042\dot{\gamma} + 0,075\dot{\gamma}^2 - 0,400\eta_{E\Phi}$	0,999

Вплив механічної обробки на характеристики зсуву вивчали при кутерованні [13, 14]. Процес кутеровання складається з трьох основних періодів.

У початковому періоді кутеровання розмір часток зменшується незначно; вода перемішується з частками м'яса та утворює товсті прошарки, що полегшує деформацію; граничне напруження зсуву має при кінці періоду мінімальне значення. У цьому періоді відбувається процес утворення нової структури фаршу. К кінцю періоду характеристики фаршу досягають екстремального значення. Тривалість процесу, при якій всі показники фаршу та готових виробів досягають екстремальних значень, а будова його найбільш однорідна при компактної укладці часток, названа оптимальною тривалістю кутеровання (t_{OPT} , хв.). Оптимальна тривалість механічного діяння та оптимальний хімічний склад сировини дають еталонні значення реологічних та технологічних показників готового продукту. Значення еталонних показників деяких видів фаршу наведені у таблиці 4.15.

Вплив вібрації на характеристики зсуву фаршу досліджений як при перемішуванні, так і при осадці фаршу, який був ущільнений в оболонку. Перемішування здійснювали на спеціальному змішувачі при частоті вібрації 25 Гц, амплітуді 0,009 м та швидкості 0,83 м/с. Первісним об'єктом була розморожена яловичина 1 сорту та напівжирна свинина, які подрібнювали на вовчку. Три експериментальні партії, оброблені по різним варіантам, дали вихід на 1,5 – 2,5 % в по-

рівняні з контрольними партіями. Напруження зсуву дослідницьких виробів склали 38000 – 43000 Па, контрольних партій – 32000 Па.

Таблиця 4.15 – Еталонні характеристики ковбасних виробів

Продукт		Яловичині сардельки	Руські сосиски	Докторська ковбаса	Свинячі сардельки	
Вміст яловичини, кг на 1 кг м'яса		0,9	0,50	0,25	0,0	
Сирий фарш	Вологовміст, кг води на 1 кг сухої речовини	3,90	2,40	1,80	1,34	
	Граничне напруження зсуву, Па	300	320	310	160	
	Пластична вязкість, Па·с	3,88	6,96	4,86	3,02	
	Ефективна вязкість, Па·с, при одиничному значенні	Швидкості	1,94	2,35	2,05	1,01
		Гradientу швидкості	283	234	184	130
	Темп руйнування структури	0,82	0,76	0,74	0,80	
ГОТОВИЙ ПРОДУКТ	Вологовміст, кг води на 1 кг сухої речовини	3,54	2,22	1,66	1,25	
	Напруження зсуву, Па	31600	20200	-	14200	

При дослідженні вібраційної осадки фарш ущільнювали в оболонку діаметром 0,15 м та довжиною 0,6 м. Дослідницька установка створювала частоту коливань 466 Гц при амплітуді 0,001 м. Дослідницькі партії фаршу мали більш високі значення граничного напруження зсуву у порівнянні з контрольними.

Питання для самоконтролю

1. Якими показниками характеризують деформаційну поведінку твердообразних систем в області практично незруйнованих структур при напруженнях, які менш граничного напруження зсуву?
2. Якими показниками характеризують деформаційну поведінку твердообразних систем в області практично незруйнованих структур при напруженнях, які перевищують граничне напруження зсуву?
3. Для чого потрібні дані про вплив основних технологічних факторів на величини характеристик зсуву?
4. Який вплив оказують концентрація водневих іонів, темпера-

тура, вологість, жирність та тривалість механічного діяння на характеристики зсуву сирого фаршу?

5. Чим викликана необхідність дослідження впливу додатків до рецептури на характеристики зсуву?

6. Яким чином додаванням пребіотичної суміші до паштету впливає на його реологічні характеристики?

7. Як додавання напівфабрикату на основі печериць та насіння гарбуза у м'ясні фарші впливає на зміну їх структурного стану?

8. Який вплив оказує високий тиск на характеристики зсуву паштетів? Які явища відбуваються в паштетах при дії високого тиску?

9. Який вплив має механічна обробка на характеристики зсуву фаршу?

10. Як за допомогою реологічних показників зсуву визначають оптимальну тривалість механічного діяння?

11. Який вплив має вібрація на характеристики зсуву фаршу?

4.2 Компресійні характеристики та характеристики міцності, щільність м'ясних продуктів

4.2.1 Компресійні характеристики при осьовому стиску

Компресійні характеристики фаршу при осьовому стиску між двома пластинами досліджували на приборі з механічним приводом однієї з пластин при сталої швидкості її переміщення [21]. Відносну деформацію стиску ε визначали за залежністю:

$$\varepsilon = [h(t) - \Delta] / H_0, \quad (4.9)$$

де $h(t) = wt$ - абсолютна деформація шару продукту за час t (с) при швидкості стиску w , м/с; Δ , м - величина прогину тензобалки у момент вимірювання (м); H_0 , м - початкова висота шару продукту.

Постійність швидкості стиску забезпечує незмінність градієнту швидкості $\dot{\varepsilon}$ (с⁻¹), тобто функція $\varepsilon(t)$ являється прямою лінією та виходить з початку координат:

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon / t. \quad (4.10)$$

У таблиці 4.16 наведені значення границі текучості та модуля пружності для фаршу руських сосисок, які стискаються пластинами

площиною $0,0010 \text{ м}^2$ з середньою швидкістю $24 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ при товщині шару від $0,003$ до $0,009 \text{ м}$. Ці величини залежать від вологовмісту U (кг води на 1 кг сухої речовини) та товщини шару фаршу.

Таблиця 4.16 – Компресійні характеристики фаршу руських сосисок при осьовому стиску

Вологовміст фаршу, кг води на кг сухих речовин	Границя текучості $\sigma_T \cdot 10^{-3}$, Па при товщині шару $H_0 \cdot 10^3$, м			Модуль пружності $E \cdot 10^{-4}$, Па при товщині шару $H_0 \cdot 10^3$, м		
	4	6	8	4	6	8
2	3,15	2,75	2,3	-	-	4,4
2,5	2,44	2,04	1,6	4,7	3,7	2,7
3	1,74	1,32	0,9	3,2	2,2	1,2
3,5	1,0	0,6	0,2	2,0	1,0	0

З ціллю отримання інваріантних характеристик, які не залежать від товщини шару, для зони пластично – в'язкої течії ($0,1 \leq \varepsilon \leq 0,05$) введена «лінійна» в'язкість, яка є відношенням напруження стиску до градієнту швидкості. Графоаналітичною обробкою експериментальних даних отримана розрахункова залежність:

$$\sigma/\dot{\varepsilon} = 18,5 \cdot 10^5 (\varepsilon + 0,3) e^{-1,02U} \quad (4.11)$$

Результати експериментів при осьовому стиску були узагальнені за допомогою моделі стандартного лінійного тіла, яке для даного випадку має вигляд:

$$\sigma + t_\varepsilon \dot{\sigma} = E_R (\varepsilon + t_\sigma \dot{\varepsilon}), \quad (4.12)$$

де σ - напруження стиску, Па; $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$ - швидкість збільшення напруження, Па/с; $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ - швидкість деформації, с^{-1} ; t_ε - період релаксації напруження при постійній деформації, с; t_σ - період релаксації деформації при постійному напруженні, с; E_R - релаксацийний модуль пружності, Па.

Експериментальна перевірка наведеного вище рівняння виконана для фаршу руських сосисок з різним вологовмістом, фаршу докторської ковбаси [41]. Характеристики фаршу наведені у таблиці 4.17.

Таблиця 4.17 – Релаксаційні характеристики фаршу при осьовому стиску

Швидкість деформації $\dot{\varepsilon}_\sigma \cdot 10^3$	Релаксаційний модуль $E_R \cdot 10^{-3}$ (Па) при вологовмісті, кг/кг				Періоди релаксації, с	
	2,0	2,5	3,0	3,5	Деформації	Напруження
0,5	1,22	0,72	0,43	0,25	74,0	11,2
1,0	2,45	1,45	0,86	0,50	37,0	5,6
2,0	4,90	2,89	1,71	1,00	18,5	2,8
4,0	9,80	5,79	3,42	2,00	9,2	1,4
6,0	14,7	8,69	5,14	3,00	6,2	0,9

Емпіричні залежності, які пов'язують знайдені характеристики з умовами вимірювання, мають вигляд:

$$E_R(U, \dot{\varepsilon}_\sigma) = 2 \cdot 10^6 \dot{\varepsilon}_* e^{-1,05U}; \quad t_\sigma = 0,37/\dot{\varepsilon}_*; \quad t_\varepsilon = 0,056/\dot{\varepsilon}_*; \quad (4.13)$$

$$t_\sigma = 1500H_0; \quad t_\varepsilon = 250H_0,$$

де $\dot{\varepsilon}_*$ - постійне значення градієнту швидкості.

Компресійні характеристики при осьовому стиску цілих тканин м'яса досліджували на м'язах яловичини [13]. Використовували для узагальнення даних експерименту складну механічну модель з трьома послідовно з'єднаними ланками: моделі Фойгта – Кельвіна, нелінійно – пружного елемента та паралельно з'єднаних моделі Максвелла з нелінійно – пружним елементом та елементом, який фіксує значення деформації. Напруження стиску змінювали від 0 до $1,2 \cdot 10^5$ Па; в'язкість моделі Фойгта – Кельвіна - $1,7 \cdot 10^7$ Па·с; в'язкість моделі нелінійно – пружного тіла з фіксаторами деформацій - $5,2 \cdot 10^8$ Па·с; період релаксації моделі Фойгта – Кельвіна 45 с; модуль пружності моделі Фойгта – Кельвіна $3,8 \cdot 10^5$ Па.

Питання для самоконтролю

1. За якою залежністю визначається відносна деформація стиску?
2. Як визначають «лінійну» в'язкість?
3. За допомогою якої моделі можна описати поведінку тонкопо-

дрібненого ковбасного фаршу при осьовому стиску?

4. Яку механічну модель використовували для опису компресійних характеристик при осьовому стиску цілих тканин м'яса?

4.2.2 Компресійні характеристики при об'ємному стиску

Компресійні характеристики фаршу при об'ємному стиску вивчали за допомогою консистометра Гепплера та спеціальних приборів – циліндрів з поршнем та водяною оболонкою.

Типові компресійні криві наведені на рисунку 4.11.

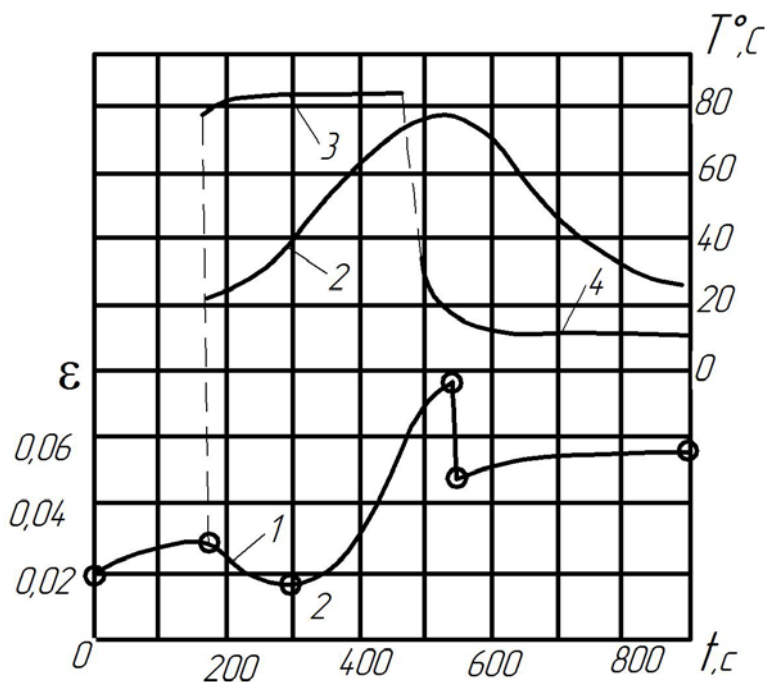


Рисунок 4.11 – Типові криві, які описують поведінку ковбасного фаршу при нагріванні у формі під тиском:

1 – кінетичні криві деформації та спаду деформації; 2 – температура у центрі зразку фаршу при нагріванні та охолодженні; 3 – температура середовища, яке гріє; 4 – температура середовища, яке охолоджує

За кінетичними кривими для рівноважного стану може бути знайдений коефіцієнт об'ємного стиску протягом дії гідростатичного тиску p (Па) 180 с:

$$\beta(p, 180) = \varepsilon(p, 180)/p = a_{\varepsilon}^* p^{a_1 - 1}. \quad (4.14)$$

Значення коефіцієнтів до рівняння, що отримані для всіх експериментальних кривих, наведені у таблиці 4.19.

Загальна деформація фаршу складається з трьох зон. При напруженнях, менших границі міцності, яка у середньому дорівнює 10^5 Па, реалізується зона миттєво – пружних деформацій. Для неї модуль пружності дорівнює $0,6 \cdot 10^7$ Па.

Таблиця 4.19 – Значення коефіцієнтів рівняння (4.14) та бокового тиску

Фарш	$a_\varepsilon \cdot 10^4$	a_1	a_2	$a_\varepsilon^* \cdot 10^4$	Бокового тиску
М'ясо яловиче I сорту подрібнене	5,2	0,32	0,0580	5,87	0,75-0,80
Фарш чайної ковбаси	5,2	0,32	0,0140	5,36	0,80-0,85
Фарш докторської ковбаси	4,8	0,32	0,0092	4,90	0,82-0,84
Фарш для сосисок	4,6	0,32	0,0080	4,70	0,85-0,93

Величина максимальної пружної відносної деформації досягає $1,6 \cdot 10^{-2}$, при збільшенні навантаження вона залишається постійною. Друга зона пружної післядії знаходиться у границях напружень $1 \cdot 10^5 - 3,5 \cdot 10^5$ Па. Третя зона пластичних деформації знаходиться в області напружень, які перевищують $3,5 \cdot 10^5$.

Загальна деформація залежить не тільки від напруження, а також від тривалості його дії. Коефіцієнти рівняння залежать від біологічного та фізичного стану м'яса. Похибка розрахунків $\pm 15\%$. Інтервали змінних, при яких справедливе рівняння: $3,5 \cdot 10^5 - 16 \cdot 10^5$ Па, 1-180 с. Наведені результати отриманні для форм малого об'єму. При змінненні об'єму форми коефіцієнти змінюються, але принципіальне загальна картина залишається незмінною.

Досліджувався коефіцієнт бокового стиску ковбасного фаршу та розподілення тиску в ньому по висоті циліндру [13, 41]. Залежності між осьовим та боковим тиском, отриманні більш ніж для ста експериментів, дозволили розраховувати величини коефіцієнтів бокового тиску, які наведені у таблиці 4.19.

Реологічні характеристики фаршу при об'ємному стиску в циліндричних формах діаметром 0,053 м та висотою до 0,1 м визначали на компресійному обладнанні, в якому фарш піддавали стиску між двома поршнями. За експериментальними даними отримані залежності для визначення релаксаційних характеристик фаршу:

$$E_R = a_1 e^{b_1}; t_\sigma = a_2 e^{-b_2}, \quad (4.15)$$

де $a_1 = 2,69 \cdot 10^6$ Па; $a_2 = 100$ с; $b_1 = 0,085U$; $b_2 = 0,09U$;

U - вологовміст фаршу, кг води на 1 кг сухого залишку.

Відхилення експериментальних даних від розрахункових при змінненні вологовмісту від 1,5 до 4,5 не перевищує 4%.

Комплексні дослідження об'ємного стиску фаршу при термообробці у формі необхідні при створенні автоматизованих ліній виготовлення ковбасних виробів без оболонки [13].

На кінетичних кривих (рисунок 4.11) з моменту початку варки - від 180 с та у подальшому - деформації зменшуються. При найменшому тиску ($0,312 \cdot 10^5$ Па) деформація переходить у від'ємну область, тобто об'єм фаршу стає більший ніж початковий.

Температура, при якій деформація досягає мінімуму, залежить від вологовмісту, збільшуючись при його підвищенні; її значення змінюються від 55 до 65⁰С. Зменшення відносної деформації фаршу при нагріванні характеризується питомою роботою деформації. Найменше значення питомої роботи відповідає «еталонному» вологовмісту. При подальшому нагріванні фаршу до готовності деформації збільшуються, а об'єм зменшується, якщо відбувається відокремлення жиру та бульйону з продукту. А, якщо форма герметична, то зменшення об'єму незначне.

Суттєву роль при термообробці фаршу в формі грає тиск, який прикладений до торців форми [13]. Дослідженні компресійні характеристики цілих тканин м'яса яловичини при об'ємному стиску. Границі змінення тиску від $1 \cdot 10^5$ Па до $13 \cdot 10^5$ Па. Визначенні характеристики: миттєвий модуль пружності $11,6 \cdot 10^5 p^{0,4}$; максимальна деформація при тривалості дії тиску 180 с - $1,34 \cdot 10^{-5} p^{0,78}$; кінетика змінення відносних деформацій після розвантаження.

Були проведені експериментальні дослідження механічної поведінки деформованих м'ясних фаршів, які володіють пластичними властивостями у сполученні з пружними та в'язкими. Оскільки для м'ясних фаршів важливо зберігати форму та міцність виробів, тому нами розглянута повзучість зразків. Отримані криві розвитку та спаду деформацій наведені на рисунку 4.12 [23].

Зразки піддавалися деформації зсуву під дією постійного напруження, прикладеного в початковий момент часу ($t=0$), яке залишалось незмінним протягом $t=120$ с. Після зняття навантаження поведінка зразків досліджувалася протягом 120с. З рисунку 4.12 видно, що характер змінення деформацій повзучості для всіх зразків не змінюється. В момент прикладення напруження виникає миттєва пружна деформація та починається в'язко-пластична течія. Пружність зразків

з додаванням напівфабрикату на основі печериці та насіння гарбуза зменшується у порівнянні з контрольним зразком. Для контрольного зразку $\gamma = 1,85\%$, для зразку з додаванням 10% напівфабрикату $\gamma = 3,23\%$, а для зразку з додаванням 30% напівфабрикату $\gamma = 4,09\%$.

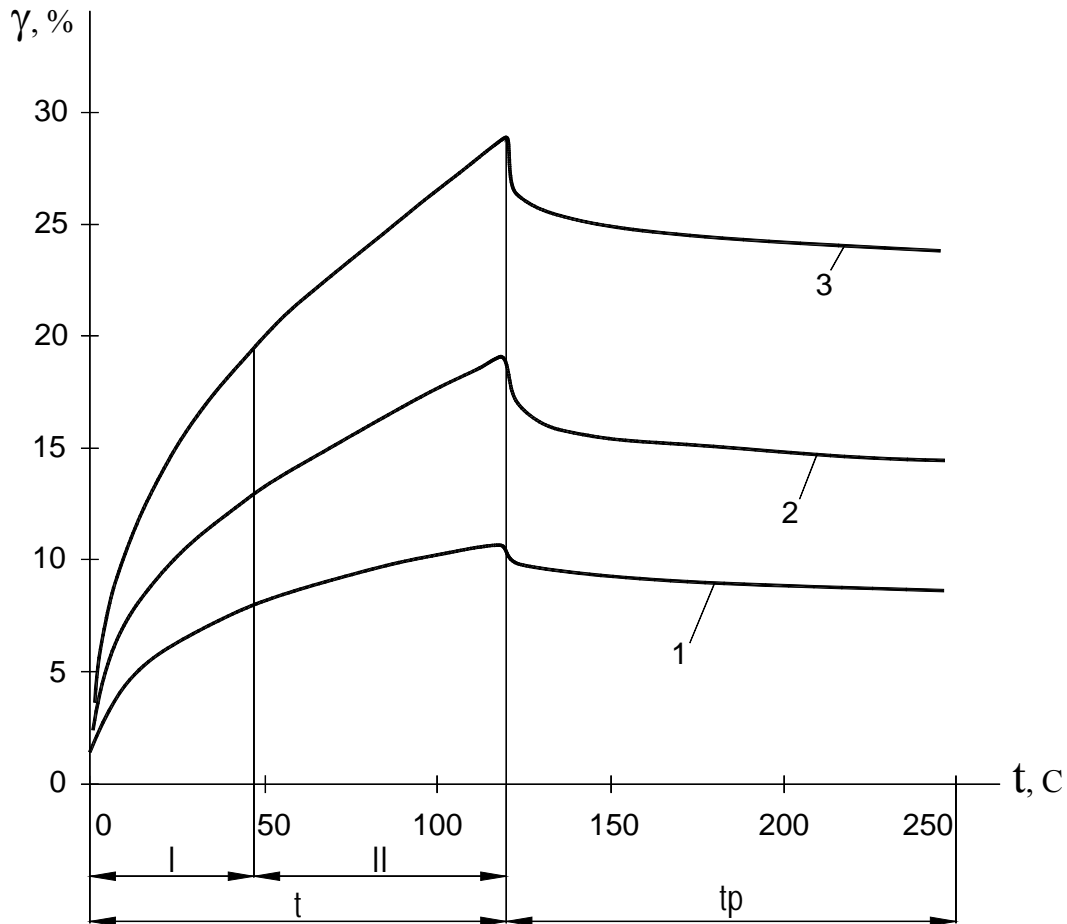


Рисунок 4.12 - Криві повзучості зразків:

- 1 - контрольний зразок; 2 - зразок з додаванням напівфабрикату на основі печериць та насіння гарбуза у кількості 10%;
- 3 - зразок з додаванням напівфабрикату у кількості 30%

На криволінійній ділянці I одночасно протягом часу розвиваються пружна деформація запізнювання, в'язка та в'язко-пластична течії. На ділянці II деформація наростає з постійною швидкістю, яка характеризується тангенсом кута нахилу кривих деформації, тобто зі збільшенням додавання напівфабрикату швидкість деформації зростає. Після зняття напруги ($t=120c$) миттєва пружна деформація миттєво зникає. Релаксація, у даному випадку відбувається внаслідок деформації запізнювання, тобто відбувається в'язко-пружна релаксація.

Деформації в'язкої та пластичної течії залишаються сталими та дорівнюють величині, яку вони досягли в момент зняття напруження.

Питання для самоконтролю

1. Які типові криві описують поведінку ковбасного фаршу при нагріванні у формі під тиском?
2. За якими кривими може бути знайдений коефіцієнт об'ємного стиску протягом дії гідростатичного тиску p ?
3. З яких зон складається загальна деформація фаршу та від чого вона залежить?
4. За якими залежностями визначаються релаксаційні характеристики фаршу?
5. Які закономірності змінення характеристик об'ємного стиску фаршу при термообробці?
6. Як впливає додавання напівфабрикату на основі печериці та насіння гарбуза до м'ясних фаршів на їх пружність?

4.2.3 Компресійні характеристики в процесі деформування під дією високого тиску

Проведені дослідження змінення структурно – механічних та термодинамічних характеристик ковбасного фаршу в процесі деформування під дією високого тиску [23]. Під дією високого тиску в продукті виникають складні термодинамічні процеси, які супроводжуються внутрішніми змінами матеріалів на молекулярному рівні.

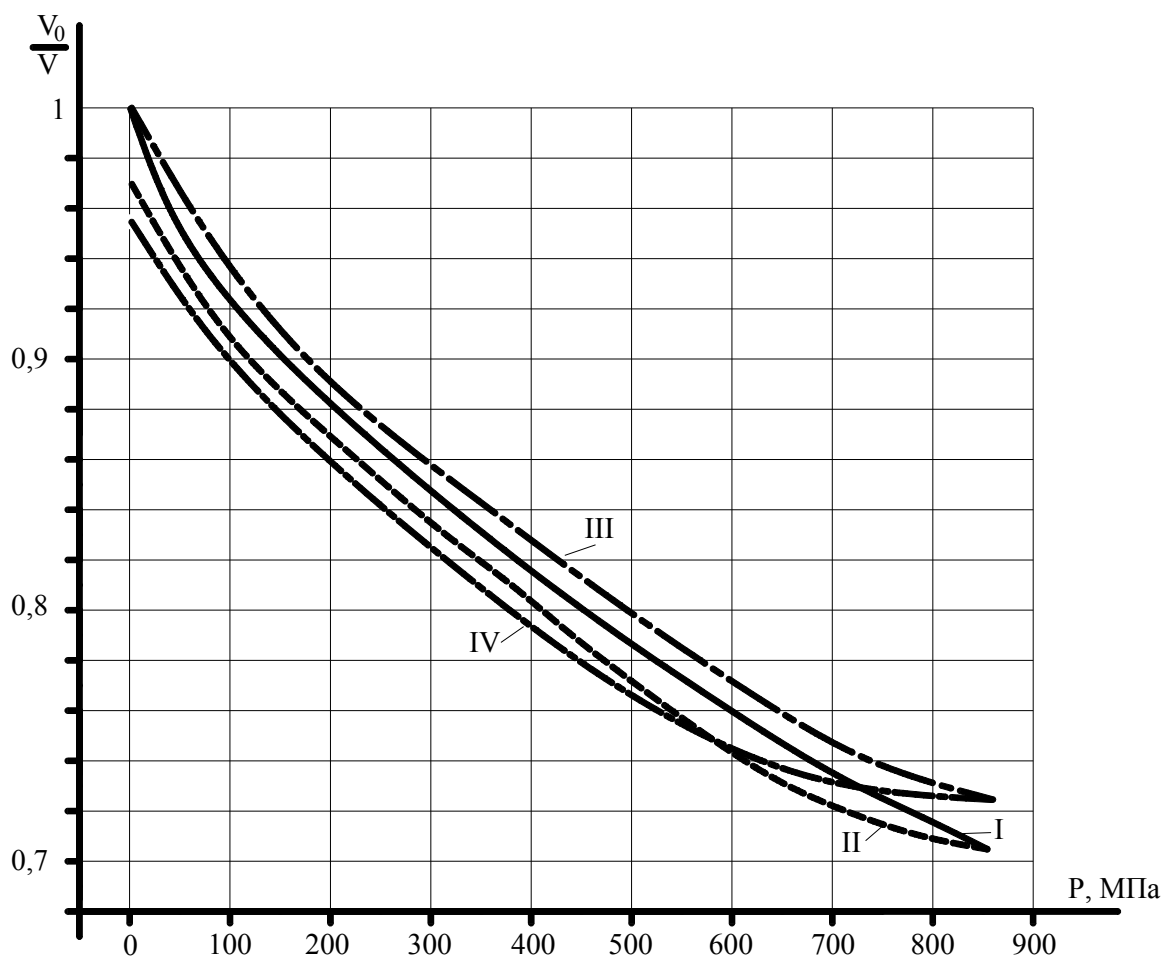
В ковбасних фаршах відбуваються складні фізико-хімічні перетворення, пов'язані з новим структурним утворенням та зміненням реологічних властивостей, завдяки деформаціям, які нерівномірно розгортаються за часом. Так як фарш володіє стисливістю, то щільність суттєво залежить від тиску, початковий та кінцевий стан фаршу при об'ємному стиску залежить від параметрів термодинамічного процесу, який при цьому відбувається.

Для вивчення впливу високого тиску на властивості фаршів проведені експериментальні дослідження зразків вареної ковбаси «Докторська». Досліджувалися зразки сирого фаршу та готового продукту. Вимірювання проводились на установці, яка розроблена та експлуатується в проблемній лабораторії «Дослідження високого тиску в харчових технологіях» Донецького національного університету

економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського.

Зразки піддавалися впливу гідростатичного тиску в діапазоні від 0 до 850 МПа при температурі $24^{\circ}\text{C}\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Безпосередньо вимірювався об'єм зразків, повторність проведення експериментальних досліджень – трикратна. Змінення об'єму реєструвалося на ПК у вигляді графічних залежностей у періоди збільшування та скидання тиску.

На рисунку 4.13 наведені результати вимірювань у вигляді кривих змінення відносного об'єму зразків.



I – сирий фарш при збільшенні тиску; II – сирий фарш при скиданні тиску; III – готовий продукт при збільшенні тиску; IV – готовий продукт при скиданні тиску.

Рисунок 4.13 – Змінення відносного об'єму зразків під дією тиску

Для отримання достовірних даних про вплив високого тиску на фарш необхідно забезпечити постійність температури робочого середовища протягом циклу, оскільки процес обробки харчових продуктів тиском завжди супроводжується підвищенням температури. Вивчали

стисливість фаршу, тобто вимірювали об'єм як функцію тиску при постійній температурі $24^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

Для виключення впливу температурних ефектів підвищення тиску виконувалося нерівномірно, навантаження втримувалися протягом тривалого часу. Темп створення тиску залежав від вирівнювання температури після зміни тиску та контролювався програмою, яка забезпечує сталість заданого температурного режиму.

Компресійні властивості фаршів характеризуються відносною об'ємною деформацією, модулем об'ємної пружності, коефіцієнтом об'ємного стиску, щільністю. Змінення об'єму є визначаючим фактором дії тиску.

При наданні тиску діється більш повне відносне зміщення часток, проникнення і розподілення всіх компонентів фаршу. Це сприяє різкому прискоренню обмінних, дифузійних і фільтраційних процесів, а тому скорішої течії фізико-хімічних і біохімічних процесів. Сумарний ефект діяння тиску на продукт складається з термічного і механічного факторів.

У таблиці 4.20 означені змінення відносної об'ємної деформації стиску в % на інтервалах тиску в діапазоні дослідження.

Таблиця 4.20 – Змінення відносної об'ємної деформації стиску

Тип зразку	Діапазон тиску, МПа								
	0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-850
Сирий	25	16	12	10	10	9	8	7	3
Готовий	21	15	13	12	11	9	8	8	3

Визначено, що 36-41 % змінення об'єму зразків діється в інтервалі тиску від 0 до 200 МПа. В ковбасних фаршах частки дисперсної фази складаються не з окремих молекул, а з їх конгломератів, які володіють термодинамічними властивостями фази. Об'єм фаршу під дією тиску змінюється в результаті стиску пухирчиків повітря, взаємного зміщення часток структури та їх об'ємної деформації.

Найбільшій деформації фарш підлеглий в діапазоні тиску 0 до 100 МПа. На цієї ділянці при нарузі меншої границі пружності ($\approx 0,1$ МПа) виникає миттєва пружна деформація, яка, досягнувши максимуму при збільшенні навантаження, залишається постійною. При цьому під дією зовнішньої напруги порушується внутрішнє молекулярне та міжмолекулярне силове поле системи, і накопичується відповідна кількість потенційної енергії всередині її. Внутрішні напруги

врівноважуються діючими зовнішніми силами. При збільшенні тиску виникає зона пластичних деформацій, відбувається руйнування зв'язку між дисперсним середовищем та дисперсною фазою.

Коагуляційні структури утворюються у дисперсних системах взаємодією між частками і молекулами через прошарки дисперсного середовища завдяки Ван-дер-Ваальсових сил зчеплення. Товщина прошарки відповідає мінімуму вільної енергії системи. Ефект збільшення сили сполучання часток фаршу досягає максимуму під тиском 50-100 МПа. При цьому відбувається зміцнення структури та руйнування зв'язку між дисперсним середовищем і дисперсною фазою.

Зі збільшенням тиску темп змінення деформацій знижується. Оскільки при низьких тисках між молекулами є значний вільний простір, тому вони легко зближуються, і більша частина стиску відбувається при низькому тиску внаслідок заповнення вільного простору. Товщина прошарок залежить від вмісту дисперсійного середовища. При високих тисках вільний простір вичерпується, і значна частина стислості відбувається тому, що стискаються самі молекули. При тому, такий стан, майже не змінюючись, зберігається протягом всього інтервалу тисків, які розглядалися.

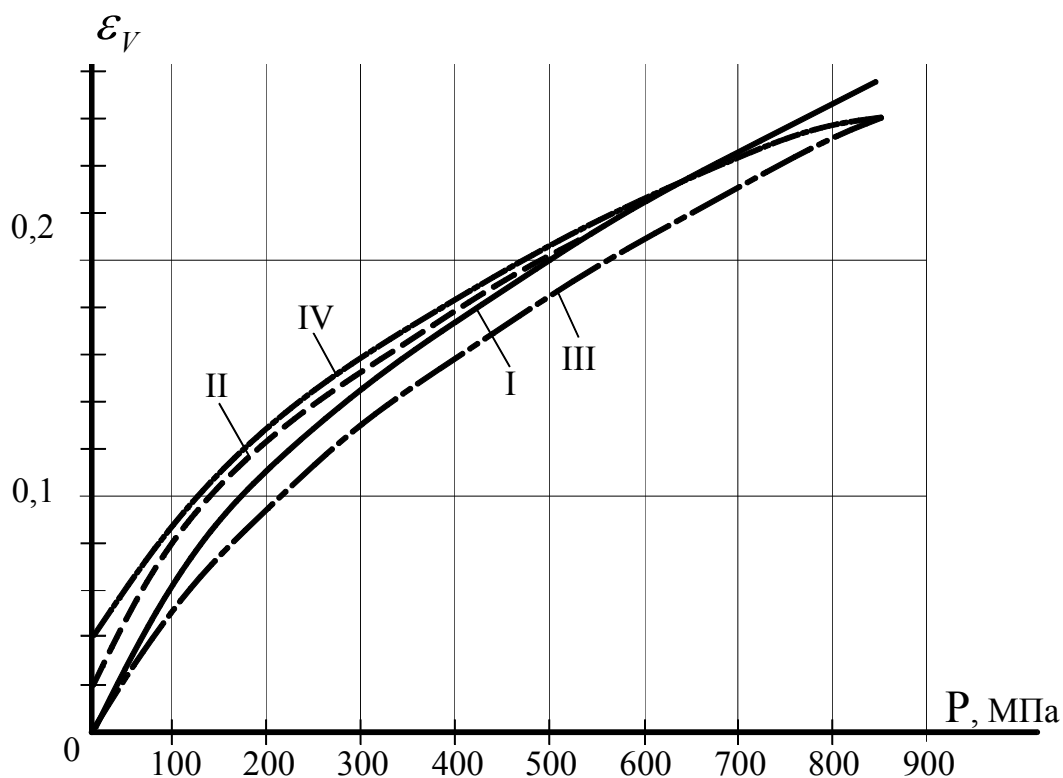
Змінення, які виникають у фаршах при впливі тиску в діапазоні 100-850 МПа, обумовлені варіюванням властивостей білків та води. Змінення стану води відображається на властивостях фаршу, в якому її зміст складає 80%. У заданому діапазоні тисків в'язкість води збільшується в 4-4,5 раз. Деформація молекул є складною функцією тиску та середовища, в якому вона знаходиться, і має бути одним з факторів, які впливають на здібність молекул вступати до реакції. Деформація і осідання структурних елементів фаршу визиває аналогічні процеси зразку в цілому [47].

При тиску нижче 1000 МПа утворення і розрив ковалентних зв'язків не відбувається. З молекул, які розчиненні у воді, високомолекулярні з'єднання (білки, нуклеїнові кислоти, полісахариди, жирні асоційовані похідні або їх складні комплекси), що необхідні для підтримки функції та структури продукту, зберігають первинну та вторинну структуру. Зменшення об'єму веде до укріплення зв'язків між частками фаршу, збільшенню в'язкості та міцності структури. В найбільшому ступеню в'язкість фаршів збільшується в діапазоні тиску 350-400 МПа. Під впливом тиску в заданому діапазоні фарш ущільнюється, підвищується його однорідність, і граничне напруження зрушення значно зростає. Таким чином, змінення, які діються в ков-

басних фаршах під дією тиску, можна класифікувати трьома групами: морфологічні, біохімічні та генетичні. Морфологічні змінення – це змінення розмірів клітин. Біохімічний ефект тиску міститься у впливі на внутрішні молекулярні зв'язки. Генетична група ефектів тиску міститься у впливі на нуклеїнові кислоти.

Фарші відносяться до термодинамічне стабільних систем, тобто володіють здібністю до самодовільному відновленню після руйнування, що видно з рисунку 4.13. Після руйнування міцність наростає поступово в результаті броунівського руху високодисперсних часток при попаданні на коагуляційні контакти. При скиданні тиску пружні деформації зникають, але мають бути залишкові пластичні деформації, які поступово відновлюються після зняття навантаження.

На рисунку 4.14 наведені залежності відносної об'ємної деформації сирого і готового фаршів при збільшенні та скиданні тиску.



I – сирий фарш при збільшенні тиску; II – сирий фарш при скиданні тиску; III – готовий продукт при збільшенні тиску; IV – готовий продукт при скиданні тиску

Рисунок 4.14 – Залежність змінення відносної об'ємної деформації зразків від тиску

На основі експериментальних даних отримані залежності відно-

сної об'ємної деформації від тиску, які наведені в таблиці 4.21.

Таблиця 4.21 - Залежності відносної об'ємної деформації від тиску

Тип зразку	Вид навантаження	Залежність	S_0	S_1	$F = \frac{S_1}{S_0}$	$F_{кр} = F_{0,05(9;7)}$
Сирий фарш	$0 \rightarrow P$	$\varepsilon_V = e^{-5,581} P^{0,641}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	3,75
	$P \rightarrow 0$	$\varepsilon_V = e^{-4,865} P^{0,53}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	
Готовий продукт	$0 \rightarrow P$	$\varepsilon_V = e^{-6,212} P^{0,726}$	$5,17 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	
	$P \rightarrow 0$	$\varepsilon_V = e^{-4,784} P^{0,516}$	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	

Адекватність моделей оцінювалася дисперсією відносного середнього значення параметру оптимізації S_0 , дисперсією адекватності рівнянь S_1 та критерієм Фішера F . Отримані залежності не враховують нульову точку. Але визначено, що в зоні пружних деформацій при тиску до 0,1 МПа між цими величинами існує лінійна залежність [46]. Цей інтервал тисків не чине впливу на термодинамічний процес, оскільки в цьому діапазоні тиску з фаршем не відбувається якісних змін. Змінення відносної об'ємної деформації від тиску описується степеневою залежністю. Основною причиною змінення відносної об'ємної деформації є змінення структури фаршу під тиском.

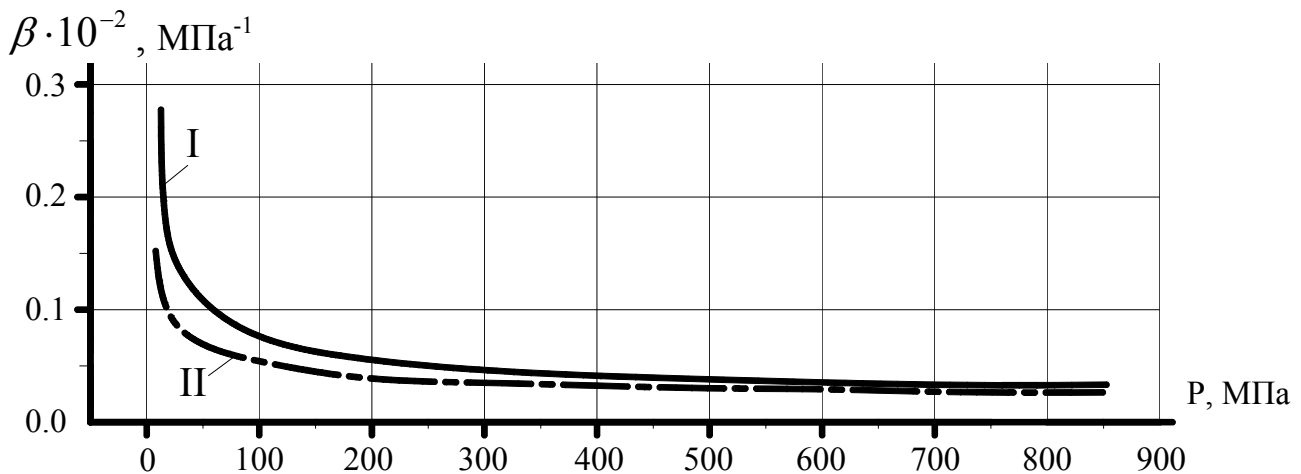
Термодинамічний процес, який досліджувався, характеризується ізотермічним коефіцієнтом стисливості:

$$\beta_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T, \quad (4.16)$$

де V – об'єм зразку; $\left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$ – частинна похідна від об'єму за тиском при постійній температурі.

Цей коефіцієнт характеризує відносне змінення об'єму фаршу при зміні тиску може використовуватися, як інтегральна характеристика процесу. На рисунку 4.15 наведені залежності змінення ізотермічного коефіцієнту стисливості для сирого фаршу та готового

продукту в діапазоні тисків 0-850 МПа.



I – сирий фарш; II – готовий продукт.

Рисунок 4.15 – Залежності змінення ізотермічного коефіцієнту стисливості

Ізотермічний коефіцієнт стисливості значно зменшується зі збільшенням тиску. Змінення коефіцієнту стисливості значно більш при низьких тисках, ніж при високих. Найбільші зміни ізотермічного коефіцієнту стисливості відбуваються в діапазоні тиску від 0 до 100 МПа. Для сирого фаршу на цієї ділянці ізотермічний коефіцієнт стисливості зменшується в 3 рази, а для вареного фаршу – вдвічі.

Це має природне пояснення, так як варений ковбасний фарш має більшу щільність та граничне напруження зрушення ніж сирий. В цьому діапазоні тиску виникає пружна деформація, а ізотермічний коефіцієнт стисливості є протилежною величиною модулю об'ємної пружності матеріалу. При збільшенні тиску відбувається в'язка течія фаршу, і прямопропорційної залежності не має.

Падіння темпу зменшування ізотермічного коефіцієнту стисливості пояснюється тим, що на початку процесу стискування відбувається заповнення вільного простору між молекулами. При збільшенні тиску зміни коефіцієнту стисливості відбуваються тому, що зменшується об'єм молекул речовини.

Різниця між значеннями коефіцієнтів стисливості сирого та вареного фаршів спостерігається в діапазоні тисків до 600 МПа. При підвищенні тиску значення ізотермічних коефіцієнтів стисливості залишаються постійними.

Питання для самоконтролю

1. Які перетворення відбуваються в ковбасних фаршах під впливом високого тиску?
2. Як змінюється відносний об'єм зразків ковбасних фаршів при збільшенні та скиданні тиску?
3. Якими фізичними величинами характеризуються компресійні властивості фаршів під дією високого тиску?
4. З яких факторів складається сумарний ефект діяння тиску на продукт?
5. Чому зі збільшенням тиску темп змінення деформацій знижується?
6. Що характеризує ізотермічний коефіцієнт стисливості?

4.2.4 Характеристики міцності цілих тканин м'яса

Були визначенні характеристики міцності цілих тканин м'яса [13]. Довжина зразків була від 0,01 до 0,02 м при поперечному перерізі 0,005x0,002 м при швидкості розтягу $3 \cdot 10^{-5}$ або $6 \cdot 10^{-5}$ м/с. Оскільки м'ясо відноситься до нелінійних реологічних тіл, то його характеристики міцності залежать від геометричних розмірів зразку та кінематики навантаження. Був встановлений кореляційний зв'язок між характеристиками міцності та органолептичною оцінкою ніжності.

Таблиця 4.22 – Міцність м'яса яловичини на розрив $\sigma_M \cdot 10^{-3}$ (Па) у залежності від ніжності

Органолептична оцінка, бали	Сире м'ясо			Варене м'ясо (всі види м'язів)
	Довгий м'яз спини	Напівсухотильний м'яз	Трапецієвидний м'яз	
2	7,6	17,3	22,2	25,0
3	4,7	12,9	17,9	14,1
4	2,7	10,4	15,0	9,1
5	2,2	9,4	13,6	7,5

Для сирого м'яса напруження розриву залежить від виду м'язу; для вареного м'яса такої диференціації не спостерігається. З покращенням ніжності напруження розриву та модулі пружності зменшуються. У таблиці 4.22 наведені отримані дані.

Була досліджена за допомогою важільного прибору міцність чотирьохголового м'язу яловичини двохденної витримки після забою. Розміри перерізу зразків 0,010 x 0,020 м, довжина 0,080 м. Розтяг

проводили при постійних швидкості деформації та швидкості збільшення навантаження. Отримані значення характеристик міцності м'яса наведені у таблиці 4.23.

Таблиця 4.23 – Характеристики міцності м'яса

Тривалість деформації, с	Напруження $\sigma \cdot 10^{-5}$, Па	Рівноважний модуль $E \cdot 10^{-5}$, Па
3,2*	2,90***	-
0,5**	0,60	2,20
1,0***	1,10	2,55
1,5**	2,25	3,23
1,9**	2,90***	3,60

*Швидкість навантаження $0,91 \cdot 10^5$ Па/с.

** Швидкість деформації 42,5%.

*** Дані відповідають руйнуванню зразку при величині відносної деформації 0,81.

Характеристики міцності цілих тканин м'яса при зрізі через матрицю досліджували за допомогою пуансонів з кутом заточки 90, 80 та 30°. Зразки м'яса товщиною 0,015 м при температурі від +10 до -1,5°C випробували на міцність при різанні упоперек волокон при постійної швидкості переміщення пуансону $4,6 \cdot 10^{-3}$ м/с.

При деформації м'яса до $90 \pm 5\%$ м'язові волокна розрізаються ріжучою кромкою пуансону. З'єднуюча тканина, як більш міцна, ущільнюється та зрізується при збільшенні деформації до $98 \pm 0,3\%$.

Значення величин зусиль різання м'язових волокон, приведених до одиниці довжини ріжучої кромки пуансону відповідно дорівнюють для пуансону з кутом заточки 90° - $3,85 \cdot 10^3$ Н/м, 80° - $3,52 \cdot 10^3$ Н/м, 30° - $2,68 \cdot 10^3$ Н/м. Величини граничних зусиль при повному зрізі зразку змінюються у залежності від куту заточки пуансонів від $5,4 \cdot 10^3$ до $6,2 \cdot 10^3$ Н/м, при цьому деформація зразків наближується до 98%.

Питоме зусилля різання зменшується практично лінійно при збільшенні куту зустрічі ножа: від 5600 Н/м при 0° до 1000 Н/м при 60°, а потім змінюється незначно. Характеристики міцності м'яса при різанні дисковим ножом наведені у таблиці 4.24.

Дослідженні характеристики міцності цілих тканин свинячого шпику досліджували за методом П. А. Ребіндера. Отриманні дані наведені у таблиці 4.25 при зануренні конусу при вершині 30°. Напруження зрізу визначали при нормальному розрізанні циліндричного зразку площиною $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ за допомогою леза. Напруження зрізу

шпику має мінімум при температурі 0⁰С, граничні напруження зсуву шпику та напруження зрізу топленого жиру зі збільшенням температури зменшуються.

Таблиця 4.24 - Характеристики міцності м'яса при різанні дисковим ножем

Окружна швидкість ножа, м/с	Питомі зусилля різання (Н/м) при швидкості подачі продукту до ножу, м/с											
	0,03			0,09			0,15			0,30		
	p_H	p_0	P	p_H	p_0	P	p_H	p_0	P	p_H	p_0	P
1	260	238	353	325	242	405	390	250	463	-	-	-
3	185	283	338	214	286	358	242	294	382	284	302	412
5	144	310	342	166	315	358	188	322	370	215	330	396
7	120	330	352	134	336	364	150	344	378	175	350	390
9	100	345	364	144	350	367	130	357	380	150	366	395
15	60	380	380	76	385	395	90	392	405	110	400	414
24	40	405	405	53	412	412	60	420	420	90	430	440

Примітка. p_H - питоме зусилля у напрямку подачі; p_0 - питоме зусилля у напрямку нормальному подачі; P - загальне зусилля різання, Н/м.

Таблиця 4.25 – Характеристики міцності шпику та жиру

Температура, ⁰ С	Напруження зрізу $\theta_{сер} \cdot 10^{-4}$, Па		Граничне напруження зсуву шпику $\theta_0 \cdot 10^{-4}$, Па
	Шпик	Топлений свинячий жир	
-20	7,0	7,0	-
-10	5,0	5,0	3,2
0	4,0	2,6	1,7
+10	4,5	1,1	0,7
+20	4,8	0,6	-

Питоме зусилля різання шпику дорівнює $1,23 \cdot 10^4$ – $1,28 \cdot 10^4$ Н/м.

Характеристики міцності кісткової тканини крупної рогатої тварини досліджували при розтягу [14].

Були отримані наступні значення міцності на розрив: трубчата кість - $1100 \cdot 10^5$ Па, реберна - $450 \cdot 10^5$ Па, хребетна - $47 \cdot 10^5$ Па.

Твердість кісткової тканини визначали з застосуванням прибору ПМТ – 3 по спеціально розробленої методиці. Осередненні умовні значення твердості: трубчата кість – 37, ребра яловичини – 29, ребра свинини – 19.

Питання для самоконтролю

1. Чи залежить напруження розриву від виду м'ясу для сирого та вареного м'яса?
2. Як залежать величини граничних зусиль при повному зрізі зразку від кута заточки пуансонів?
3. Чи впливає масштабний фактор на напруження зрізу?
4. Який взаємозв'язок між зусиллям різання та кутом зустрічі ножу?

4.2.5 Щільність м'ясних продуктів

Щільність рідинних водно – білкових систем (м'ясний бульйон, кров, обезжирене молоко) визначали пікнометром та ареометром [13].

У залежності від концентрації вона може бути визначена за рівнянням $\rho_{ct} = \rho_{0t} + aC$, значення коефіцієнтів якого наведені у таблиці 4.26.

Таблиця 4.26 – Значення коефіцієнтів рівняння

Продукт	Температура t_c , °C	Границі концентрації c , кг/кг	Коефіцієнт a , кг/м ³	Щільність ρ_{0t} , кг/м ³
М'ясний бульйон	40	0 – 0,20	300	992
Дефібрована кров	40	0 – 0,20	300	992
Молоко	20	0 – 0,12	115	998

Щільність нативного меланжу при змінній температурі від 20

до 60°C зменшується лінійно від 1033 до 1031 кг/м³.

Таблиця 4.27 – Щільність топлених тваринних жирів

Продукт	Щільність (кг/м ²) при температурі, °C		Коефіцієнт температурного розширення 50-95°C $\beta_t \cdot 10^5$, 1/K
	100	50	
Жир яловичини	855	885	72
Жир свинячий	865	890	58
Жир баранини	859	888	66

Щільність тваринних жирів визначається аналогічно щільності білкових систем (таблиця 4.27).

Щільність при проміжній температурі може бути

визначена за формулою: $\rho_t = \frac{\rho_c}{1 + \beta_t(t - t_c)}$, де замість ρ_c приймається щільність жиру при температурі $t_c = 50^\circ\text{C}$.

Щільність тонкоподрібнених видів ковбасного фаршу була досліджена для фаршів докторської ковбаси та руських сосисок [79]. Протягом експериментів вологість W змінювали від 0,65 до 0,73 кг вологи на 1 кг фаршу, жирність φ - від 0,15 до 0,22 кг жиру на 1 кг фаршу. Було отримане рівняння:

$$\rho = 1037 - (290\varphi + 10,5U) + 22\lg p. \quad (4.17)$$

Рівняння справедливе при тиску $0,1 \cdot 10^5 - 16 \cdot 10^5$ Па. Воно отримане у розрахунку на початковий вологовміст U від 1,8 до 2,7 кг вологи на 1 кг сухої речовини фаршу. Помилка в розрахунку щільності не перевищує 3-4%. Величини щільності, визначені експериментально за допомогою компресійного прибору та розраховані за вищенаведеною формулою, наведені у таблиці 4.28.

Таблиця 4.28 – Щільність ковбасного фаршу

Характеристика фаршу		Тиск $p \cdot 10^{-5}$, Па	Щільність, кг/м ³	
Жирність, кг/кг	Вологовміст, кг/кг		За формулою	Опитні величини
0,1826	2,06	0,312	1062	1050-1060
		3,12	1084	1089
		10,6	1095	1116
0,1544	2,55	0,312	1067	1058-1064
		3,12	1089	1106
		10,6	1100	1119
0,1270	2,70	0,312	1071	1065-1082
		3,12	1093	1107
		10,6	1105	1126
0,1108	3,01	0,312	1072	1060-1070
		3,12	1092	1098
		10,6	1104	1120

Щільність кров'яного борошна досліджували при пресуванні її у брикети діаметром 0,035 м та масою 0,02 кг [81]. Було встановлене, що при двобічному пресуванні тиск та витрати енергії менш, ніж при однібічному пресуванні.

Для визначення щільності ρ (кг/м³) при двобічному тиску пресування p (Па) запропонована формула:

$$\rho = \rho_{opt} \left[1 + \rho_n / \rho_{opt} - 1 / (1 + p / p_k) \right], \quad (4.18)$$

де ρ_n - насипна щільність кров'яного борошна до початку пресування, $\rho_n = 450 \text{ кг/м}^3$; ρ_{opt} - оптимальне значення щільності, при вологості 9,5%; $\rho_{opt} = 1170 \text{ кг/м}^3$, при 15% - 1080 кг/м^3 ; p_k - критичне значення тиску, Па; при вологості 9,5% $p_k = 427,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при 15% - $185,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Формула справедлива при змінненні тиску від 0 до $2000 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Щільність брикетів більш, ніж 1000 кг/м^3 досягається при тиску пресування який перевищує критичний. Після закінчення пресування, якщо продукт не витримується у стиснутому стані, відбувається часткове відновлення форми і щільність зменшується. Щільність брикету ρ_0 (кг/м^3) після пресування можна визначити за залежністю:

$$\rho_0 = \rho / (1 + \varepsilon_V), \quad (4.19)$$

де ε_V - об'ємна деформація при розширенні брикету; при вологості 9,5% $\varepsilon_V = 0,15$, при 15% - $0,098$.

Якісні брикети з кров'яного борошна вологістю 9,5% можна отримати при щільності 1150 кг/м^3 , при вологості 15% щільність брикетів повинна бути не менш, ніж 1020 кг/м^3 . Пресувати брикети слід при вологості 9,5% до щільності 1325 кг/м^3 під тиском $1250 \cdot 10^5 \text{ Па}$, при вологості 15% - до 1120 кг/м^3 під тиском $302,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Питання для самоконтролю

1. За якою формулою можна визначити щільність рідинних водно – білкових систем у залежності від концентрації?
2. Як визначається щільність тваринних жирів?
3. За якою формулою можна визначити щільність ковбасного фаршу у залежності від вологості та жирності?
4. Як визначити щільність при двобічному тиску пресування?

4.3 Поверхневі характеристики м'ясних продуктів

4.3.1 Характеристики адгезії (липкість) м'ясних продуктів

Липкість фаршу руських сосисок була досліджена при різних товщині шару та вологовмісту методом нормального відриву [13]. Товщину шару фаршу змінювали у границях $(0,3 - 1,0)10^{-3}$ м, вологовміст U (кг води на 1 кг сухої речовини) мав значення: 2,21; 2,44; 2,70; 3,01. Співвідношення (2.29) виконується при всіх значеннях вологовмісту та у всьому інтервалі змінення товщини шару.

Дані отримані при тиску контакту 2350 Па та тривалості попереднього контакту 300с з пластинами з неіржавної сталі площею $0,001 \text{ м}^2$ при швидкостях відриву – $0,00358 \text{ м/с}$, прикладенні сили – коло 25 Н/с . Отримані дані наведені у таблиці 4.29.

Таблиця 4.29 – Характеристики адгезії фаршу руських сосисок

Вологовміст U кг води на 1 кг сухої речовини	Швидкість прикладення сили w_c , Н/см	Темп зменшення площі контакту $C \cdot 10^4$, $\text{м}^2/\text{с}$	Коефіцієнт поверхневого натягу α , Н/м
2,21	26,3	25,0	17,5
2,44	25,5	21,0	10,0
2,70	25,0	16,5	5,5
3,01	23,0	11,5	3,5

У широкому діапазоні змінення вологовмісту, температури та деяких інших факторів характеристики адгезії при визначених значеннях названих параметрів можуть мати екстремальну величину. У протилежність цьому при збільшенні вологовмісту та температури характеристики зсуву м'ясних продуктів безперервно зменшуються.

Зі збільшенням тривалості t_k (с) та величини p_k (Па) попереднього контакту липкість p_0 (Па) збільшується; її змінення описуються рівнянням:

$$p_0 = p_{01} + a \lg t_k, \quad (4.20)$$

де p_{01} , a - емпіричні коефіцієнти; перший – це липкість при тривалості контакту 1 с, другий характеризує темп зростання липкості при збільшенні тривалості контакту, Па; границі застосування рівняння від 3 до 600 с; значення коефіцієнтів наведені у таблиці 4.30.

Таблиця 4.30 – Характеристики адгезії фаршу докторської ковбаси до різноманітних матеріалів

Матеріал	Коефіцієнти для кінетичного рівняння липкості		Відношення липкості матеріалу до липкості неіржавної сталі при тривалості контакту		Липкість при $t_k=600$ с, Па	$C \cdot 10^4$, $\text{м}^2/\text{с}$
	p_{01} , Па	a , Па	1 – 3 с	300 с		
Дюралюміній	12800	2500	1,04	1,09	19600	4,8
Неіржавна сталь	12300	2100	1,00	1,00	18000	7,3
Сталь Ст.3	11450	2100	0,93	0,96	16980	8,2
Чавун	10500	2100	0,85	0,90	16050	9,4
Латунь	8000	2700	0,65	0,84	15450	10,4
Фторопласт-4	8900	3900	0,72	1,06	18900	5,0

Збільшення тиску контакту p_k веде до збільшення липкості. При високих p_k товщина шару не зберігається постійною. Початкова товщина шару 0,0003 м зберігається незмінною до $p_k=8000$ Па. Потім відрив відбувається вже при меншій товщині, що пов'язане з витіканням фаршу з зазору між пластинами. При p_k більш ніж $2,5 \cdot 10^5$ Па товщина шару перед відривом досягає найменшої величини – 0,00001 – 0,00002 м. Тобто, початкові умови не співпадають з умовами відриву.

Найбільші величини липкості, отримані при найменшій товщині, мають постійне значення приблизно 72000 Па. Цю величину можна вважати істиною адгезією.

Матеріал пластин оказує вплив на величину липкості; значення липкості для різних матеріалів наведені у таблиці 4.30 при товщині шару фаршу 0,0003 м, тиску контакту 4900 Па. Коефіцієнт поверхневого натягу складає біля 4,2 Н/м. Зниження температури фаршу від 17 – 18 до 4 – 5⁰С веде до зменшення липкості на 30 – 40%. Найбільше значення липкості має при температурі 23 – 27⁰С.

Експерименти були проведені при тривалості попереднього контакту 3с, тиску 3440 Па та швидкості відриву 0,00358 м/с. Для зменшення липкості використовують антиадгезійні покриття. У таблиці 4.31 наведені величини характеристик адгезії різноманітних м'ясопродуктів [41].

Таблиця 4.31 – Характеристики адгезії м'ясопродуктів

Пластини		Швидкість відриву $w_0 \cdot 10^3$, м/с	Товщина шару $h \cdot 10^3$, м	Попередній контакт		Липкість P_0 , Па
Матеріал	Площа $F_0 \cdot 10^3$, м ²			Тиск P_k , Па	Тривалість t_k , с	
1	2	3	4	5	6	7
Свинина вздовж волокон						
Сталь Ст.3	1,0	3,58	3,5	3430	3	1500
			3,2		300	3980
	1,0	9,24	3,1	3430	3	2680
			3,3		300	4950
Фторопласт - 4	1,0	3,58	3,2	3430	3	1200
			3,0		300	4220
	1,0	9,24	3,2	3430	3	2470
			3,0		300	5620
Свинина поперек волокон						
Сталь Ст.3	1,0	3,58	3,1	3430	3	1700
			3,4		300	4070
	1,0	9,24	3,1	3430	3	2880
			3,5		300	4620
Фторопласт - 4	1,0	3,58	3,2	3430	3	1400
			3,5		300	4500
	1,0	9,24	3,3	3430	3	2350
			3,4		300	6500
Яловичина вздовж волокон						
Сталь Ст.3	1,0	3,58	3,3	294	3	598
			3,0		300	1401
	1,0	9,24	3,0	3430	3	2980
			3,1		300	6700
Фторопласт - 4	1,0	3,58	3,3	3430	3	1344
			3,9		300	5500
	1,0	9,24	3,3	3430	3	2500
			3,4		300	7000
Яловичина поперек волокон						
Сталь Ст.3	1,0	3,58	3,4	3430	3	1820
			3,5		300	4260
	1,0	9,24	3,0	3430	3	2500
			3,5		300	6200

Питання для самоконтролю

1. Як залежить липкість фаршу від товщини шару та вологовмісту?
2. У залежності від чого характеристики адгезії можуть мати екстремальну величину?

3. Як залежить липкість фаршу від тиску контакту?
4. Чи залежить липкість фаршу від матеріал пластин з якими він стикається?

4.3.2 Фрикційні характеристики м'ясних продуктів

При дослідженнях зовнішнього тертя м'яса та фаршу вимірювання проводили за допомогою трибометра з теліжкою. Зразок продукту висотою 0,005 м розміщували у рамці площиною 0,0010 м², рамку встановлювали на поверхню, яка досліджується, протягом 60с створювали попередній контакт. Теліжка мала чотири швидкості зміщення: 0,00547; 0,0171; 0,0342; 0,0513 м/с [238].

У таблиці 4.32 наведені значення істинного коефіцієнту зовнішнього тертя та липкості зсуву для деяких м'ясопродуктів. Тиск контакту знаходився в границях від 0 до 5000 Па.

Таблиця 4.32 – Фрикційні характеристики м'ясопродуктів при русі вздовж неіржавної сталі

Продукт	Швидкість зміщення $w_0 \cdot 10^3$, м/с	Липкість зсуву, Па		Істинний коефіцієнт тертя	
		Статична	Динамічна	Статичний	Динамічний
Яловичина поперек волокон	5,47	7000	3000	0,10	0,11
	17,10	7000	5200	0,17	0,18
	34,20	7000	3000	0,14	0,19
	51,30	7000	3000	0,17	0,13
Фарш докторської ковбаси	17,10	10000	2500	0,14	0,21

У динамічному режимі істинні коефіцієнти тертя залежать від швидкості зміщення, матеріалу пластин, але не залежить від тиску контакту; при цьому липкість залишається практично постійною, що обумовлене малим часом контакту продукту з поверхнею.

Для початку руху процес ускладнюється. При різних тисках контакту липкість повинна бути різною, але для різних тисків контакту липкість залишається постійною. У таблицях 4.33, 4.34 наведені значення ефективних коефіцієнтів зовнішнього тертя для м'ясопродуктів при діянні різних факторів [13]. (Для кожної швидкості верхня строчка – статичне значення ефективного коефіцієнту тертя в момент початку зсуву, нижня – динамічне значення для усталеного руху).

Таблиця 4.33 – Значення ефективного коефіцієнту зовнішнього тертя для яловичини при ковзанні поперек волокон вздовж неіржавної сталі

Швидкість зміщення $w_0 \cdot 10^3$, м/с	Тиск контакту, Па				
	980	1960	2940	4900	980 по сліду
	По сухої поверхні				
5,47	0,85	0,46	0,33	0,23	0,76
	0,43	0,30	0,23	0,17	0,35
17,1	1,45	0,81	0,60	0,43	1,35
	1,23	0,72	0,54	0,38	1,18
34,2	1,30	0,79	0,47	0,34	1,28
	0,80	0,52	0,40	0,29	0,70
51,3	1,97	0,94	0,56	0,42	1,63
	0,50	0,34	0,27	0,19	0,40

При збільшенні тиску контакту питома сила тертя зростає лінійно до тисків контакту 3000Па, відхиляючись потім доверху або донизу в залежності від виду тертя (статичне або динамічне) та властивостей пари тертя. При цьому ефективний коефіцієнт тертя зменшується, а статичні і динамічні його значення зближуються. З помилкою $\pm 5\%$ криві лінії, які характеризують зменшення коефіцієнту, апроксимуються степеневими залежностями.

Таблиця 4.34 – Значення ефективного коефіцієнту зовнішнього тертя для фаршу докторської ковбаси

Матеріал	Швидкість зміщення 0,0171 м/с при тиску контакту, Па			
	98	980	1960	3920
По сухої поверхні				
Неіржавна сталь	14,10	1,59	0,85	0,48
	5,65	0,75	0,49	0,29
Сталь Ст.3	13,25	1,48	0,80	0,44
	5,00	0,72	0,43	0,29
Латунь	14,20	1,54	0,83	0,48
	5,30	0,73	0,45	0,31
Чавун	12,90	1,46	0,77	0,44
	5,44	0,73	0,47	0,30
Фторопласт-4	11,75	1,25	0,68	0,36
	5,44	0,75	0,49	0,31
По змоченої поверхні				
Неіржавна сталь	9,70	0,98	0,53	0,36
	4,20	0,62	0,40	0,26
Сталь Ст.3	8,70	0,87	0,46	0,25
	4,50	0,65	0,40	0,24
Латунь	11,70	1,14	0,65	-
	5,10	0,75	0,46	0,27

Величина показника ступені 0,8 – 0,5. Стичний коефіцієнт має більший показник ступені, що вказує на зближення числових значень

коефіцієнтів при високих тисках контакту.

Матеріал поверхні, анізотропія м'язових тканин, швидкість зміщення оказують вплив на питому силу тертя та ефективний коефіцієнт тертя. З підвищенням тиску починається інтенсивне виділення м'ясного соку. При цьому поверхні волокон м'яса та матеріалу роз'єднуються плівкою, яка збільшує відстань між поверхнями, що труться. Оскільки сили молекулярної взаємодії різко зменшуються зі збільшенням відстані, то кількість точок істинного контакту двох тіл значно зменшується, що веде до зниження коефіцієнту тертя.

При вивченні впливу площі контакту на величину ефективного коефіцієнту зовнішнього тертя встановлено, що при малих швидкостях ковзання (0,014 м/с), починаючи з навантаження 14 Н, коефіцієнт тертя практично не залежить від площі контакту.

При порівняно великих швидкостях ковзання (0,143 м/с) та тисках вище $(5-10)10^5$ Па на величину коефіцієнта тертя перестає оказувати суттєвий вплив площа контакту.

Питання для самоконтролю

1. Від чого залежать, а від чого не залежать істинні коефіцієнти тертя у динамічному режимі?
2. Як змінюються питома сила тертя та ефективний коефіцієнт тертя при збільшенні тиску контакту?
3. Які фактори також оказують вплив на питому силу тертя та ефективний коефіцієнт тертя.
4. Як змінюються статичний ефективний коефіцієнт тертя цілих риб від збільшення тиску контакту та тривалості попереднього контакту?

Електромеханічна **універсальна випробувальна машина SANS CMT2503** виробництва "Shenzhen SANS Testing Co. Ltd." (Китай), призначена для контролю якості та проведення досліджень структурно - механічних властивостей: зсувних, компресійних та поверхневих характеристик харчових продуктів.

У машині SANS CMT2503 закладено принцип замкненої цифрової системи керування та вимірювань з застосуванням комп'ютеру, на дисплей якого виводиться вся інформація у цифровому або графічному вигляді. Випробувальна машина SANS CMT2503 відрізняється сучасною конфігурацією, стабільністю в роботі, точністю при одержанні та обробці даних, зручністю експлуатації та обслуговування. При виробництві цієї випробувальної машини використовують сучасні високотехнологічні інтегральні схеми. Вимірювання на цьому приладі базуються на принципі зрізання зразків продукту з прикладанням зусиль з постійною швидкістю 20 мм/хв. Керування всім процесом випробувань здійснюється з комп'ютеру відповідно до програмного забезпечення Навантаження, переміщення, подовження, швидкість та графіки відображаються на дисплеї в режимі реального часу. Програмне забезпечення для одержання та обробки результатів випробувань передбачає автоматичне збереження результатів, всі дані або графіки можна порівняти та уточнити. Принципову схему механічних частин універсальної випробувальної машини SANS CMT2503 наведено на рисунку 3.43.

Технічна характеристика універсальної випробувальної машини SANS CMT2503: максимальне навантаження - 5 кН; клас точності – 1; діапазон зусиль від максимального 0,2 – 100%; точність вимірювання навантаження $\pm 1\%$; розділення навантаження, доля від максимального - 1/300000; хід макроекстензометра 10 – 800мм; точність вимірювання переміщення $\pm 0,5\%$; розділення переміщення 0,03 мкм; швидкість переміщення 0,001 - 500 мм/хв.

Щільність малов'язких рідин вимірюють ареометрами (денсиметрами) і пікнометрами.

Для визначення щільності пластично-в'язких, сипучих та кускових м'ясних продуктів, які змінюють свій об'єм під дією тиску, використовують різні циліндричні посудини, в яких за допомогою поршню створюється підвищений тиск. Один з найбільш поширених приладів подібного виду - **консистометр Геншера** (рисунок 3.44), що має термостатичний корпус, усередині якого розташовується циліндр з поршнем. На поршень діє вантажне облаштування важільного типу.

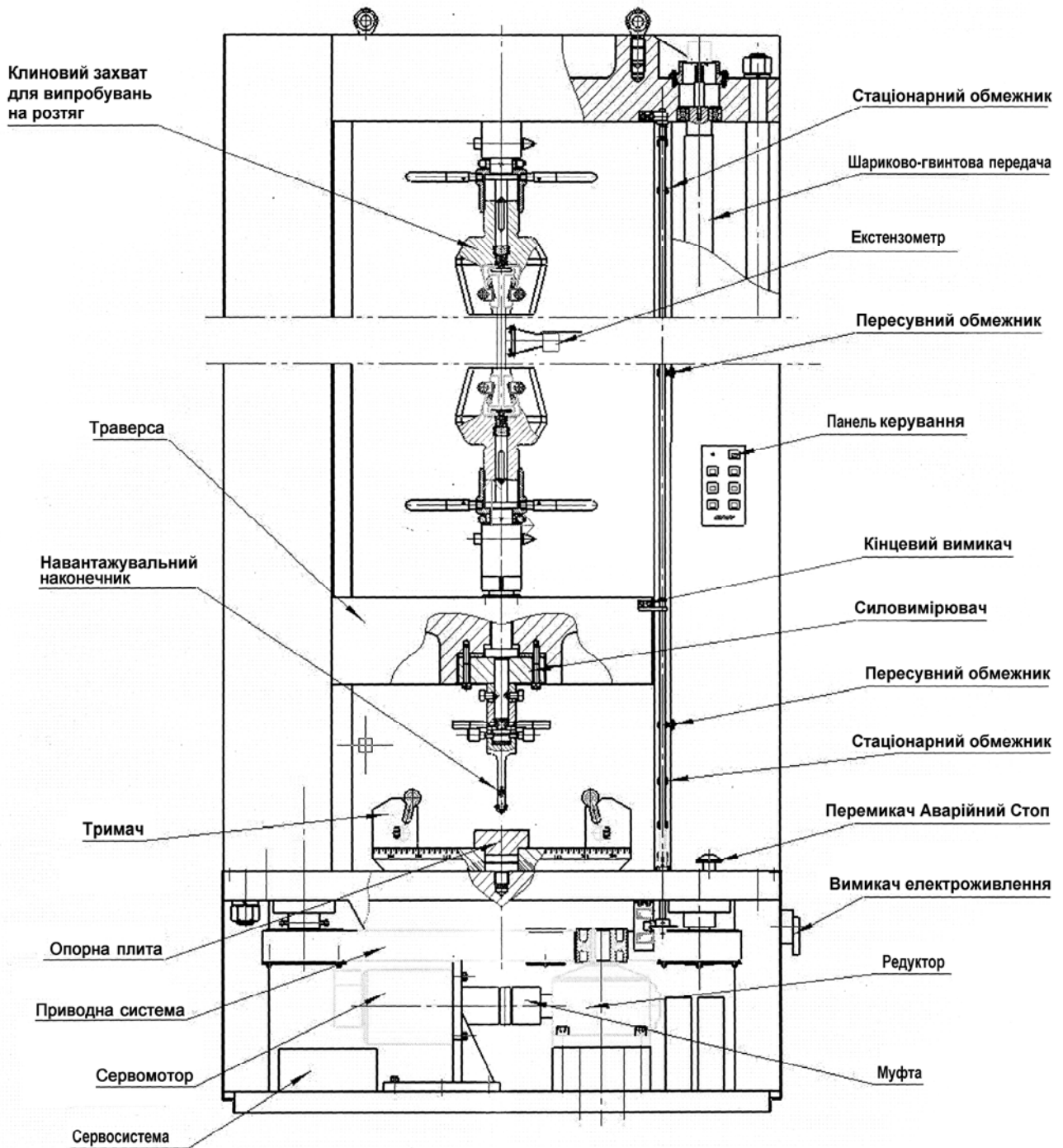


Рисунок 3.43 - Принципова схема механічної частини універсальної іспитової машини SANS CMT2503

Об'єм продукту при цьому тиску визначають по висоті зразку за допомогою індикатора часового типу. Прилад застосовують в лабораторній практиці. Можливості використання його у виробничих умовах обмежені із-за малих розмірів вимірювального циліндра.

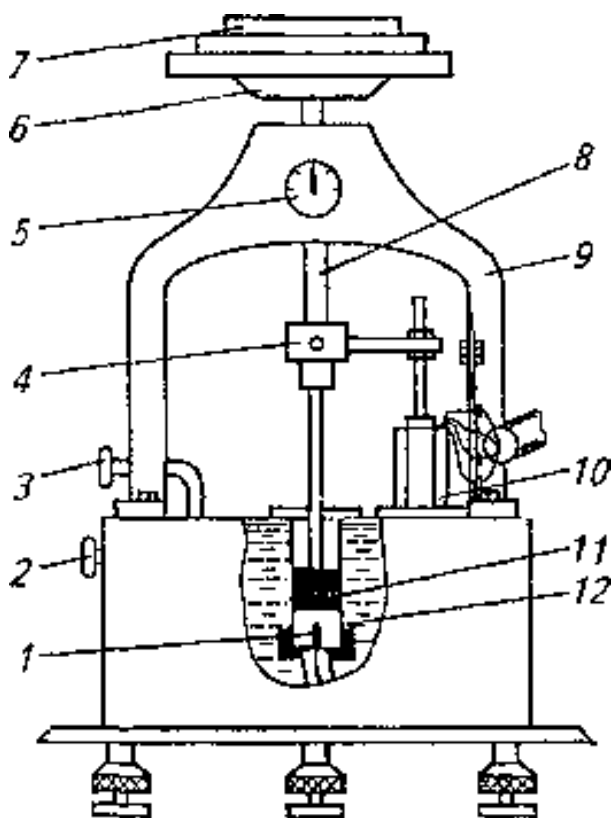


Рисунок 3.44 - Прилад для виміру щільності м'ясного фаршу при різному тиску.

Модернізований консистометр Гепплера:

- 1 - термопара; 2, 3 - штуцера для підведення нагрівальної та охолоджувальної води;
 4 - перехідник; 5 – індикатор;
 6 - вантажний майданчик;
 7 - вантаж; 8 - шток; 9 - станина;
 10 - індукційний датчик;
 11 - поршень; 12 – циліндр

Досконаліший прилад для виміру щільності у великому інтервалі тисків наведений на рисунку 3.45. З його допомогою разом з виміром щільності можна визначати і теплофізичні властивості м'ясних продуктів.

Прилад складається з циліндру, який має водяну сорочку, підвишеного на пружинах, та двох поршнів, між якими закладають досліджуваний продукт. Верхній поршень закріплений нерухомо на корпусі, нижній - на рухливому штоку, який за допомогою вантажів здійснює поступальний рух, забезпечуючи підпресування досліджуваного фаршу. Шток і поршень в неробочому стані зрівноважені (з урахуванням маси фаршу). Для виміру температури фаршу в різних точках встановлені термопари голчастого типу. Плунжер індукційної котушки нерухомо сполучений зі штоком за допомогою важелю, на який спирається також кінець стержню індикатора годинного типу. Деформації можна спостерігати візуально та записувати за допомогою потенціометра по сигналах, отриманих від переміщення сердечника в індукційній котушці.

Прилад для визначення реологічних властивостей тіста Mixolab фірми Chopin Technologies (Франція), наведений на рисунку 3.46. Крутячий момент на валу мішалок при перемішуванні тіста залежить лише від його в'язкості. Прилад дозволяє зробити процедуру

вимірів менш ніж за 15 секунд, істотно скорочується час роботи між випробуваннями. Дозування води, термостатування, вимір крутячого моменту здійснюється автоматично.

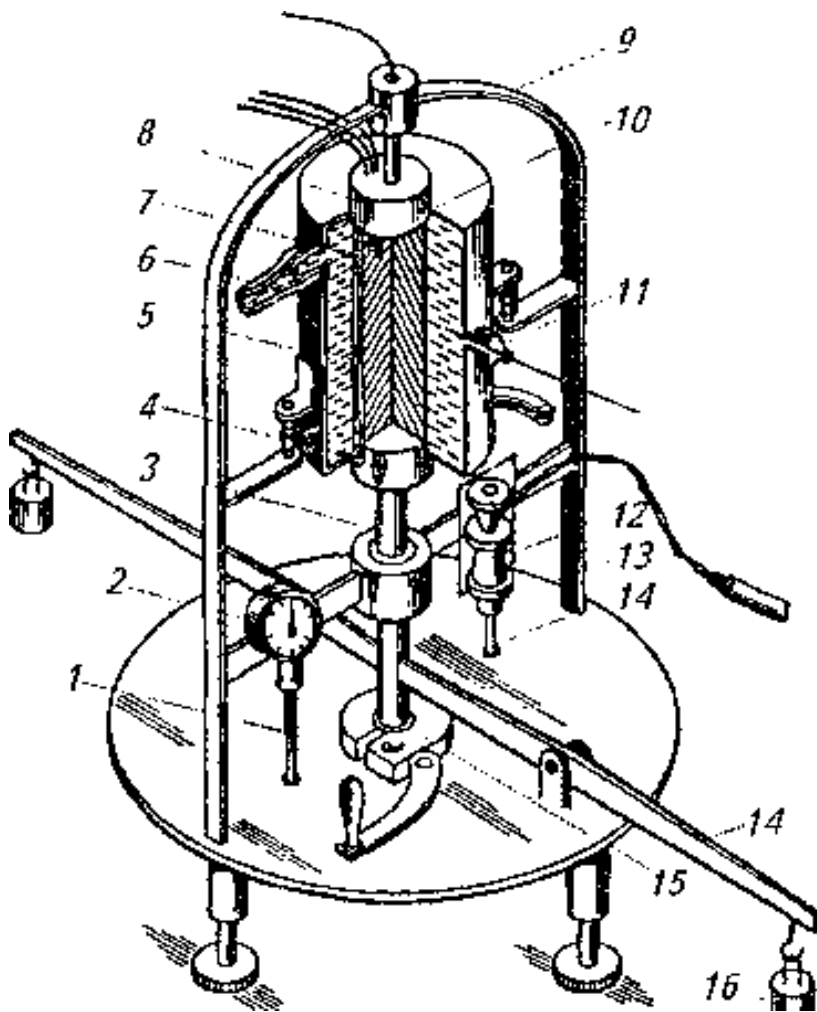


Рисунок 3.45 - Прилади для виміру щільності м'ясного фаршу при різному тиску:

Компресійний α - колориметр:

- 1 - стержень; 2 – індикатор; 3 – пересувний шток; 4, 8 - поршні з теплоізоляційного матеріалу; 5 - фарш; 6 водяна сорочка; 7 – циліндр; 9-станина (рама); 10, 11 – термопари; 12 - індукційна котушка; 13 - плунжер індукційної котушки; 14 – вантажний важіль; 15 - стопорний пристрій; 16 – вантажі



Рисунок 3.46 – Загальний вигляд приладу для визначення реологічних властивостей тіста Mixolab

Mixolab може бути адаптований під конкретну проблему користувача: можна встановити різні температури циклів, міняти швидкість обертання від 55 до 250 об/хв, змінювати зусилля перемішування, тобто підбирати режим, відповідний умовам роботи підприємства. Mixolab вимірює крутячий момент, який, виникає при перемішуванні тіста між двома еталонними мішалками. Вся інформація передається на персональний комп'ютер для її обробки та візуалізації.

Можливості приладу: аналізувати якість білкових зв'язків, водопоглинання, стабільність, еластичність, потужність для перемішування; аналізувати поведінку та температуру при зміні консистенції внаслідок додавання різних доданків; аналізувати ферментативну активність. Тобто повний аналіз борошна та тіста здійснюється в одному пристрої, який вимірює результат внесення доданків і завжди дає можливість мати муку гарантованої якості. Технічна характеристика: напруга - 220 В, 50-60 Гц; споживна потужність - 1000 Вт; маса - 33 кг; розміри: 460 x 505 x 270 мм.



Рисунок 3.47 – Загальний вигляд структурометру СТ-1М

Структурометр СТ-1М (рисунок 3.47) призначений для визначення реологічних характеристик та характеристик міцності макаронних, хлібобулочних виробів та сировини. Структурометр використовується в лабораторіях борошномельних, хлібо та макаронних заводів, кондитерських фабрик, науково-дослідних і навчальних інститутів. Принцип роботи пристрою заснований на вимірі дії нерухомого інструменту на зразок, який переміщується, знаходячись на столику, зі заданою швидкістю.

Пристрій має 8 режимів роботи: 1 - визначення пружних та пластичних деформацій; 2 - визначення властивостей міцності при вигині та різанні; 3 – визначення адгезійних властивостей; 4 – дослідження релаксаційних процесів; 5 - дослідження кінетики деформації; 6 - визначення нормального напруження; 7 – визначення часу релаксації при заданому зусиллі; 8 – визначення часу релаксації при заданому перемі-

щенні столика. Структурометр включає блок управління, змінні вимірювальні голівки, змінні інструменти та пристосування. Блок управління - настільного типу, у верхній частині якого знаходиться круглий столик та вертикальна штанга. Столик може переміщатися у вертикальному напрямі, над столиком встановлена вимірювальна голівка, яка переміщається уздовж штанги та фіксується за допомогою гвинта.

Технічна характеристика: діапазон швидкості переміщення столика - 1-100 мм/хв.; діапазон виміру навантаження - 0,1 -100 Н; похибка виміру навантаження - не більше 1%; діапазон виміру переміщення: 0 – 43 мм; відносна похибка виміру часу – менш ніж 1%; електроживлення - 220 В, 50 Гц; споживана потужність - 30 Вт; габаритні розміри - 200x340x x350 мм; маса – 8 кг.



Рисунок 3.48 – Загальний вид дослідницького комплексу для вивчення компресійних характеристик продуктів харчування

Дослідницький комплекс для вивчення компресійних характеристик продуктів харчування, розроблений у Донецькому університеті економіки та торгівлі ім. М. Туган - Барановського (рисунок 3.48), складається з камери ВТ, преса, гідравлічної системи, системи керування і автоматизації процесу виміру.

Параметри комплексу: тиск у робочій камері - до 1000 МПа; робоча температура від + 10 до + 80⁰С; тиск в оптичній камері високого тиску - до 1000 МПа; максимальне переміщення поршню - $H_{\max} = 0,03$ м; вимірювані параметри

зразків, що перебувають під тиском: температура; тиск; об'єм; щільність; при мінімальній швидкості переміщення поршня (v_{\min}), максимальний час $t_{\max} = 7,46$ хв.; при максимальній швидкості переміщення поршня преса (v_{\max}) мінімальний час $t_{\min} = 0,746$ хв.

Експериментальні дослідження на даному вимірювальному комплексі забезпечуються спеціально розробленим програмним забезпеченням і повністю автоматизовані. Результати досліджень відображаються на екрані монітора у вигляді графіків і таблиць і записуються у відповідний файл бази даних.

Розглянуті прилади дозволяють визначити відносні деформації досліджуваних зразків продукту, побудувати або записати кінетичні залежності деформації і визначити щільність продукту при різних тисках.

Питання для самоконтролю

1. На які види деформацій та навантаження можна випробовувати зразки на універсальній випробувальній машині «Інстрон»?
2. Для визначення реологічних властивостей яких продуктів призначений Альвеограф (виробник Chopin, Франція)?
3. Які параметри харчових продуктів дозволяє оцінити випробувальна машина (текстурометр) TA.XT plus? Які вона має сфери застосування?
4. Для досліджень яких структурно - механічних властивостей призначена електромеханічна універсальна випробувальна машина SANS CMT2503?
5. Чому консистометр Геншера не використовують у виробничих умовах?
6. Які можливості має прилад Mixolab для аналізу борошна та тіста?
7. Де використовується структурометр СТ-1М?
8. Які основні складові має «Дослідницький комплекс для вивчення компресійних характеристик продуктів харчування»?
9. Для яких умов переробки продукту використовують «Дослідницький комплекс для вивчення компресійних характеристик»?
10. Які параметри зразків отримують при дослідженнях з використанням «Дослідницького комплексу для вивчення компресійних характеристик»?

3.6 Методи і прилади для вимірювання поверхневих характеристик

Поверхневі властивості харчових продуктів - адгезія та зовнішнє тертя - проявляються на границі розділу між продуктом і твердою поверхнею.

3.6.1 Адгезіометри

Прилади та методи вимірювання адгезії засновані на руйнуванні адгезійного шву шляхом прикладення зовнішнього зусилля. За способом прикладення зусилля розрізняють методи відриву (рівномірного та нерівномірного) та зсуву (рисунк 3.49).

Вимоги, які пред'являються до адгезіометрів:

- результати, отриманні при вимірюванні, мають бути первинними, тобто не потребувати попереднього тарування на будь-якому еталонному матеріалі, та виража-

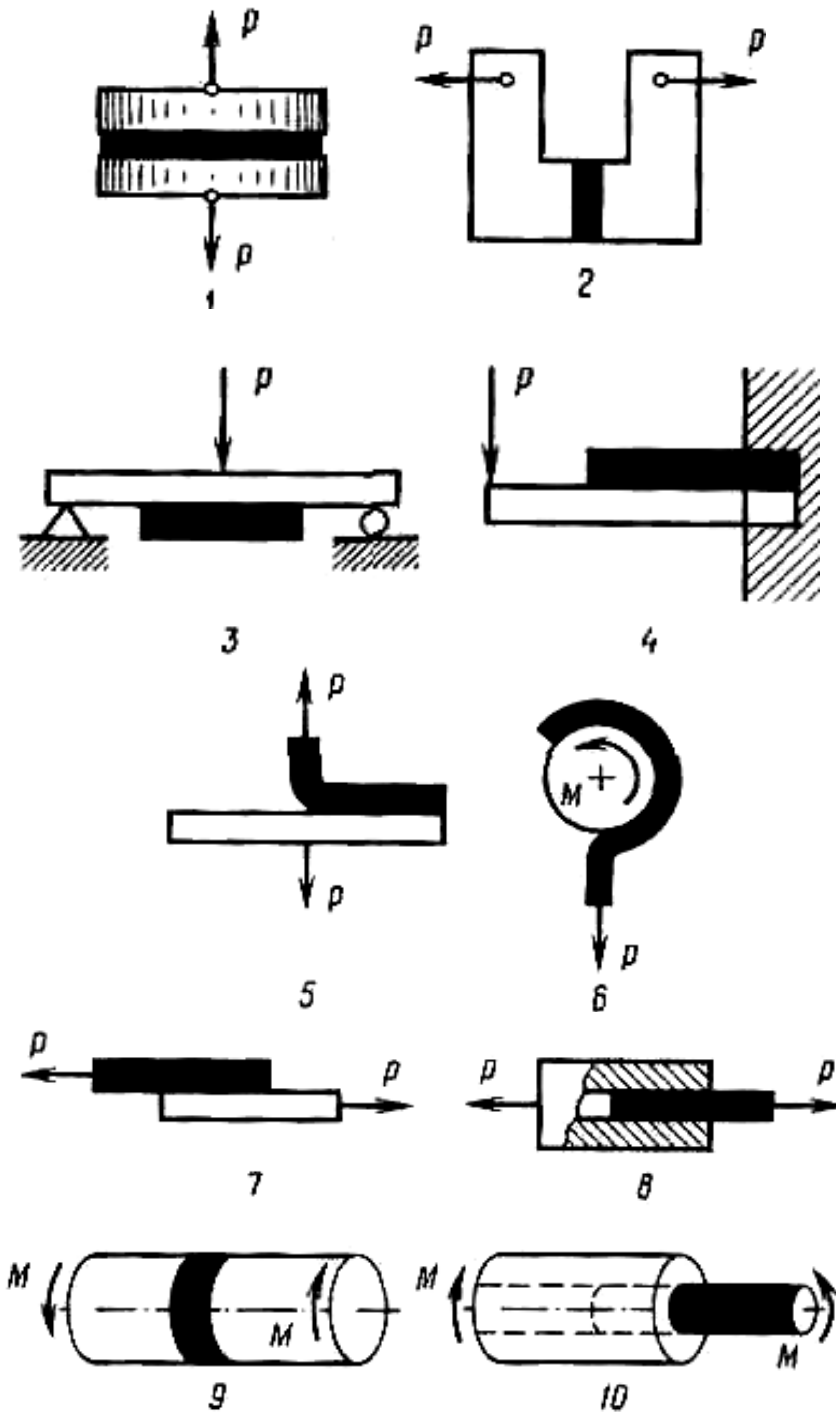


Рисунок 3.49 - Методи вимірювання адгезійної міцності:

- 1 - спосіб нормального відриву; 2 - відрив при позacentровому розтягу (стиску);
- 3, 4 - розшарування матеріалів при вигині;
- 5, 6 - відшарування при відриві;
- 7, 8 - руйнування з'єднання при зсуві;
- 9, 10 - зсувне руйнування при крутінні

тися в абсолютній системі одиниць;

- перед виміром продукт повинен притискатися до субстрату для встановлення контакту та усунення з нього повітряних бульбашок;
- нанесення продукту заданої товщини на пластини приладу повинне проводитися за допомогою шаблону, щоб виключити вплив товщини на його адгезійні властивості;
- у приладах має бути передбачена можливість заміни пластин з метою визначення впливу марки матеріалу пластин та міри його обробки (шорсткості) на міцність молекулярних контактів;
- прилади повинні допускати можливість варіювання швидкості додавання сили відриву або зсуву в широкому діапазоні для встановлення впливу сили відриву на розподіл деформацій та зусиль між пластинами і продуктом.

Характеристиками адгезійної здатності продукту є наступні величини: сила відриву, віднесена до площі контакту; робота відриву, віднесена до площі контакту; час, необхідний для руйнування зв'язку між субстратом та адгезивом під дією заданого навантаження.

Прилади для визначення адгезійних характеристик за способом додавання навантаження ділять: на адгезіометри з постійним відривом, адгезіометри з миттєвим відривом, а також на зсувометри. При рівномірному відриві навантаження прикладається перпендикулярно площині субстрату, при цьому адгезія характеризується нормальною силою, віднесеною до одиниці площі контакту, тобто нормальним напруженням. При зсуві визначається дотичне напруження, яке виникає при відносному зсуві шарів адгезиву відносно субстрату. Для дослідження адгезії харчових в'язко-пластичних матеріалів використовуються прилади, засновані на способі нормального відриву.

Найчастіше в адгезіометрах для харчових продуктів реалізується

схема нормального відриву, вона може відрізнитися способами прикладення сили і реєстрації відривного зусилля.

Наприклад, в приладі Б. А. Миколаєва «миттєво» відривається верхній диск за допомогою механізму важеля (рисунок 3.50).

Прилад призначений

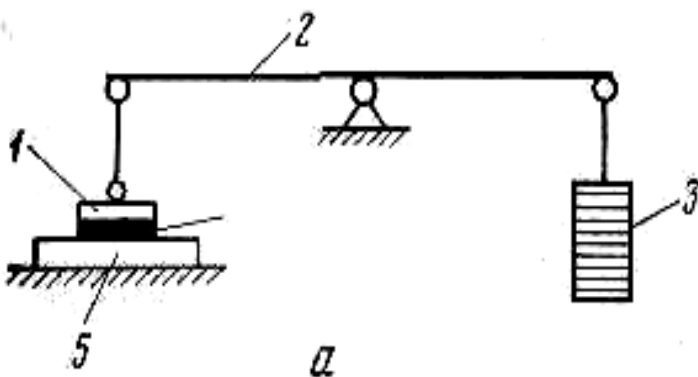


Рисунок 3.50 - Адгезіометр
Б.А.Миколаєва

для дослідження адгезії в'язких харчових продуктів. Він складається з вимірювальної пластини (субстрату) (1), виконаної у вигляді диску, двоплечого важеля (2), до якого з одного боку підвішений субстрат, а з іншого - важіль (3) та основи приладу (5). Між диском та основою нанесений адгезив (4). При випробуванні, поступово збільшуючи масу вантажу (3), добиваються відриву диску (1) від адгезиву (4). За результатами виміру отримують липкість матеріалу.

Технічна характеристика: тиск попереднього контакту 300 - $3,5 \cdot 10^5$ Па; границі вимірювання адгезійного тиску 300 - 6180 Па, тривалість попереднього контакту довільна.

У приборі А. Г. Кульмана поступово відривається нижній диск при наповненні підвішеної до нього ємкості з водою.

Розділення контактуючих тіл може відбуватися по трьом варіантам: адгезійний - по границі розділу продукт - стінка, когезійний - по шару продукту і змішаний. Проте адгезія в чистому вигляді часто не спостерігається, тому вимірюють питоме зусилля розділення двох тіл без конкретизації його вигляду.

Універсальний **адгезіометр МТІММПа**, наведений на рисунку 3.51, дозволяє міняти в широкому діапазоні геометричні, кінематичні, динамічні і інші параметри вимірювання.

Прилад має корпус (1), підймальний столик (2) з мікрометричним гвинтом для кріплення нижньої пластини (субстрату) (3) та пристрій для навантаження продукту і відриву верхньої пластини. Верхня пластина фіксується тримачем, який змонтований на тензобалці (4), і має хвостовик для кріплення співвісної рухомої частини системи. У верхній частині приладу на поперечній балці корпусу закріплена втулка (8), в яку вставлена поперечка (7) з хвостовиком, на кінцях поперечки закріплені сережки (6). На верху корпусу встановлений приводний вал з набором шківів (10) різних діаметрів. Тензобалка переміщується за допомогою нитки (9) та набору шківів, які приводяться в обертання від електродвигуна. Для створення попереднього контакту на тензобалку встановлюють вантажі (5). У кожній серії дослідів тензобалку тарують, отримуючи залежність: величина навантаження - відхилення «мітки» на осцилограмі.

Параметри приладу: тиск попереднього контакту від 300 до $3,5 \cdot 10^5$ Па; тривалість попереднього контакту - 3; 60; 180; 300; 600 с; швидкість відриву верхньої пластини від продукту - 0,00167; 0,00358; 0,0093; 0,0193 м/с; площа пластин - 0,0005; 0,0007; 0,0010; 0,0015 м²; матеріал пластин - сталь Ст. 3, неіржавіюча сталь 1Х18Н9Т, дюралю-

міній, чавун, фторопласт-4, латунь; висота продукту - від 0,00003 до 0,003 м; відносна погрішність приладу $\pm 4\%$.

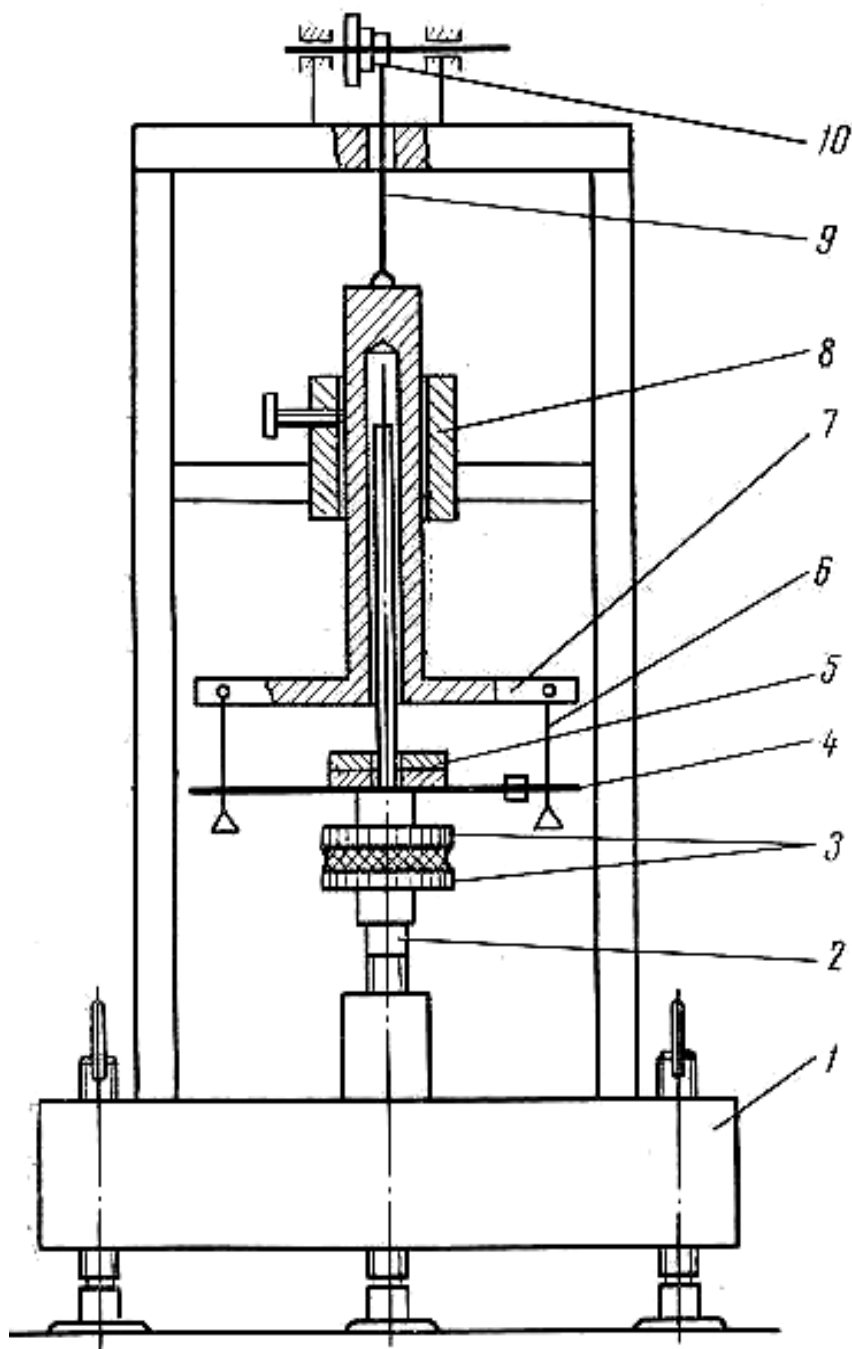


Рисунок 3.51 - Універсальний адгезіометр МТІММПа для вимірювання адгезії харчових продуктів

В. А. Даніловим, Ю. А. Мачихиним та О. Г. Силаєвим створений адгезіометр для тестових продуктів (рисунок 3.52), який складається зі станини, рухомого столику, спеціальної камери для тіста, диску з досліджуваного конструкційного матеріалу, штоку-упору, тензометричної балочки, вантажу для створення напруження та редуктора для переміщення столика.

Технічна характеристика: діаметр диску з конструкційного матеріалу 0,03м; швидкість відриву диску від досліджуваного продукту 0.01-0.05 м/с; границі вимірювання адгезійного напруження 0.01 - 10 Па; габаритні розміри, м: 0,4x0,4x0,5.

Адгезіометр Ю. В. Клаповського, наведений на рисунку 3.53, призначений для вивчення властивостей кондитерських мас.

Прилад складається з важелю (7), до нього шарнірно закріплений вертикальний шток (8), розташований у напрямних, до якого че-

рез пружне вимірювальне кільце (9) кріпиться пластина (10). Для створення попереднього контакту є гвинт (5) та упор (4).

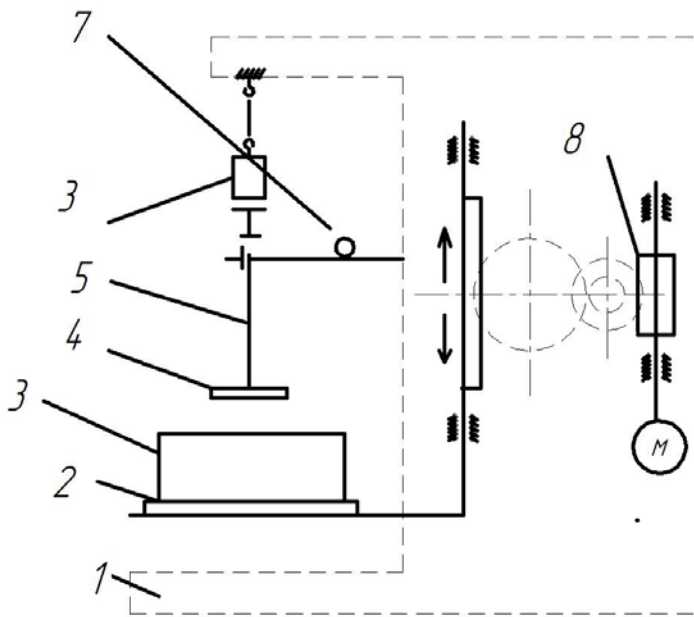


Рисунок 3.52 – Адгезіометр МТІХПа:

- 1 – станина; 2 – рухомий столик; 3 – камера для продукту;
- 4 – диск для матеріалу, який досліджується;
- 5 – шток – упор; 6 – вантаж; 7 – тензобалка;
- 8 – редуктор

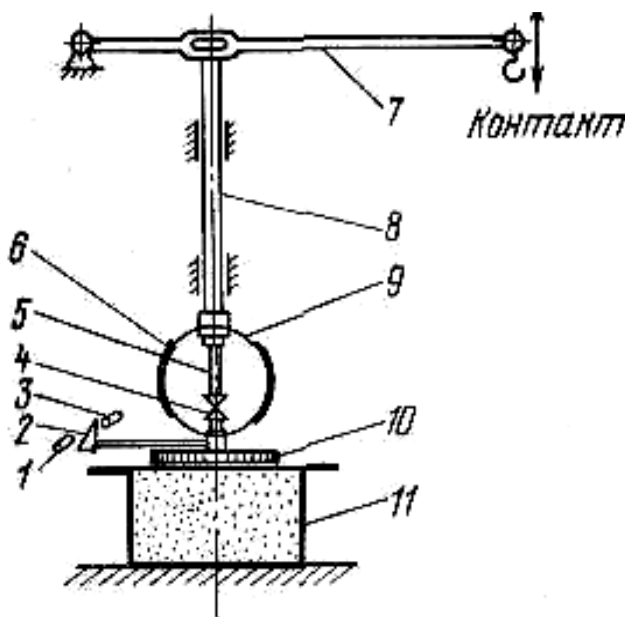


Рисунок 3.53 – Адгезіометр Ю. В. Клаповського

Зусилля відриву вимірюють за допомогою тензорезисторів (6), наклеєних на пружне вимірювальне кільце (9). Переміщення пластини (10) вимірюють за допомогою фотодіода (3), при цьому шторка (2) перекриває частину світлового пучка освітлювача (1), змінюючи освітленість фотодіода.

Досліджуваний продукт укладають в спеціальну ємкість (11), що має кришку з отвором, в яку з малим зазором входить пластина - субстрат. Під час випробувань показання тензорезисторів і фотодіода після

посилення записуються на шлейфовому осцилографі, дозволяючи фіксувати зміну в часі зусилля відриву і переміщення субстрату відносно адгезиву.

Адегезіометр МТІХПа АМ-1 заснований на принципі зсуву (рисунок 3.54). У первинному варіанті прилад був призначений для визначення зусиль і моментів, які виникають при зніманні тестових заготовок, а також зусиль зсуву при дослідженні адгезії в'язко – пластичних мас до поверхонь різних матеріалів.

Прилад теоретично обґрунтований, що дозволяє визначити величини адгезійного напруження при послідовному (одночасному) зсуві заготовки відносно матриці або при зсуві робочого органу відносно випробовуваної маси.

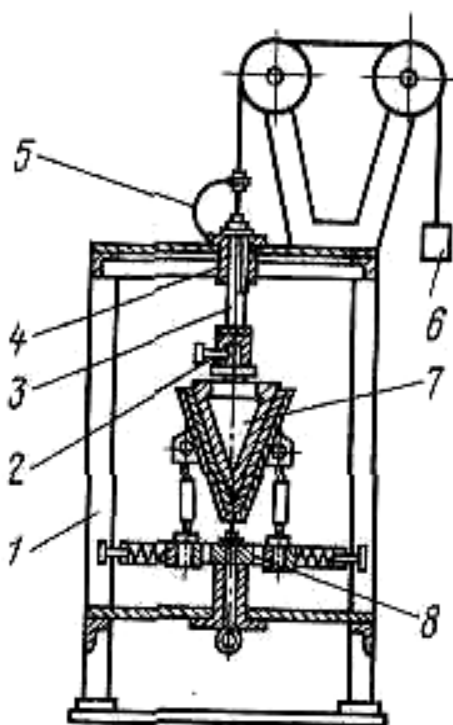


Рисунок 3.54 – Адгезіометр МТІХПа АМ-1:

- 1 – станина; 2 - фіксатор;
- 3 - шток; 4— втулка;
- 5 – пружний елемент;
- 6 - вантаж; 7 – матриця;
- 8 - платформа

Прилад складається зі станини, втулки, вертикального штоку, фіксатора, матриці з випеченою заготовкою, блоків, вантажу, каретки, колодок та датчиків, які змонтовані на U – образній пластині, що пов'язана з ниткою, і наклеєних на гнучких стрижнях. Останні змонтовані на повзунах, які взаємодіють з пружинами. Матриця з випеченою тестовою заготовкою 3 кріпиться до вертикального штоку. Потім заготовка обжимається двома напівколісними колодками. При повороті платформи відбувається зсув заготовки по відношенню до нерухомої матриці 3. Підйом матриці дозволяє визначити умову відриву. Адгезійні зусилля вимірюються за допомогою тензометричних датчиків. Зусилля притиску колодок до матриці задаються гвинтами.

Технічна характеристика: зусилля відриву до 50 Н; крутячий момент до 2 Н·м; похибка приладу $\pm 5\%$; габаритні розміри, м: 0,25x0,25x0,6.

Модернізація робочих органів приладу дозволила проводити вимірювання при протяганні пластин з різних матеріалів, які закріплюються замість матриці між двома півсферами з масою продукту. Півсфери закріплюються та притискаються до пластини пружинами.

Малогабаритний адгезіметр (рисунок 3.55), розроблений В. Д. Косим, В. С. Катюхиным та ін., дозволяє вимірювати липкість швидко і з підвищеною точністю при постійних параметрах і зазначених умовах. Прилад працює таким чином. Шар досліджуваного продукту завтовшки $1 \cdot 10^{-3}$ м наносять за допомогою форм на нижню пластину, яка підводиться до верхньої пластини.

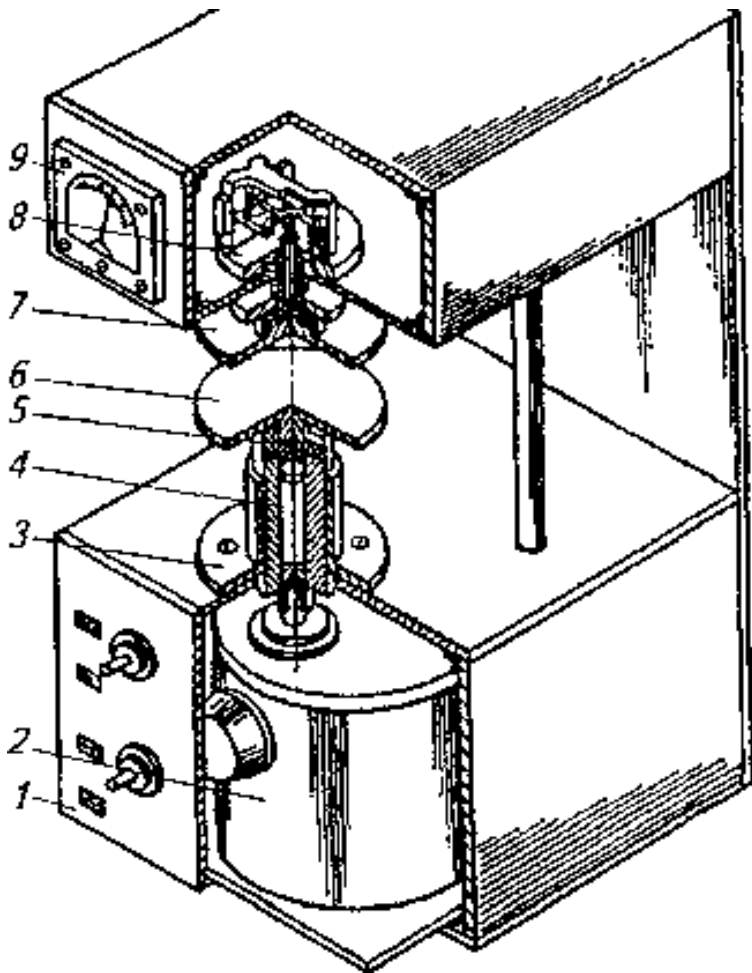


Рисунок 3.55 - Малогабаритний адгезіometr:

- 1 — корпус; 2 — реверсивний двигун з редуктором; 3 — обойма; 4 — рухома втулка; 5 — нижній тримач;
6,7 — нижня та верхня пластини;
8 — вимірювальний потенціометричний блок; 9 — вимірювальний пристрій

Продукт між пластинами починає стискуватися, викликаючи рух штока з тягою вгору. Тяга переміщає серезку, розташовану на осі, спільно з щиткотримачем, який переміщується по потенціометру, міняючи опір ланцюгу, що можна спостерігати на приладі реєстрації (мікроамперметрі, мікровольтметрі). Стрілка приладу, відхиляючись праворуч, показує зусилля контакту.

Досягши заданої величини зусилля, вона замикає контакт, відключаючи тим самим електродвигун та включаючи реле часу. По закінченні часу контакту (180 с) автоматично включається реверсивний двигун, і у зворотному напрямі переміщається шток датчика потенціометру, змінюючи опір ланцюгу та викликаючи переміщення стрілки приладу реєстрації вліво.

Максимальне зусилля відриву фіксується на час, достатній для того, щоб записати дану величину, яка пропорційна липкості при постійній площі пластини.

Липкість (Па):

$$p=P/F, \quad (3.22)$$

де P - максимальне зусилля відриву, Н; F - площа пластини, м².

Питання для самоконтролю

1. За якими умовами проявляються поверхневі властивості харчових продуктів?
2. На чому засновані прилади та методи вимірювання адгезії?
3. Які вимоги пред'являються до адгезіометрів?
4. Як поділяються прилади для визначення адгезійних характеристик за способом додавання навантаження?
5. Який застосовується спосіб прикладення сили і реєстрації відривного зусилля в адгезіометрі Б.А.Миколаєва
6. Які існують варіанти розділення контактуючих тіл?
7. Які принципи роботи та сфери застосування мають універсальний адгезіометр МТІММПа; адгезіометр для тестових продуктів В. А. Данілова, Ю. А. Мачихина, В. А. Данілова, Ю. А. Мачихина О. Г. Силаєва?
8. Для вивчення властивостей яких продуктів призначений адгезіометр Ю. В. Клаповського?
9. На якому принципі заснована робота адгезіометру МТІХПа АМ-1?
10. Яку характеристику продукту дозволяє вимірювати малогабаритний адгезіометр, розроблений В. Д. Косим, В. С. Катюхиним?

3.6.2 Прилади для визначення зовнішнього тертя

Прилади, які застосовуються для визначення коефіцієнтів тертя харчових продуктів, називають трибометрами.

Коефіцієнт зовнішнього тертя харчових матеріалів залежно від реологічних властивостей, стану фрикційних поверхонь та швидкості ковзання визначається різними способами. Класичний тип приладу для виміру сили зовнішнього тертя є парою тіл, що дотикаються плоскими поверхнями, площа яких може бути від часток квадратних міліметрів до десятків квадратних сантиметрів. При цьому одне з тіл зміщується відносно іншого. Сила, яка прикладається для зсуву (тертя) одного тіла відносно іншого, вимірюється тензометричними, ди-

намометричними та будь-якими іншими датчиками. І. В. Крагельський, поклавши в основу геометричний та кінематичний принципи, запропонував відомі методи визначення коефіцієнта тертя розділити на чотири групи, які у вигляді схем наведені на рисунку 3.56.

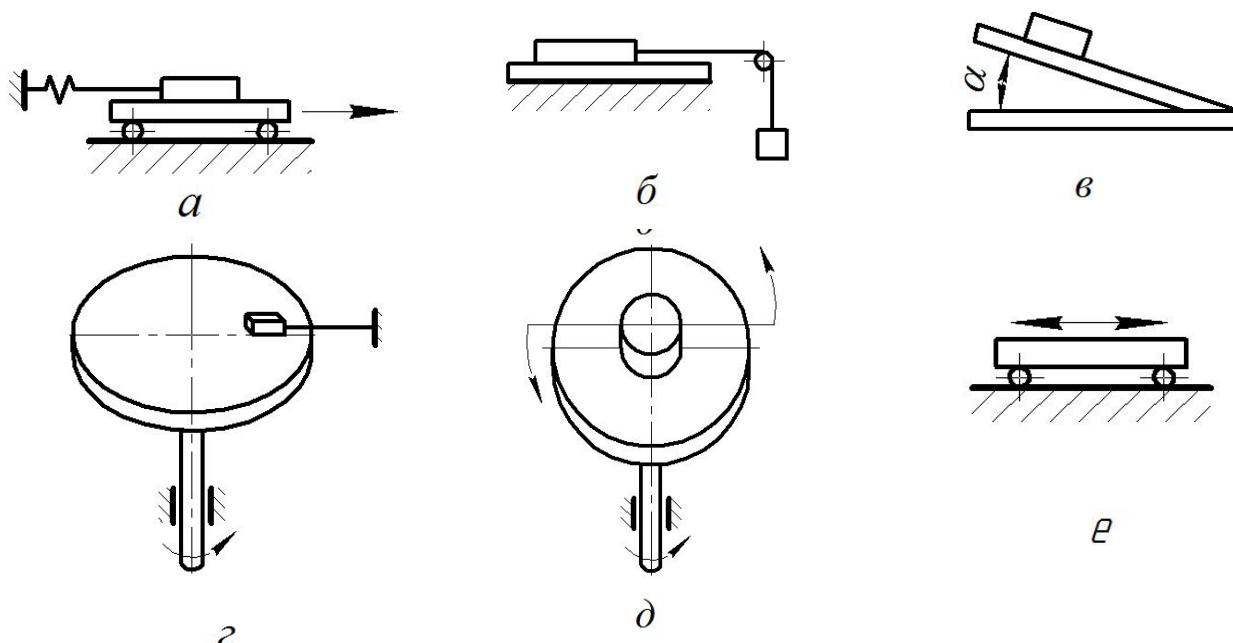
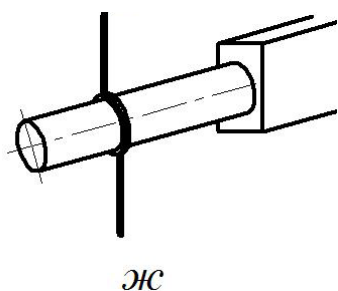


Рисунок 3.56 - Методи виміру сили тертя ковзання:



а, б, в - при поступальному переміщенні площини; г, д - при обертальному русі однієї з фрикційних пар; е - при зіткненні циліндру з площиною; ж - при переміщенні циліндрової або плоскої гнучкої поверхні вздовж циліндровій поверхні

Перша група - методи, в яких одна площина поступально переміщується відносно іншої (рисунок 3.56 а, б, в). За схемою а, продукт переміщується вздовж рухомої досліджуваній поверхні, при цьому сила тертя вимірюється динамометром будь-якого типу. Таким найбільш поширеним методом визначають тертя твердообразних матеріалів: м'яса, риби, хліба та інших.

За схемою (рисунок 3.56, б), продукт переміщується за допомогою вантажу вздовж нерухомої поверхні. Сила тертя в цьому випадку дорівнює мінімальній масі вантажу, необхідної для рівномірного переміщення продукту. Цим методом визначають коефіцієнт тертя таких продуктів, як сир, риба, кондитерські вироби та інших.

За схемою (рисунок 3.56, в) продукт ковзає по похилій поверхні. Коефіцієнт тертя визначається по мінімальному куту нахилу поверхні випробовуваного конструкційного матеріалу, по якому ковзає харчовий продукт. Такий метод дозволяє визначити статичний коефіцієнт тертя для сиру, сухарів, сипких продуктів. Метод вважається недостатньо точним і широкого вживання не отримав.

Друга група - методи, при яких одна з фрикційних пар здійснює обертальний рух. За схемою, наведеною на рисунку 2.54, г, продукт, закріплений на пружній балочці, ковзає по поверхні з досліджуваного матеріалу, яка обертається. Цим методом визначають коефіцієнт тертя м'яса, риби. За схемою (рисунок 3.56, д) продукт лежить на диску, який обертається, досліджуваний конструкційний матеріал ковзає по продукту, що також обертається. Сила тертя визначається по крутячому моменту, який передається від диска зразку.

Третя група - методи, в яких твірна циліндру стикається з площиною. За схемою (рисунок 3.56, е) балка здійснює коливальні рухи на двох роликах, які обертаються назустріч один одному.

Четверта група - методи, в яких одна циліндрична або плоска гнучка поверхня переміщається вздовж циліндрової поверхні (рисунок 3.56, ж).

Для дослідження тертя м'ясопродуктів був використаний **трибометр з візком** (рисунок 3.57), який дозволяє визначити та обчислити дійсний коефіцієнт зовнішнього тертя та ефективний коефіцієнт зовнішнього тертя.

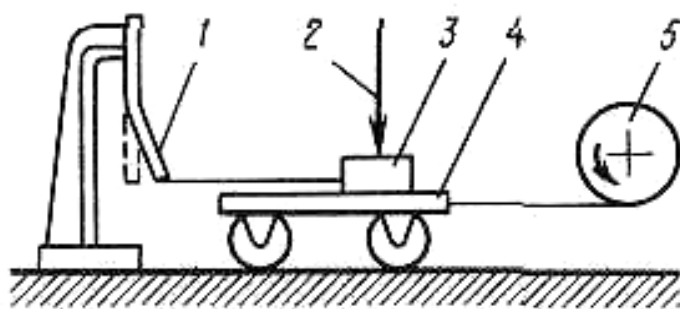


Рисунок 3.57 - Трибометр з візком та електроприводом

Він складається з пристрою (1) для виміру сили тертя (тензобалки), пристрою (2) для створення тиску контакту рамки з досліджуваним продуктом (3), візку зі закріпленою на ньому пластиною (4) та електроприводу (5) зі шківом.

Під час випробувань досліджуваний продукт поміщають в рамку, встановлюють на плоску поверхню пластини візка та включають електродвигун. Нитка, намотуючись на шків, починає переміщати візок з продуктом, від якого через нитку

зусилля передається тензобалці. Вона під дією зусилля відгинається від свого первинного положення. При подальшому переміщенні візку, зусилля між рамкою з продуктом та тензобалкою збільшуються і, досягнувши критичної величини, починається ковзання рамки з продуктом вздовж поверхні пластини візка. При цьому прогин тензобалки залишатиметься на тому ж рівні постійним.

Сила тертя, яка виникає між продуктом та пластиною, фіксується відхиленням тензобалки, величина якого за допомогою тензодатчиків, прикріплених до неї, передається на стрічку осцилографа. Для зміни швидкості візка призначений чотириступінчастий шків, на який намотується нитка. Прилад дозволяє міняти геометричні (розмір площі поверхні контакту, чистоту обробки поверхні), кінематичні (швидкість зсуву візка, час попереднього контакту) та динамічні (тиск контакту, швидкість наростання сили та ін.) показники.

Прилад забезпечений комплектом змінних пластин, виготовлених з різного матеріалу.

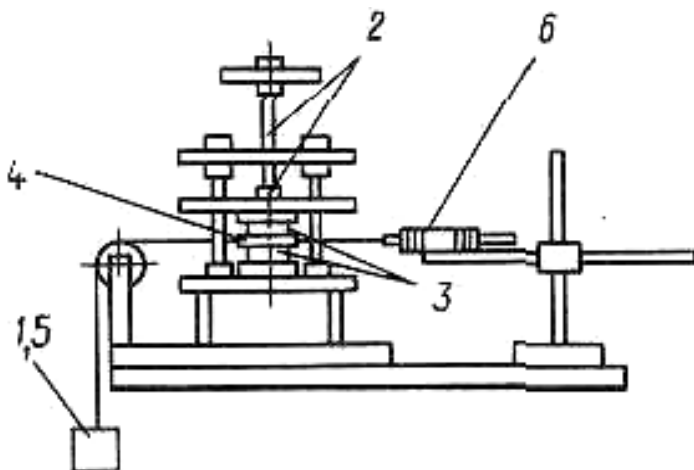


Рисунок 3.58 - Трибометр з паралельним зсувом пластини та приводом від падаючих вантажів

Прилад з паралельним зсувом пластин від вантажу з підпресуванням зразків гвинтовим механізмом (рисунок 3.58) реалізований в пристрої Н. Н. Мозеніна. Пристрій призначений для вивчення характеристик твердих продуктів, наприклад сира. Він складається з вантажного пристрою (1) для виміру сили тертя, пристрою (2) для створення тиску контакту, пластини (4), знизу та зверху якої, розташований шар досліджуваного продукту (3), вантажного приводу (5) та пристрою для виміру переміщення у вигляді індикатора годинникового типу (6).

Прилад використовується як для вимірів зовнішнього тертя, так і в'язкості при малих градієнтах швидкості.

Пристрій (рисунок 3.59) з приводом рухомої частини від гідروциліндру та реєстрацією зусиль за допомогою тензометричної балки використовується для вивчення тертя при малій поверхні контакту і

великих нормальних зусиллях. Він складається з тензобалки (1), пристрою (2) для створення контакту, пластини (4) і гідроприводу.

При вимірюванні великих зусиль тертя система гідроприводу має перевагу у порівнянні з електроприводом, окрім того, гідропривід забезпечує безступінчасте регулювання швидкості. У приладі повзун, встановлений на масляній плівці, відривається від диску, який обертається, зусилля відриву вимірюється по деформації тензобалки (рисунк 3.60).

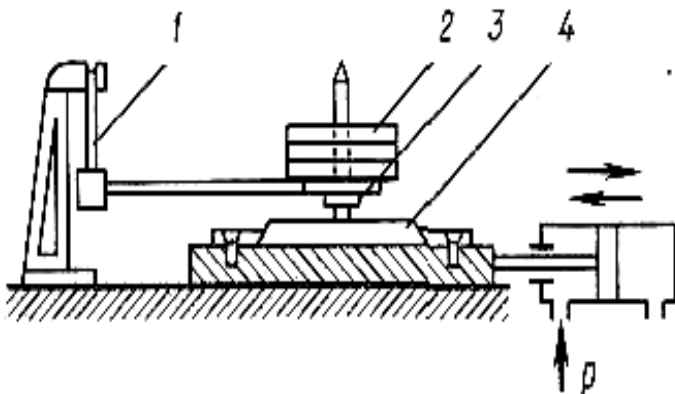


Рисунок 3.59 - Трибометр з приводом від гідроциліндра

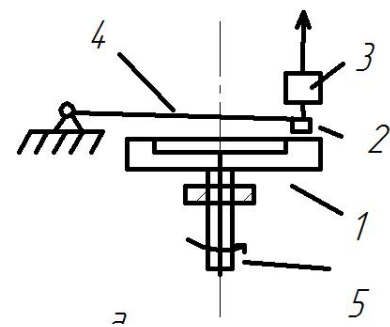


Рисунок 3.60 - Кінетичний адгезіометр – трибометр

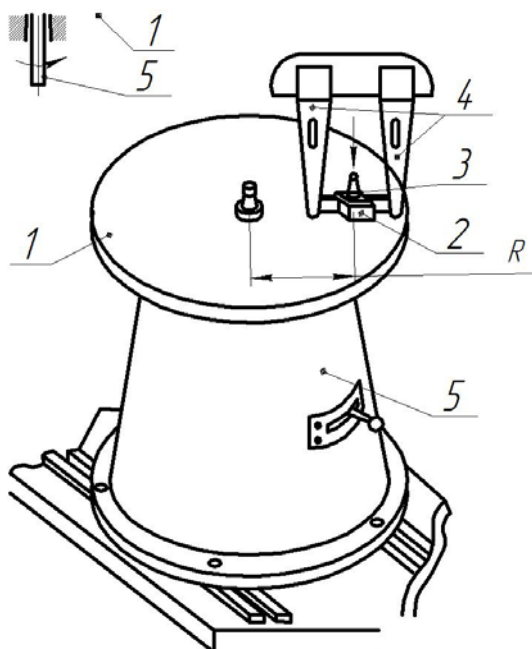


Рисунок 3.61 - Трибометр дискового типу

Тертя м'яса по сталі вивчали на установці, зображеної на рисунку 3.61. Диск приводиться в обертання від електродвигуну постійного струму, частота обертання його може плавно регулюватися, забезпечуючи окружну швидкість в місці контакту з продуктом від 0,1 до 72 м/с. Досліджуваний продукт поміщають в рамку, яка закріплена на двох тензобалках; вони служать для вимірювання сили тертя.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає принцип дії приладу класичного типу для виміру сили зовнішнього тертя?
2. Які відомі методи визначення коефіцієнта тертя? В чому полягає їх різниця?
3. Які характеристики продукту визначають при експериментальних дослідженнях з використанням трибometру з візком?
4. Для вивчення характеристик яких продуктів призначений пристрій Н. Н. Мозеніна?
5. При яких умовах для вивчення тертя використовується трибometр з приводом від гідроциліндру?

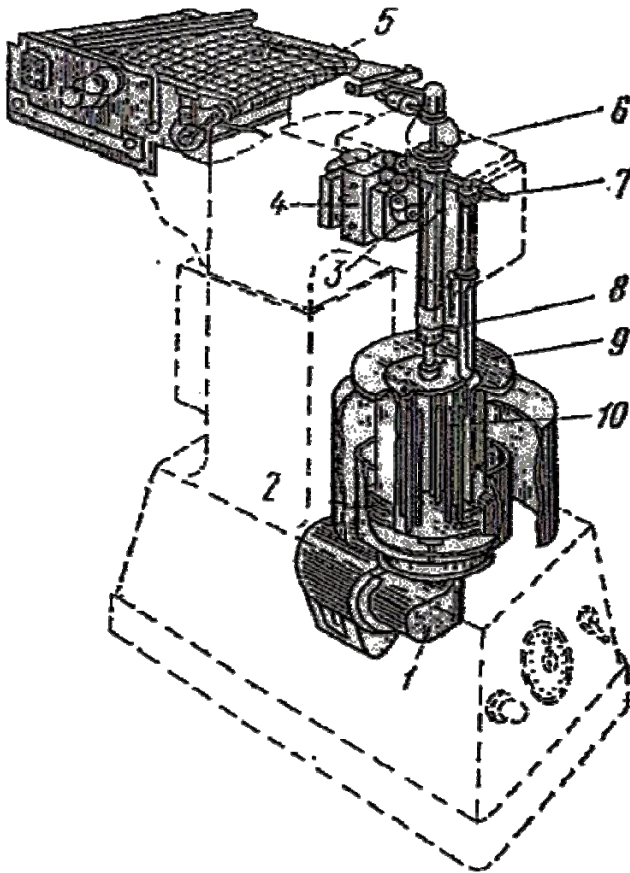


Рисунок 3.62 - Амілограф: 1 - електродвигун; 2 - обігрівач; 3 – регулятор температури; 4 - двигун; 5 - пристрій для реєстрації; 6 - вимірювальна система; 7 - рукоятка установки температури; 8 - контактний термометр; 9 - змішувач; 10 - робочий орган

3.7 Методи і прилади для відносних та умовних вимірювань характеристик, безперервно діючі прилади

3.7.1 Прилади для відносних та умовних вимірювань

У деяких технологічних приладах не проводиться безпосереднє вимірювання структурно - механічних характеристик продукту. Таким приладом є **амілограф фірми «Брабендер»**, зображений на рисунку 3.62, який дозволяє побічним шляхом записувати зміну консистенції в процесі замісу тіста.

Працює він таким чином. Змішувач заповнюється суспензією муки у воді, в нього занурюється деталь, яка пов'язана з чутливою вимірювальною системою.

Змішувачу надається рівномірне обертання, при цьому наявність в'язкого матеріалу примушує деталь 10 повертатися на деякий кут. Обертальний момент, який виникає таким чином, через вимірювальну систему реєструється записуючим пристосуванням. На папері, який рухається, викреслюється діаграма, причому переміщення пристрою, що пише, пропорційне в'язкості суспензії.

У технологічних лабораторіях для визначення якості та особливостей обробки пшеничного тіста застосовується **фарінограф**, наведений на рисунку 3.63.

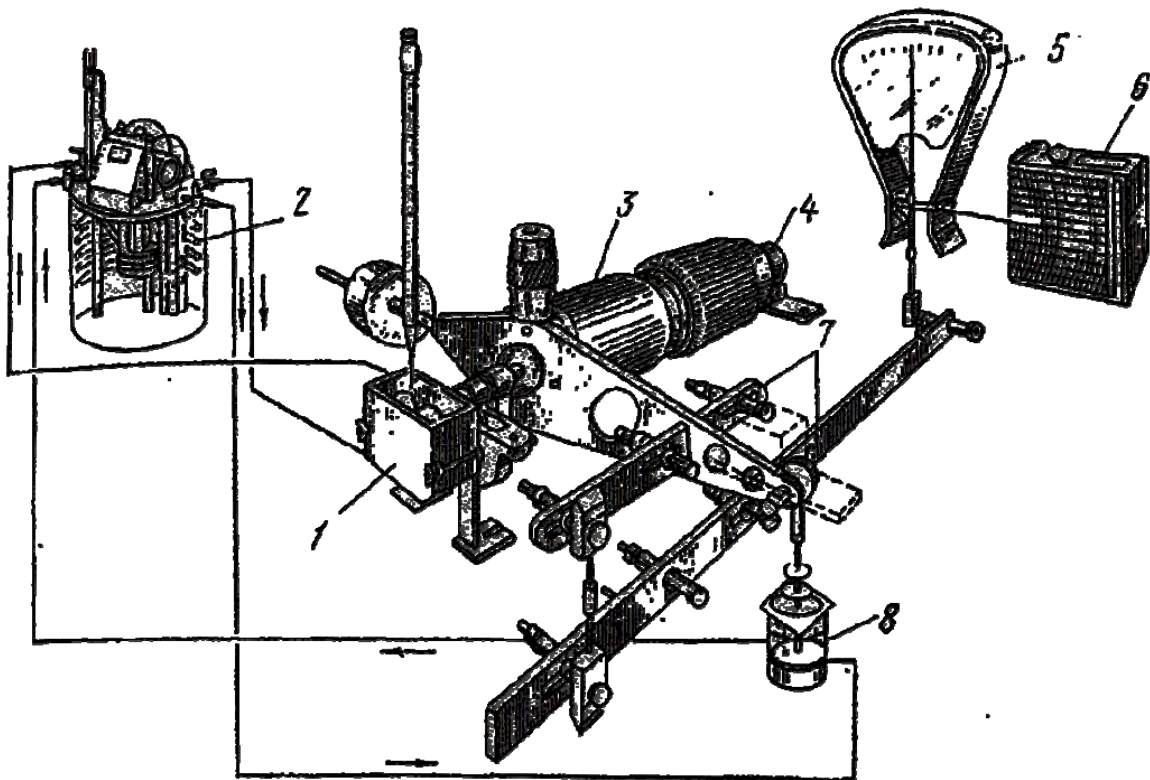


Рисунок 3.63 - Фарінограф:

1- змішувач; 2 - термостат; 3 - електродвигун; 4 - підшипник; 5 - ваги;
6 - прибор реєстрації; 7 - система важелів; 8 - масляний демпфер

Віскозиметр Енглера отримав розповсюдження в клеєжелатинової, м'ясної та молочної галузях промисловості. Цей прилад широко увійшов до практики вивчення в'язкості рідини завдяки простоті конструкції та вимірювань, хоча є заперечення проти його застосування. Прилад складається з зовнішнього та внутрішнього циліндричних резервуарів, сполучених у нижній частині капілярним насадком для витікання рідини. Тарування полягає у визначенні «водяного числа», тобто тривалості збігу 200 мл води при 20°C.

Шестикратні вимірювання повинні давати відхилення не вище 0,5 с, а загальна тривалість спорожнення резервуарів складає від 50 до 52 с. При робочих вимірюваннях визначають тривалість витікання 200 мл рідини при необхідній температурі.

Принцип роботи приладу полягає в наступному: у мішалку завантажуються 0,45 кг досліджуваного тіста, рух місильним лопатям передається від електродвигуна. Опір, який випробовують лопаті мішалки при обертанні в досліджуваному тісті, змінюється, повертаючи корпус двигуна в протилежному напрямі. Цей опір через систему важелів 7, коливання яких зм'якшується масляним демпфером, передається на ваги та прилад для реєстрації. На приладі записується діаграма в осях навантаження — час; висота кривої показує щільність тіста. Термостат обігріває корпуси мішалки і демпфера.

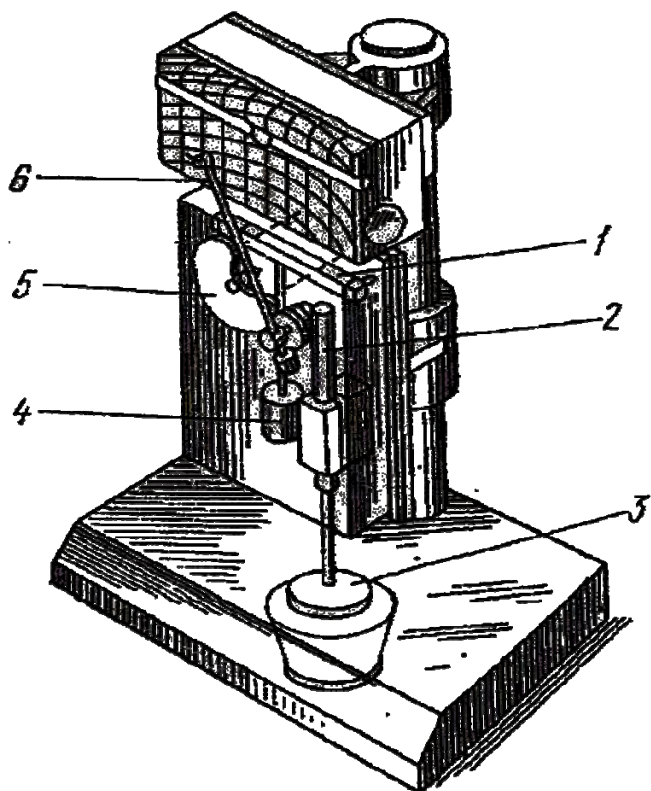


Рисунок 3.64 - . Матурограф:

- 1 - важіль; 2 - вал; 3 - тарілка;
- 4 – вантаж; 5 - кулачок;
- 6 – перо реєстрації

Одним з недоліків деяких існуючих методів дослідження хлібопекарних властивостей борошна є те, що в досліджуваному зразку тіста немає такого важливого компонента, як дріжджі. Це усувається використанням приладу фірми «Брабендер» - **матурографа**, який наведений на рисунку 3.64. Тісто готують за тією же рецептурою, що і у виробничих умовах.

Прилад складається з корпусу, мікроелектродвигуна, пристрою реєстрації, системи автоматичного налаштування та камери для тіста.

Важіль на одному кінці шарнірно закріплений, на іншому має ролик, який знаходиться в контакті з кулачковою шайбою. Зусилля замикавання кінематичної пари

створюється вантажем, асиметрично встановленим на важелі. Вал з жорстко закріпленою на ньому тарілкою механічно пов'язаний з пе-

ром для реєстрації. Порція тіста (0,15 кг) закладається в чашку і поміщається в камеру, де підтримуються температура 30°C та відносна вологість 80—85%. На початку випробування відстань між дном чашки і тарілкою мінімальна (0,036 м). Прилад регулюється так, щоб тиск тарілки на тісто досягав 200 од., у яких протарований матурограф. Кожні 2 хв відбувається механічний стиск тіста, яке поміщене в чашку. Після чого тарілка як постійний вантаж тиснить на бродяче тісто. Залежно від кількості газу, виділеного при бродінні, газового утримання та пружності тіста тарілка піднімається до різних рівнів, але через 2 хв знову вдавлюється з тісто. Переміщення тарілки фіксуються на діаграмі механізму реєстрації.

Для оцінки хлібопекарських властивостей муки використовуються три величини: тривалість остаточного розподілення тіста, опір тіста та його стабільність при кінці розстойки.

Відношення тривалості витікання рідини до тривалості витікання води дає умовну в'язкість в градусах Енглера

$${}^{\circ}E = t / t_g. \quad (3.23)$$

Для перерахунку в'язкості з градусів Енглера в одиниці кінематичної в'язкості запропоновано декілька емпіричних формул, у тому числі і формулу Уббелоде

$$\nu = (0,073 {}^{\circ}E - 0,063 / {}^{\circ}E) \cdot 10^{-4}, \quad (3.24)$$

де ν — коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$.

Теорія А. Д. Альтшуля при $\nu > 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ приводить до простої формули для перерахунку:

$$\nu = ({}^{\circ}E / 13,67) \cdot 10^{-4}, \quad (3.25)$$

Віскозиметр Г. В. Бакунца, наведений на рисунку 3.65, має робочий орган, який поміщають в «необмежене» рухоме середовище, наприклад у фарш, який знаходиться в чаші куттеру. У зіткнення з продуктом входить тільки частина кульової поверхні, що викликає поворот кулі. Момент сили в'язкого опору врівноважується моментом закручування пружини, дані відраховуються на шкалі приладу.

Разом з приладами, які реалізують традиційні реологічні ме-

тоди вимірювання, отримали розповсюдження промислові та лабораторні прилади, що засновані на інших способах.

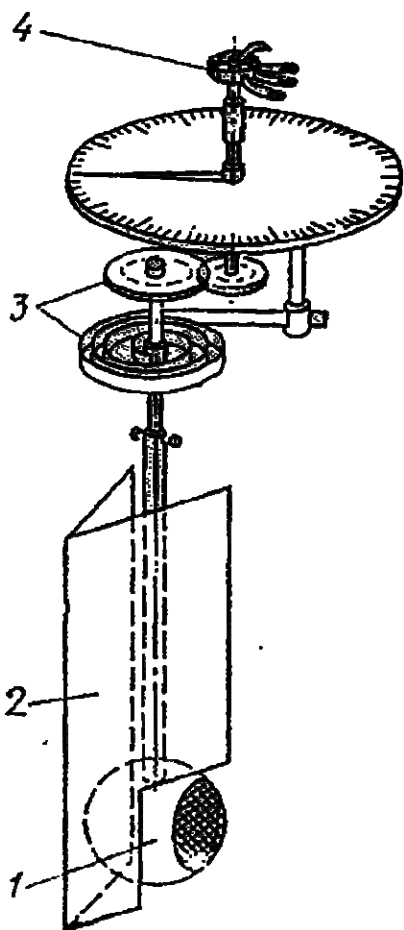


Рисунок 3.65 - Віскозиметр Г. В. Бакунца:

1 - сферична вимірювальна поверхня; 2 - щиток; 3 - механічна система для реєстрації кута закручування сфери; 4 - електричний датчик кута закручування

Для контролю структури і консистенції сиру запропонований прилад, в якому по зусиллю різання струною можна судити про консистенцію сиру.

Для визначення готовності фаршу використовуються прилади з пружною балкою консольного типу. На кінці консолі закріплений робочий орган: сфера, пластина, шток та ін.

У м'ясній та молочній промисловості набув поширення метод зрізу продукту: між поверхнями плоских пластин; між циліндрами з отворами, між пуансоном та матрицею з отвором; при втискуванні поршню діаметром 0,04 м у зразок товщиною 0,05 м та інші.

Питання для самоконтролю

1. Яким чином амілограф фірми «Брабендер» дозволяє побічним шляхом записувати зміну консистенції в процесі замісу тіста?

2. Де і з якою метою застосовується фарінограф?

3. В яких галузях харчової промисловості отримав розповсюдження віскозиметр Енглера?

4. Які недоліки існуючих методів дослідження хлібопекарних властивостей борошна усуваються використанням матурографу?

5. Які величини використовуються для оцінки хлібопекарських властивостей муки?

6. Які прилади, що не реалізують традиційні реологічні методи вимірювання, отримали розповсюдження для визначення властивостей продукту?

3.7.2 Безперервно діючі прилади

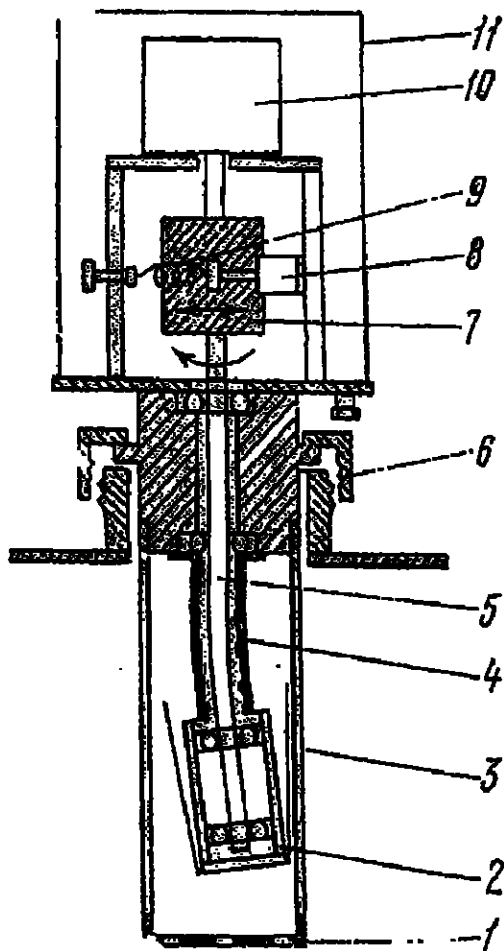


Рисунок 3.66 – Конвіграф:

- 1 - захисний кожух з прорізами;
- 2 - головка вимірювачу;
- 3 - обичайка; 4 –гнучка сорочка;
- 5 – зігнений вал; 6 - накидна гайка; 7 – вимірювач крутного моменту; 8 - задатчик; 9 – перемикач діапазону вимірювання;
- 10 - електродвигун; 11 - верхня кришка

У проектно - конструкторському та науково – дослідницькому інституті автоматизації харчової промисловості розроблений пристрій для безперервного вимірювання в'язкості тіста, яке готується на тістомісильних машинах безперервної дії. Працює пристрій таким чином. Тісто безперервним потоком поступає в бункер, з якого шнеком нагнітається в камеру під мембрану датчика тиску. Пройшовши камеру, тісто виходить через отвір. Зміна структурно - механічних властивостей тіста впливає на тиск, що приймається мембранною датчика, за показаннями якого визначають в'язкість тіста.

Автоматичні віскозиметри фірми «Брабендер» (Німечина) дозволяють випробовувати не-ньютонівські рідини при різній температурі (20—97° С), постійної та змінної у часі.

Цією ж фірмою виробляється **конвіграф** - пристрій для безперервного вимірювання в'язкості суспензії та емульсії, паст, тіста, шоколадних мас (рисунок 3.66). Циліндрична головка вимірювача, що змонтована на зігнутому валу, поміщається в трубопровід, по якому безперервно ру-

хається матеріал. Для підвищення точності виміру в'язкості продукту (шляхом виключення дії швидкісного натиску маси, яка рухається) головка вимірювача розміщується в захисному кожусі з подовжніми

прорізами. Синхронний електродвигун, який має дві частоти обертання (15 і 120 об/хв), приводить в обертання вал вимірювальної головки, руху якого перешкоджають сили в'язкого тертя матеріалу. Коли вимірюють в'язкість мас малої консистенції, до головки вимірника закріплюється обичайка. Це збільшує робочу поверхню головки та рівнодіючу сил в'язкого опору, що позитивно впливає на точність визначення консистенції.

Встановлюючи перемикач діапазону вимірювання моменту опору в певне положення і задаючи відповідну частоту обертання головки, можна визначати в'язкість в широких межах. Точність вимірювання складає $\pm 1\%$ від граничного значення шкали.

Прилад може також бути використаний в системах автоматичного регулювання в'язкості дисперсних систем, які транспортуються по різних каналах.

Зсувні прилади призначені для виміру структурно-механічних характеристик м'ясних продуктів у потоці в процесі тонкого подрібнення. Принцип роботи **приладів, створених Г. В. Бакунцем** (рисунок 3.67, а), базується на вимірі крутного моменту кулі, зануреної в продукт, який рухається з постійною швидкістю. Прилад забезпечений контактними пластинами, які встановлені на стрілці та диску шкали реєстрації. Пересувна контактна дужка служить для встановлення заданого значення характеристики продукту.

Зсувний пристрій, наведений на рисунку 3.67, б, розроблений Г. Е. Лимоновим та ін., відрізняється від облаштування Г. В. Бакунца тим, що чутливий елемент виконаний у вигляді стрижню, який укріплений на пружному елементі - пластині. Вигин пластини реєструється датчиком потенціометра.

Аналогічно виконаний пристрій, наведений на рисунку 3.68, він відрізняється тим, що чутливий елемент виконаний у вигляді кулі, укріпленої на пружній балці, вигин якої реєструється індикатором.

У наведених пристроях точність результатів недостатньо висока із-за наступних чинників: налипання жирової фракції на поверхні датчика призводить до зміни фізико - механічних властивостей контактуючих середовищ та збільшенню діаметру (площі); фіксація датчика відносно чаші куттеру при зміні ступені її завантаження фаршем не дозволяє підтримувати постійну площу контакту внаслідок нестабільності перерізу продукту; відсутні елементи, які дозволяють підтримувати необхідну температуру.

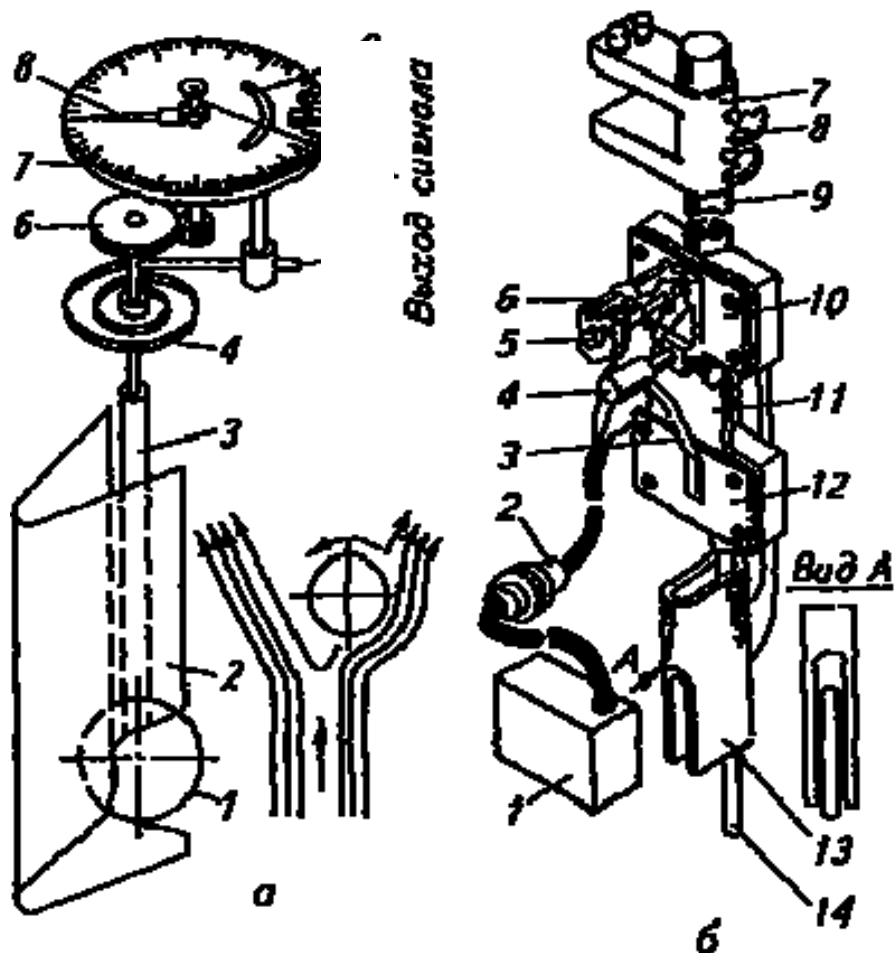


Рисунок 3.67 - Прилади різних систем для виміру структурно-механічних властивостей в потоці:

а - системи Г. В. Бакунца: 1 - куля; 2 - кожух; 3 - вертикальний вал; 4 - пружина, яка зрівноважує; 5 - реєстратор напруження пружини; 6 - зубчаста передача; 7 - шкала реєстрації; 8 - стрілка з контактною пластиною; 9 - контактна дужка

б- системи ВНДІМПа : 1 - вторинний прилад; 2 - штепсельний роз'єм; 3 - повзун; 4-реостат; 5 - гвинт установки; 6 - реостат для установки приладу на нуль; 7 - струбцина; 8 - стопорні гвинти; 9 - штанга; 10 - нерухомий хомут; 11 - пружний елемент; 12 - рухомий хомут; 13 - кожух; 14 - стрижень

Зсувний пристрій для визначення структурно - механічних властивостей ковбасного фаршу в потоці, розроблений В. Д. Косим та ін. (рисунок 3.69), не має перерахованих вище недоліків. Його розташовують в куттері так, щоб елементи рифлення стикалися з досліджуванним продуктом. Контроль можна здійснювати впродовж усієї техно-

логічної операції (куттерування, перемішування) чи періодично.

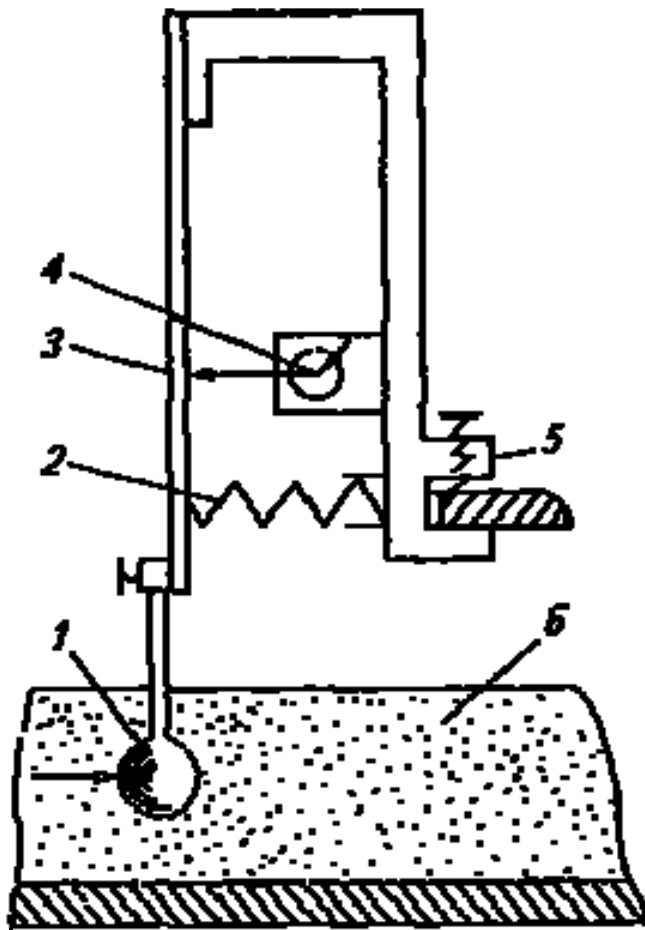


Рисунок 3.68 - Прилад для виміру структурно-механічних властивостей в потоці системи А. В. Горбатова:

- 1 - чутливий елемент у вигляді кулі;
- 2 - пружина; 3 - пружна П - образна балка; 4 - індикатор; 5-стопорний пристрій; 6 - продукт

Цей пристрій призначений для контролю процесу подрібнення. В ньому не передбачена можливість фіксації оптимальної міри подрібнення.

На базі розглянутого пристрою розроблений ряд модифікацій, які дозволяють не лише фіксувати оптимальну міру подрібнення ковбас, але і реєструвати кінцеві реологічні характеристики фаршу кожного замісу.

Пристрій працює таким чином. Включають нагрівальні елементи для підтримки певної температури. На первинну обмотку подають змінну напругу, що викликає виникнення ЕРС у вторинних обмотках. При русі продукт зсувається відносно нерухомої частини. Сердечник, переміщаючись в котушці, міняє ЕРС вторинних обмоток. Прилад дозволяє регулювати силу контактування з продуктом, що змінює липкість.

Таким чином, розглянутий комплекс приладів дозволяє визначати в лабораторних та виробничих умовах раціональні та оптимальні параметри на кожному технологічному етапі ковбасного виробництва, контролювати і автоматично регулювати їх, що створить передумови для розробки автоматичної системи управління якістю.

Знаючи динаміку зміни структурно-механічних властивостей м'ясних продуктів і виявивши суть процесів, які відбуваються, можна удосконалювати і створювати нові конструкції обладнання.

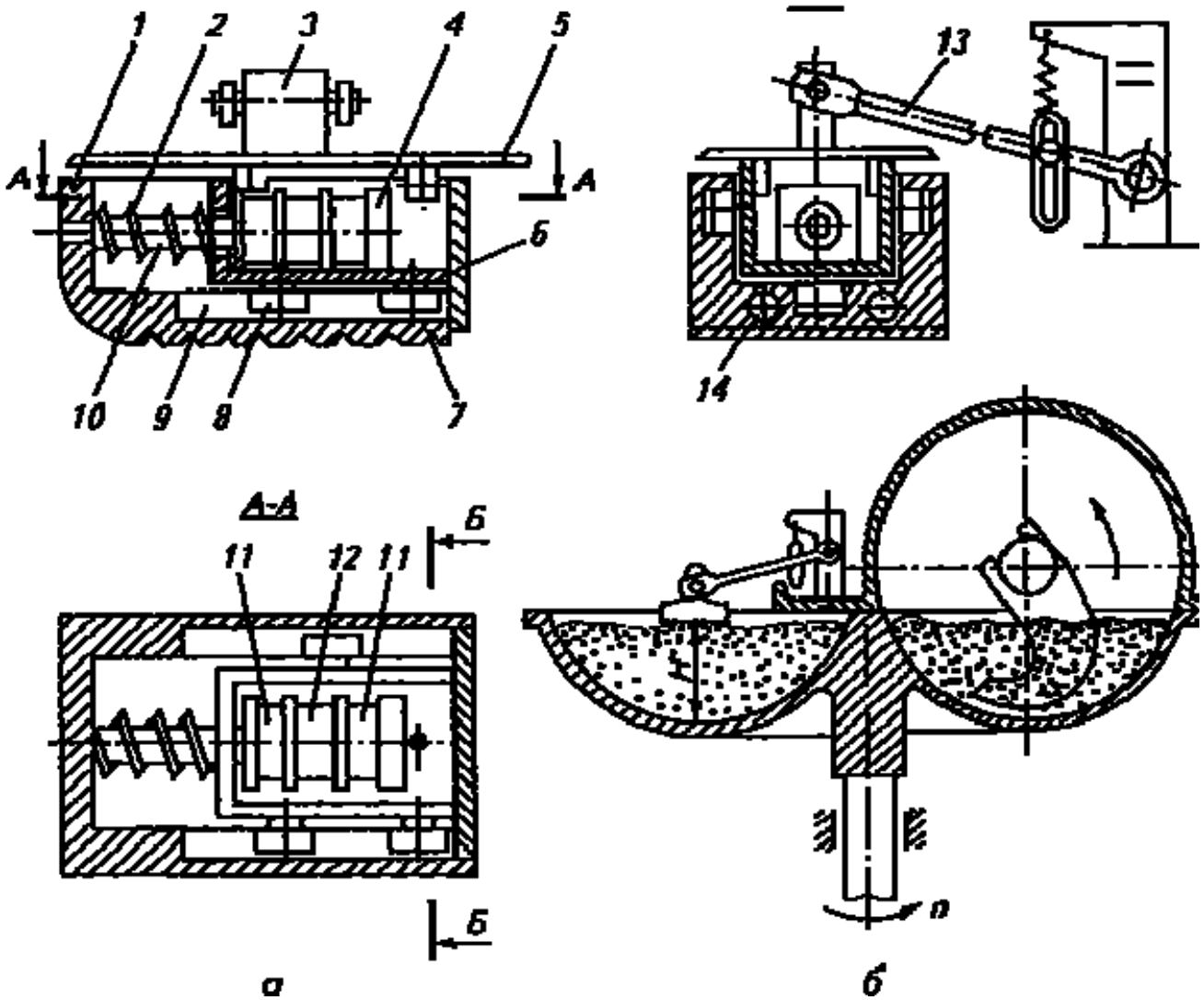


Рисунок 3.69 - Пристрій для визначення структурно-механічних властивостей ковбасного фаршу в потоці (а) та установка його в куттері (б):

1 - рухома частина корпусу (повзун); 2 - поворотна пружина; 3 - вушко; 4 - котушка; 5 - нерухома частина корпусу; 6 - рама; 7 - рифлення на рухливій частині корпусу; 8 - ролики; 9 - канали, які служать напрямними для роликів; 10 - сердечник; 11 - вторинні обмотки; 12 - первинна обмотка котушки; 13 - кронштейн; 14 - нагрівальний елемент

Проточний низькочастотний віскозиметр наведений на рисунку 3.70. Він містить сердечник циліндрової форми зі запресованим в нього магнітом. Сердечник укріплений на розтяжках на знімному кільці. Верхня частина сердечника входить у котушку індуктивності. Збуджуюча котушка розташована зовні корпусу. Досліджувана рідина протікає по напрямку стрілок на рисунку через стакан і корпус.

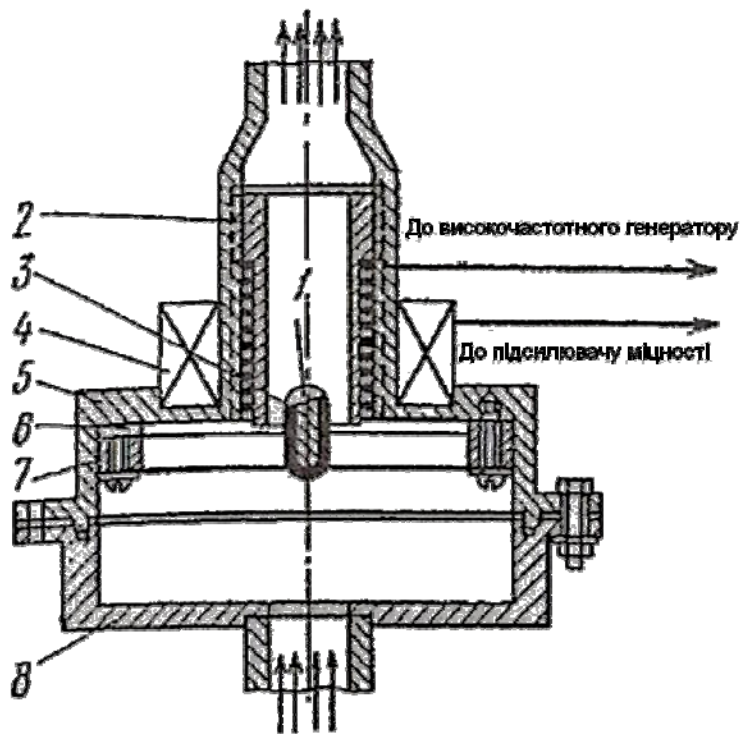


Рисунок 3.70 - Проточний віскозиметр:

- 1- сердечник;
 2-високочастотна котушка; 3- магніт;
 4 - збуджуюча котушка;
 5- корпус; 6- розтяжки;
 7- знімне кільце;
 8- стакан

У ВНІЕКІпродмаше створений **автоматичний пневматичний датчик в'язкості А1-ЕВШ**, призначений для контролю в'язкості шоколадної маси. У цьому датчику чутливий елемент маятникового типу під дією постійного навантаження переміщується у випробовуваній масі, час переміщення на певну величину фіксується.

Питання для самоконтролю

1. Що дозволяють визначати та контролювати безперервно діючі прилади?
2. Який принцип роботи пристрою для безперервного вимірювання в'язкості тіста?
3. Для вимірювання в'язкості яких продуктів призначений конвіграф?
4. Який принцип роботи зсувних приладів, створених Г. В. Бакунцем?
5. Який контроль здійснює зсувний пристрій, розроблений В. Д. Косим та ін.?
6. Який принцип роботи проточний низькочастотного віскозиметру?
7. Для контролю яких продуктів призначений пневматичний датчик в'язкості А1-ЕВШ?

3.8 Методи і прилади для виміру тиску

Для виміру тиску в системах недоцільно встановлювати звичайні механічні манометри, п'єзометри, дифманометри та інші прилади. Це пов'язано з тим, що чутливі елементи приладів мають складну конфігурацію і тому не піддаються миттю і стерилізації. Цю групу приладів не можна встановлювати на апаратах і трубопроводах для виміру тиску пластично - в'язких систем, оскільки середовище, що транспортується, проникає у вимірювальний елемент і прилад стає нечутливим. Отже, потрібні прилади та датчики, в яких чутливий елемент повинен стикатися з продуктом. Прилади для виміру тиску пластично - в'язких мас повинні задовольняти наступним вимогам: легкість очищення, вільний доступ до чутливого елементу, точність і відтворюваність результатів, надійність у роботі. Цим вимогам відповідають механічні та електричні прилади і датчики.

3.8.1 Механічні датчики

Конструкції механічних датчиків різноманітні. У механічних датчиках з буферною рідиною в якості приладу реєстрації використовують звичайний або контактний манометр (рисунки 3.71, а, б, в), що дозволяє регулювати процес у заданому інтервалі тисків.

У датчику (рисунок 3.71, а), розробленому в МГУПБє, внутрішню площину чутливого елементу і корпус ретельно заливають буферною рідиною (гліцерином або олією). Це забезпечує передачу тиску від мембрани до трубки Бурдону. Датчик має наступні складові: 1 - манометр; 2 - циліндричний корпус зі зовнішньою різьбою; 3 - буферна рідина; 4 - гумова мембрана; 5 - бобишка; 6 - трубопровід. Прилад призначений для виміру невеликих тисків, які визначаються міцністю гумової мембрани.

Для поширеного використання датчиків тиску в трубопроводах при транспортуванні високов'язких та пластично-в'язких рідин і матеріалів з механічними включеннями С. Ф. Коганом розроблений пристрій (рисунок 3.71, б), забезпечений додатковим циліндром з фланцями. При заповненні камери буферною рідиною створюють тиск, який вибирають таким, щоб напруження в стінці чутливого елементу не перевищувало розрахункового. Він складається з: 1 - манометр; 2-буферна рідина; 3 - фланці; 4 - компенсаційний пристрій; 5 - додатковий циліндр; 6 - чутливий елемент.

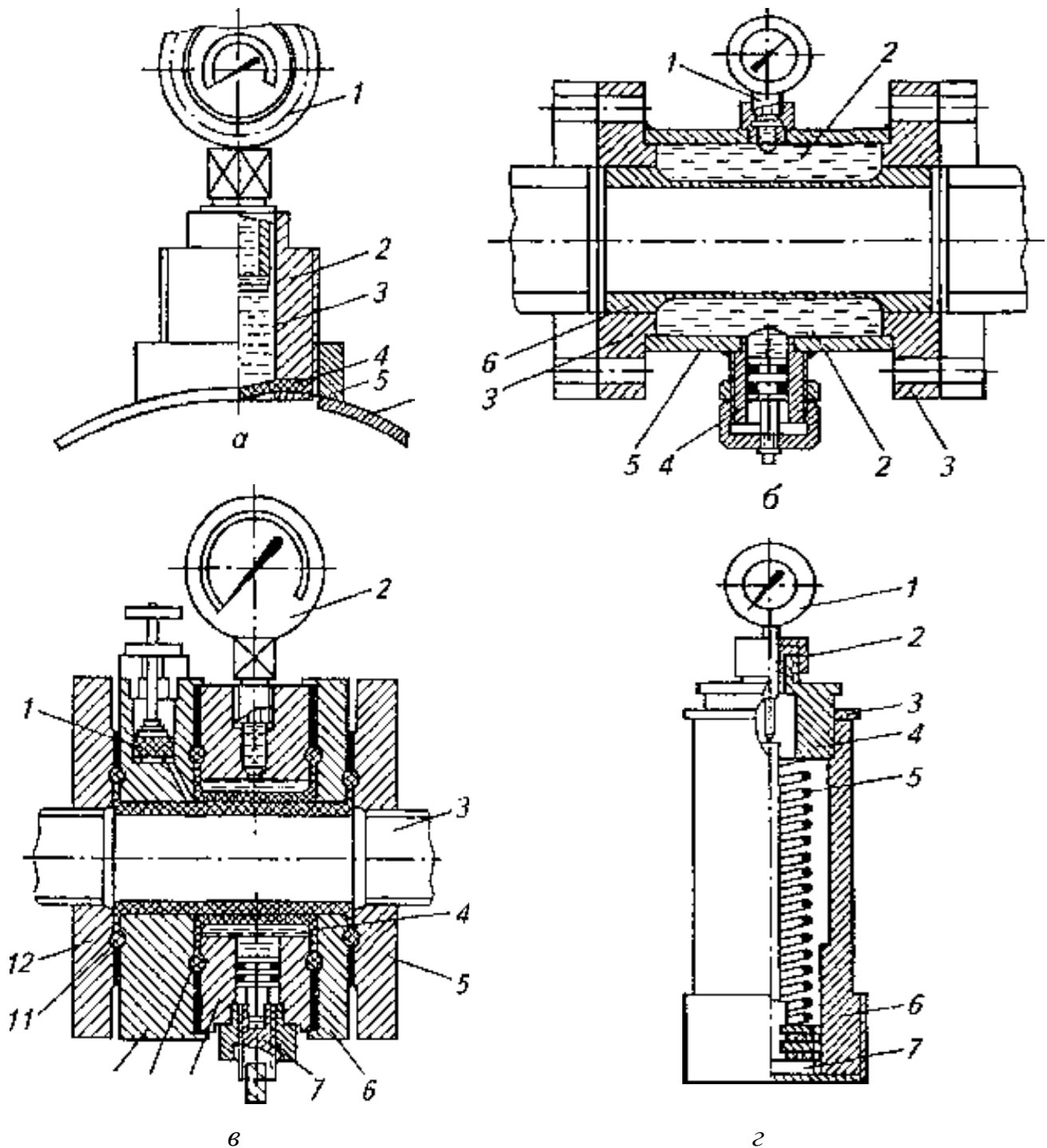


Рисунок 3.71 - Манометри з буферною рідиною(а, б, в) та механічний датчик(г) для виміру тиску пластично-в'язких продуктів

Датчик (рисунок 3.71,в) має підвищену надійність при вимірі тиску. Це досягається таким чином, що чутливий елемент забезпечений запобіжною еластичною діафрагмою. При цьому контактна циліндрична поверхня між ними пов'язана каналом з аварійним сигналізатором. Датчик має наступні складові: 1 - аварійний сигналізатор; 2 - манометр; 3 - трубопровід; 4 - буферна рідина; 5, 6, 10, 12 - флан-

ці; 7 - компенсатор; 8 - корпус; 9 - еластичний чутливий елемент; 11 - запобіжна діафрагма.

Пристрій використовують при перекачуванні пластично - в'язких продуктів з великими механічними включеннями. Механічні датчики з буферною рідиною прості по конструкції, але вимагають частих змін гумових мембран та діафрагм.

Механічний датчик з пружиною і індикатором наведений на рисунку 3.71, г. Чутливим елементом у нього служить поршень, силовим - пружина, а елемент, що реєструє, - індикатор годинникового типу. Для безперервного запису тисків замість індикатора годинникового типу можна використати індукційний датчик переміщень. Недолік датчика - складність виготовлення елементу циліндр - поршень (потрібна велика точність). Прилад має: 1 - індикатор; 2 - гайку з втулкою для кріплення індикатора; 3 - контргайку; 4 - настановну втулку; 5 - змінну пружину; 6 - циліндричний корпус з різьбою; 7 - поршень зі шкіряним ущільненням та хвостовиком.

Два останні пристрої, наведені на рисунку 3.71, в, г, можна використати при перекачуванні суспензії з кусковими включеннями, а також пластично - в'язких продуктів (ковбасний та ліверний фарші, паштети). Механічні прилади з буферною рідиною і пружиною надають стійкі результати $(0,2...50) \cdot 10^5$ Па.

3.8.2 Електричні датчики

У електричних датчиків тиску силовим елементом служить пружна сталева мембрана, тензомер для реєстрації, п'єзоелемент, потенціометр.

Тензометричні датчики наведені на рисунку 3.72.

У тензометричного датчика (рисунок 3.72, а) прогин мембрани під дією тиску продукту викликає подовження тензомеру та зміну його електричного опору і сили струму в ланцюзі, що записується на фотострічці шлейфового осцилографу.

У датчику (рисунок 3.72, б) з метою підвищення чутливості, лінійності результатів та надійності роботи між склянкою та циліндром встановлено перекладку з матеріалу малої жорсткості. Тензодатчик приклеєний в двох точках, одна з яких знаходиться на поверхні циліндра, а інша - на поверхні склянки. Точність виміру підвищується у результаті зниження температурних погрешностей. Для цього датчик забезпечений додатковим напівпровідниковим тензорезистором.

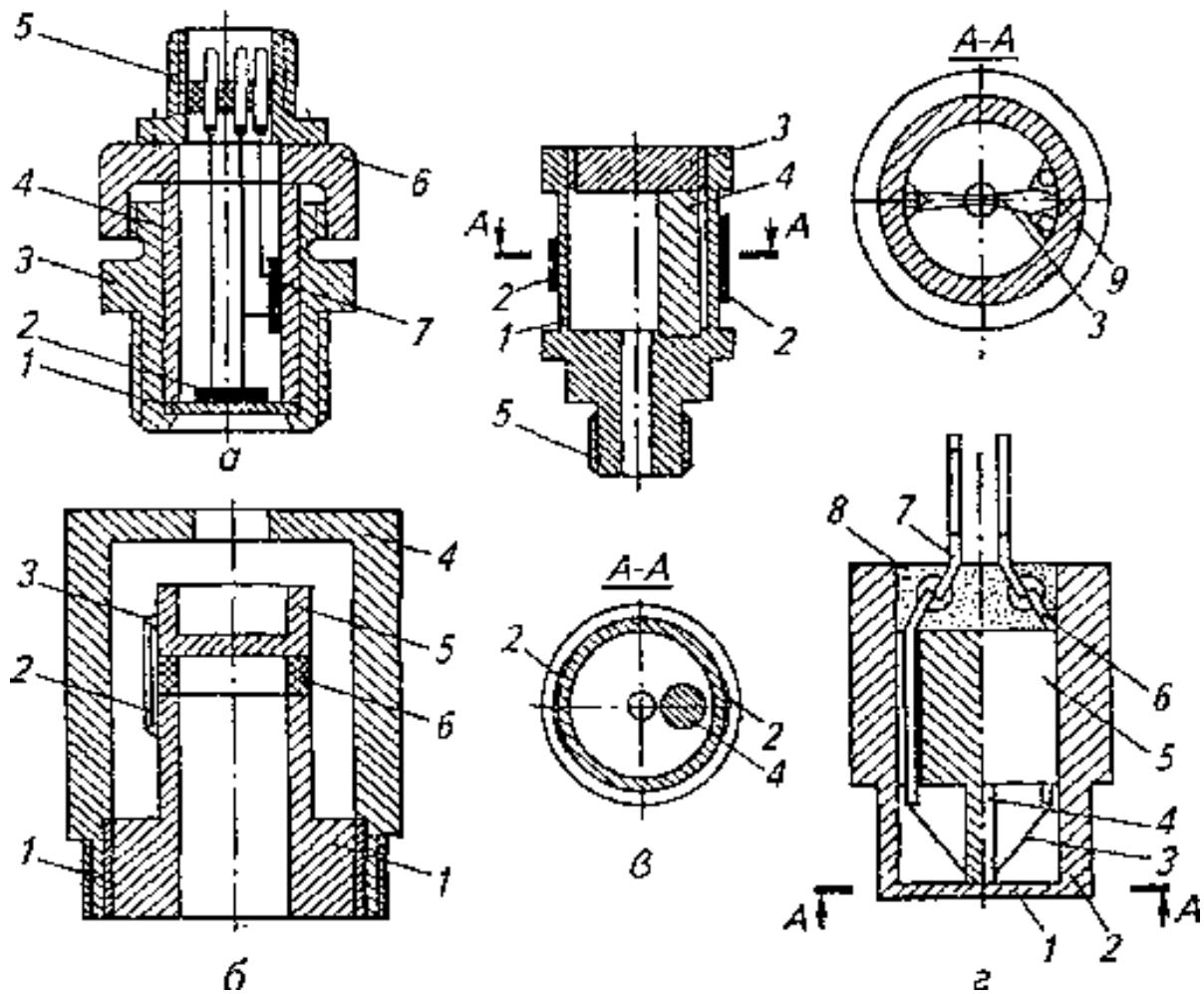


Рисунок 3.72 - Тензометричні датчики тиску :

а - тип I: 1 - змінна мембрана; 2 - тензометр електричного опору; 3 - корпус зі зовнішньою різьбою; 4 - притискна втулка; 5 - штепсельне з'єднання; 6 - гайка; 7 - компенсаційний тензометр

б-тип II: 1 - циліндр; 2 - тензометри; 3 - кріплення тензорезистору; 4 - захисний кожух; 5 - дно склянки; 6 - прокладка

в - тип III: 1 - пружний елемент; 2 - тензорезистори; 3 – кришка; 4 - стрижень; 5 - штуцер

г - тип IV : 1 - мембрана; 2-корпус; 3, 9 - відповідно робочий та компенсаційний дрітні тензорезистори; 4 - пружний елемент; 5 - сердечник; 6 - виведення до тензорезисторів; 7 - провідники до підсилювальної апаратури; 8 - клейове кріплення сердечника до корпусу

У пристрої тиск, що підводиться, впливає на стінки циліндра,

перекладку та на поверхню дна склянки, яка під впливом прикладеного тиску розтягує перекладку уздовж осі датчику. Вимірювальний діючий тензорезистор сприймає розтягування перекладки, змінюючи свій опір пропорційно тиску. Компенсаційний та діючий тензорезистори нагріваються одночасно при проходженні через них вимірювального струму. Внаслідок того, що температура обох тензорезисторів дорівнює, досягається висока точність компенсації впливу температури на тензочутливість напівпровідникових тензорезисторів.

Датчик тензометрування, розроблений з метою підвищення точності виміру (А. С. Лев і Г. І. Гераскин), складається з пружного елемента, виконаного у вигляді циліндричної тонкостінної трубки, закритої з одного боку штуцером, а з іншого – кришкою (рисунк 3.72, в). У середині трубки ексцентрично до її осі розташований стрижень.

На зовнішній поверхні пружного елемента наклеєні тензорезистори, що розташовані в площині, яка проходить через подовжні осі пружного елемента та стрижню. При створенні тиску в системі, де встановлений датчик, пружний елемент деформується. При цьому деформація стінки, довколишньої до стрижню, дуже незначна у порівнянні з деформацією віддаленої стінки, оскільки напруження в стінці, що створюється вимірюваним середовищем, компенсується напруженням, яке виникає від моменту, що згинає.

Для спрощення конструкції тензодатчиків В. К. Зайцев запропонував робочий та компенсаційний тензорезистори виконати у вигляді одного витку тензопроводу в склоізоляції, укладеного в прорізі на торці пружного елемента (рисунк 3.72, г). Тензопровід виконаний з попереднім натягом. Прогин мембрани, що виникає в результаті дії на неї тиску, передається на пружний елемент, який підлеглий деформації стиску. Під впливом напруження розтягу в проводі робочого тензорезистора зменшується попередній натяг, а отже, і опір тензорезистора, який пропорційний вимірюваному тиску. Компенсаційний тензорезистор поміщений в перетворювач без попереднього натягу, тому його опір не змінюється.

П'єзоелектричні датчики розділяють на наступні типи: з частотним виходом; п'єзоелектричний; з п'єзрезонатором; з хвилеводним стрижнем та п'єзометричною пластиною; з п'єзоперетворювачем; з рулонним п'єзоелементом, які наведені на рисунку 3.73.

У датчику тиску з частотним виходом (рисунк 3.73, а) в якості збудника та перетворювача коливань пружної пластинки використані п'єзокерамічні елементи.

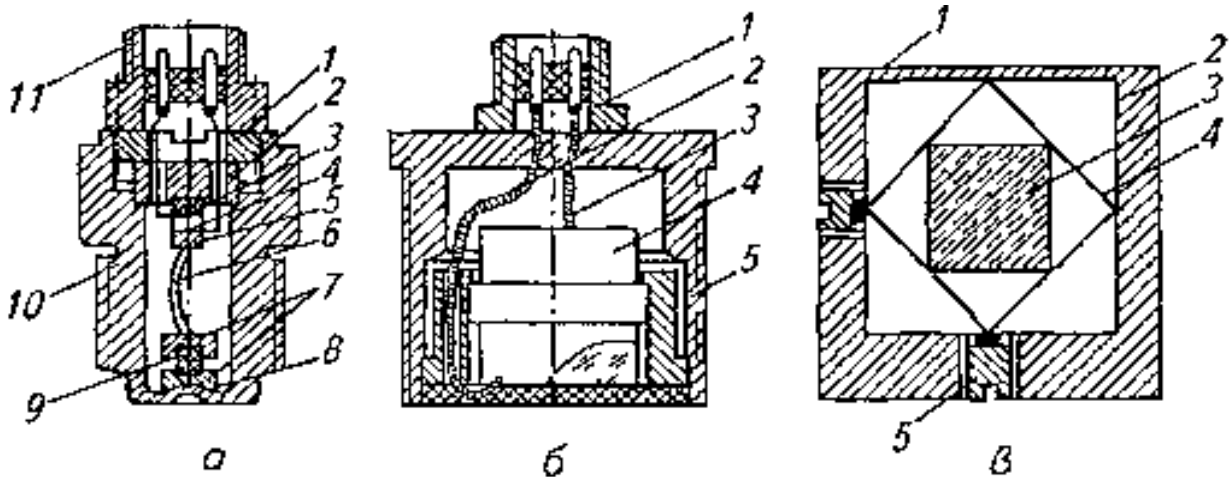


Рисунок 3.73 - П'єзоелектричні датчики тиску:

а - датчик з частотним виходом: 1 - рухлива гайка; 2, 5, 7 - металеві перекладки; 3 - збуджуючий п'єзоелемент; 4 - ізолююча перекладка; 6 - пружна пластина; 8 - мембрана; 9 - перетворюючий п'єзоелемент; 10 - корпус; 11 - штепсельне з'єднання;

б - п'єзоелектричний датчик: 1 - штепсельне з'єднання; 2, 3 - виводи; 4 - п'єзокристал; 5-корпус з уступом;

в - датчик з п'єзорезонатором: 1 - мембрана; 2 - корпус; 3 - п'єзорезонатор; 4 - пружний елемент; 5 - гвинти для регулювання частоти п'єзорезонатора

Зміна частоти коливань пружної пластини викликається стискуванням пластини з боку торців. Датчик складається з корпусу, виконаного разом з увігнутою всередину мембраною. Усередині корпусу знаходиться пружна сталева пластина, нижній та верхній кінці якої спираються на металеві перекладки. Нижній перетворюючий п'єзоелемент поміщений між двома металевими перекладками і знаходиться на мембрані. Верхній збудливий п'єзоелемент розташований між металевією і ізолюючою перекладками. П'єзоелементи виконані у вигляді плоского диску з електродами на торцях і мають подовжню поляризацію. Сигнал перетворюючого елемента подається на вхід підсилювача, вихід якого сполучений зі збудником. Від підсилювачу йде сигнал до реєстратора частоти. Для отримання коливань вигину пружну пластину стискають до деякого прогину гайкою.

П'єзоелектричний датчик (рисунок 3.74, б), розроблений Г. Н. Сунцовим, складається з корпусу, що має уступ для опори та кріплення циліндричного п'єзокристалу, який розділений на дві симетри-

чні частини. Вони виводи від активних поверхонь, та екран, сполучений з корпусом. Під дією тиску деформується нижня частина п'єзокристалу до кільцевої опори, верхня частина залишається недеформованою. Корисний сигнал знімається з виводів.

У датчику з п'єзорезонатором, сконструйованому С. З. Мамянном (рисунок 3.74, в), між мембраною та корпусом встановлений пружний елемент у вигляді рамки, усередині якої розміщений п'єзорезонатор, що має форму багатокутника. Частоту п'єзорезонатору регулюють спеціальними гвинтами, які виконують також функцію скріплення п'єзорезонатору з пружним елементом, а останнього - з корпусом датчика. П'єзорезонатор включений в електричну вимірвальну схему для формування і реєстрації сигналу, залежного від тиску. Під дією тиску мембрана деформується разом з пружним елементом, внаслідок чого п'єзорезонатор навантажується по кутах, викликаючи тим самим зміни власної частоти. Це призводить до появи у вимірвальній схемі електричного сигналу, пропорційного тиску.

П'єзоелектричні датчики тиску мають наступні елементи:

а - датчик з частотним виходом: 1 - рухлива гайка; 2, 5, 7 - металеві перекладки; 3 - збуджуючий п'єзоелемент; 4 - ізолююча перекладка; 6 - пружна пластина; 8 - мембрана; 9 - перетворюючий п'єзоелемент; 10 - корпус; 11 - штепсельне з'єднання;

б - п'єзоелектричний датчик: 1 - штепсельне з'єднання; 2, 3 - виводи; 4 - п'єзокристал; 5-корпус з уступом;

в - датчик з п'єзорезонатором: 1 - мембрана; 2 - корпус; 3 - п'єзорезонатор; 4 - пружний елемент; 5 - гвинти для регулювання частоти п'єзорезонатору;

г - датчик з хвилеводним стрижнем та п'єзометричною пластиною: 7 - корпус; 2 - металева втулка; 3 - ізолятор; 4 - напрямна втулка; 5 - стрижень; 6 - дренажний отвір; 7 - кришка; 8 - тонкий дріт; 9 - мембрана; 10 - п'єзоелектрична пластина; 11 - теплозахисний елемент; 12 – гумоподібний герметик; 13 – кабель;

д - датчик з п'єзоперетворювачем: 1 - корпус; 2 - п'єзоперетворювач; 3 - електроди; 4 - елемент, який сприймає тиск; 5 - джерело світла; 6 - ланцюг демпфування; 7 - світловоди; 8 - фотоприймач;

е - датчик з рулонним п'єзоелементом: 1 - п'єзоелемент; 2 - корпус; 3 - мембрана; 4 - основа; 5 - електроди; 6 - шар матеріалів п'єзоелементу; 7 - струмопровідні частини п'єзоматеріалу.

Датчик з хвилеводним стрижнем і п'єзометричною пластиною наведений на рисунку 3.74, г. В цих датчиках чутливий елемент

складається зі сполучених між собою п'єзоелектричної пластинки та зовнішнього теплозахисного елемента, скріпленого з хвилеводним стрижнем.

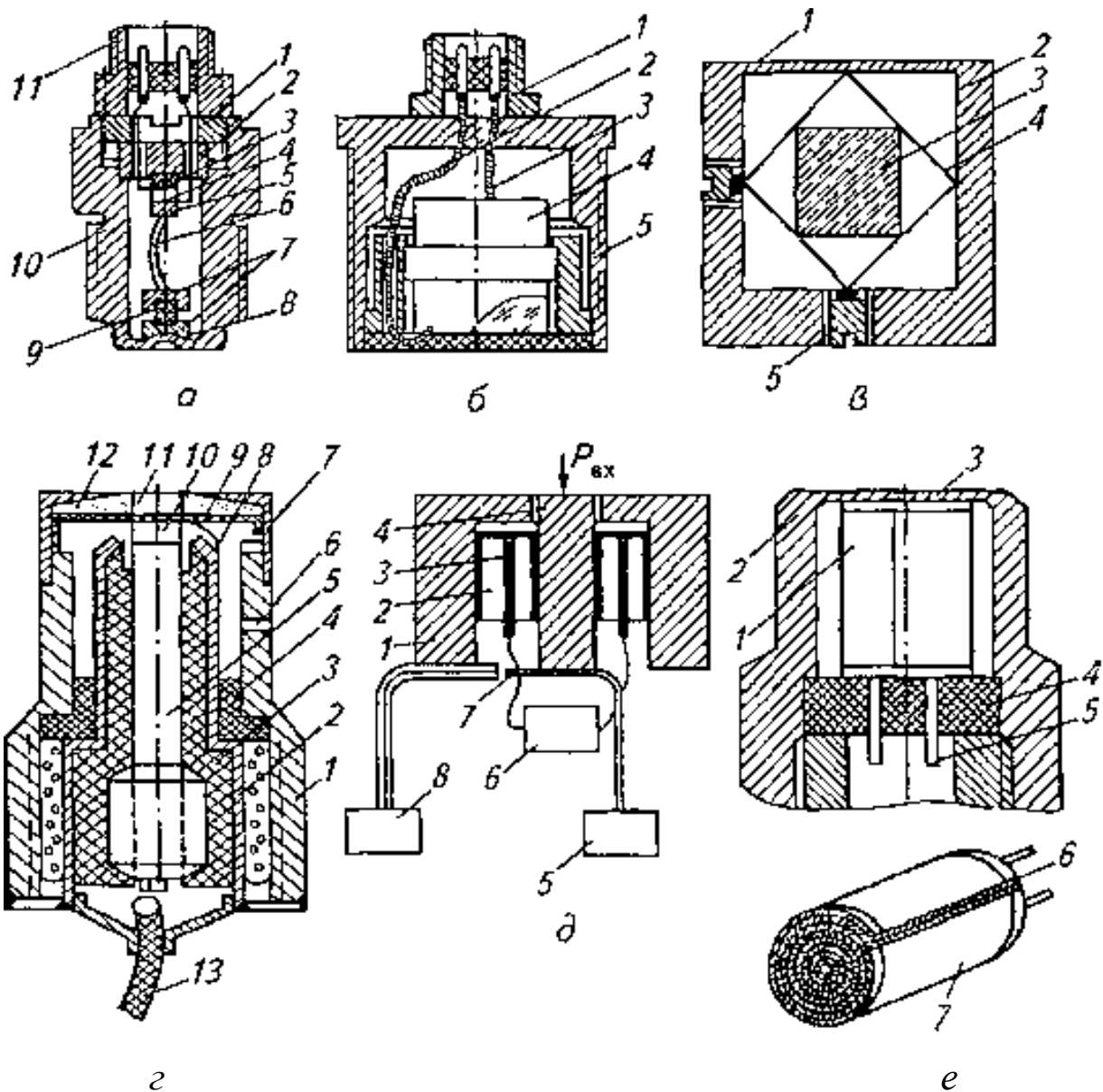


Рисунок 3.74 - П'єзоелектричні датчики тиску:

Усередині циліндричного корпусу датчика в ізоляторі закріпленний хвилеводний стрижень. Ізолятор поміщений в металеву втулку, яка служить струмопроводом та екраном і закріплена в корпусі за допомогою клею і направляючої втулки. Зовнішній електрод п'єзоелектричної пластини сполучений за допомогою тонкого дроту з втулкою. Між пластиною та елементом затиснута мембрана з еластичного матеріалу, наприклад фторопласту, з вирізом у центрі. Площа вирізу складає 70...80 % площі п'єзоелектричної пластини.

На торці корпусу поверх мембран закріплена кришка з отвором у центрі. Проміжок між кришкою та теплозахисним елементом складає 0,05...0,1 мм. Простір між ними заповнений гумоподібним герметиком. Електричний сигнал з п'єзоелектричної пластини знімається кабелем. У корпусі датчика є дренажний отвір. При дії тиску на торець датчика чутливий елемент деформується, і на п'єзоелектричній пластині виникає електричний сигнал. Мембрана та герметик оберігають бічну поверхню п'єзоелектричної пластини від дії вимірюваного тиску.

Датчик з п'єзоперетворювачем, розроблений М. С. Хлистуновим, наведений на рисунку 3.74, д. У цьому датчику тиску для підвищення точності вимірів до виходу п'єзоперетворювачу підключений ланцюг демпфування його коливань. До елементу та корпусу жорстко прикріплені кінці світлопроводів, які знаходяться в оптичному контакті. Інші кінці світлопроводів сполучені з джерелом світла та фотоприймачем. При дії тиску на елемент він зміщується відносно корпусу. Зміщення елементу разом зі світлопроводом призводить до зміни освітленості світлопроводу та появи на фотоприймачі сигналу, пропорційного тиску. Електричні заряди, які виникають при деформації п'єзоперетворювачів, викликають протікання струму та виділення енергії в ланцюзі демпфування. Це забезпечує швидке загасання коливань в датчику, що підвищує його завадостійкість та термостабільність, а демпфування коливань підвищує точність вимірів тиску, який швидко змінюється.

Датчик з рулонним п'єзоелементом зображений на рисунку 3.74, е. З метою спрощення конструкції п'єзодатчика для виміру тиску Ю. В. Чувикін та ін. запропонували чутливий п'єзоелемент виготовляти зі згорнутої в рулон стрічки, яка складається з двох шарів п'єзоматеріалу, поляризованих по товщині. Поверхні мають однакову поляризованість, причому кожен шар п'єзоматеріалу покритий з двох сторін струмопровідними шарами, до яких прикріплені електроди, розміщені на одному з торців рулону. Чутливий п'єзоелемент встановлений на основі, розташованій в корпусі. Електроди закріплені на струмопровідних шарах, нанесених на внутрішні та зовнішні поверхні п'єзоматеріалу. Тиск через мембрану передається чутливому елементу, на шарах якого виникають електричні заряди протилежних знаків. Величина заряду пропорційна тиску та довжині стрічки.

Датчики тиску – струмовихровий, електромеханічний, для визначення перепаду тиску та потенціометр наведені на рисунку

3.75. У струмових вимірювальних перетворювачів тиску зазвичай невисока чутливість через те, що зони максимального прогину мембрани та максимальної чутливості перетворювача не поєднані.

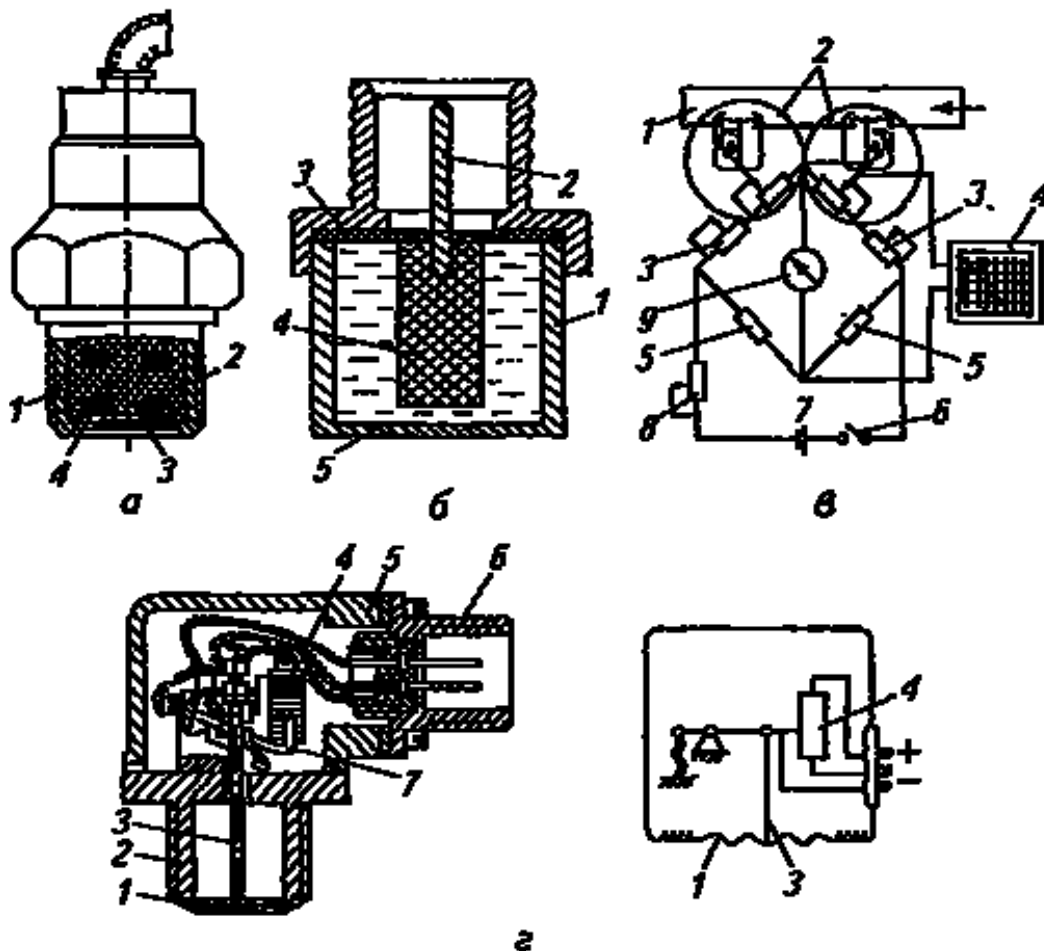


Рисунок 3.75 - Датчики тиску:

а – струмовихровий: 1 - корпус з мембраною; 2 - каркас;
3 – осьовий упор; 4 - вимірювальна котушка;

б- електромеханічний: 1 - корпус; 2 - посріблений рубідій;
3-кришка з ізоляційного матеріалу; 4 - графітовий стержень;
5 - посріблена мембрана;

в - облаштування для визначення перепаду тиску :
1 - трубопровід; 2 - датчики потенціометрів тиску; 3 - резистори для
установки моста в рівноважний стан; 4 - потенціометр;
5-нерегульовані резистори; 6 - комутуючий пристрій;
7 - джерело струму; 8 - резистор; 9 - індикатор нуля;

г - потенціометр: 1 - мембрана; 2 - корпус; 3 - шток; 4 - реохорд;
5 - кришка; 6 - штепсельне з'єднання; 7 - щітки

З метою усунення вказаного недоліку В. М. Карповим і В. Г. Запускаловим запропонований датчик (рисунок 3.75, а), у якого в центрі мембрани розташований упор, а котушка індуктивності поміщена над зоною максимального прогину мембрани. У результаті дії тиску на мембрану міняється проміжок між нею та вимірювальною котушкою, що викликає зміну імпедансу котушки. Чутливість струмовихрового вимірювального перетворювача тиску підвищується внаслідок локалізації прогину мембрани по кільцю.

З метою підвищення точності і надійності виміру Л. В. Новіков та ін. запропонували виготовляти корпус у вигляді срібної склянки, мембрани посріблені, стрижень з графіту, а наповнювач - посріблений рубідієвий. Датчик (рисунок 3.75, б) працює таким чином. Тиск, який створюється продуктом, діє на мембрану. Із-за деформації мембрани міняється відстань між нею та графітовим стрижнем. Одночасно міняється і щільність наповнювачу, внаслідок чого виробляється струм. Вихідний сигнал знімається з графітового стрижню та корпусу. Незважаючи на високу вартість датчика, він має істотну перевагу: не потребує подання на нього напруги, оскільки сам служить джерелом струму. Це забезпечує підвищену завадостійкість, високу чутливість та дистанційність роботи.

У датчику (рисунок 3.75, г) потенціометра, розробленому в МДУПБі, чутливим елементом служить гофрована мембрана, сполучена з корпусом методом дифузійного зварювання. Шток, закріплений в центрі мембрани, передає її деформацію на щітку, яка ковзає вздовж реохорду. Зміну опору вимірюють осцилографом (без підсилювача) або потенціометром. Вхідна зона до мембрани в протилежність попереднім пристроям у цього датчика відсутня. На практиці використовують різні модифікації цього датчика. Безперервний запис результатів на стрічці для візуального спостереження значно полегшує проведення експериментів та їх подальшу обробку.

На базі цих датчиків розроблено облаштування для виміру перепаду тисків на ділянках трубопроводу або в робочих органах машин і апаратів (рисунок 3.75, в), яке складається з двох датчиків та моста постійного струму. З моста сигнал розбалансу подається на вихід самописного потенціометру. Дротяні резистори датчиків тиску включені в плечі моста, який складається з регульованих і нерегульованих резисторів. Для установки моста в рівноважний стан в його плечах передбачені регульовані резистори. Живлення пристрою передбачене від джерела напруги не більше 6,5 В.

Для визначення тиску продукту в оболонці з еластичного матеріалу в МДУПБі розроблений пристрій (рисунок 3.76) на базі датчика потенціометра, який можна використовувати для зняття епюри тиску по перерізу ковбасного батону та трубопроводу.

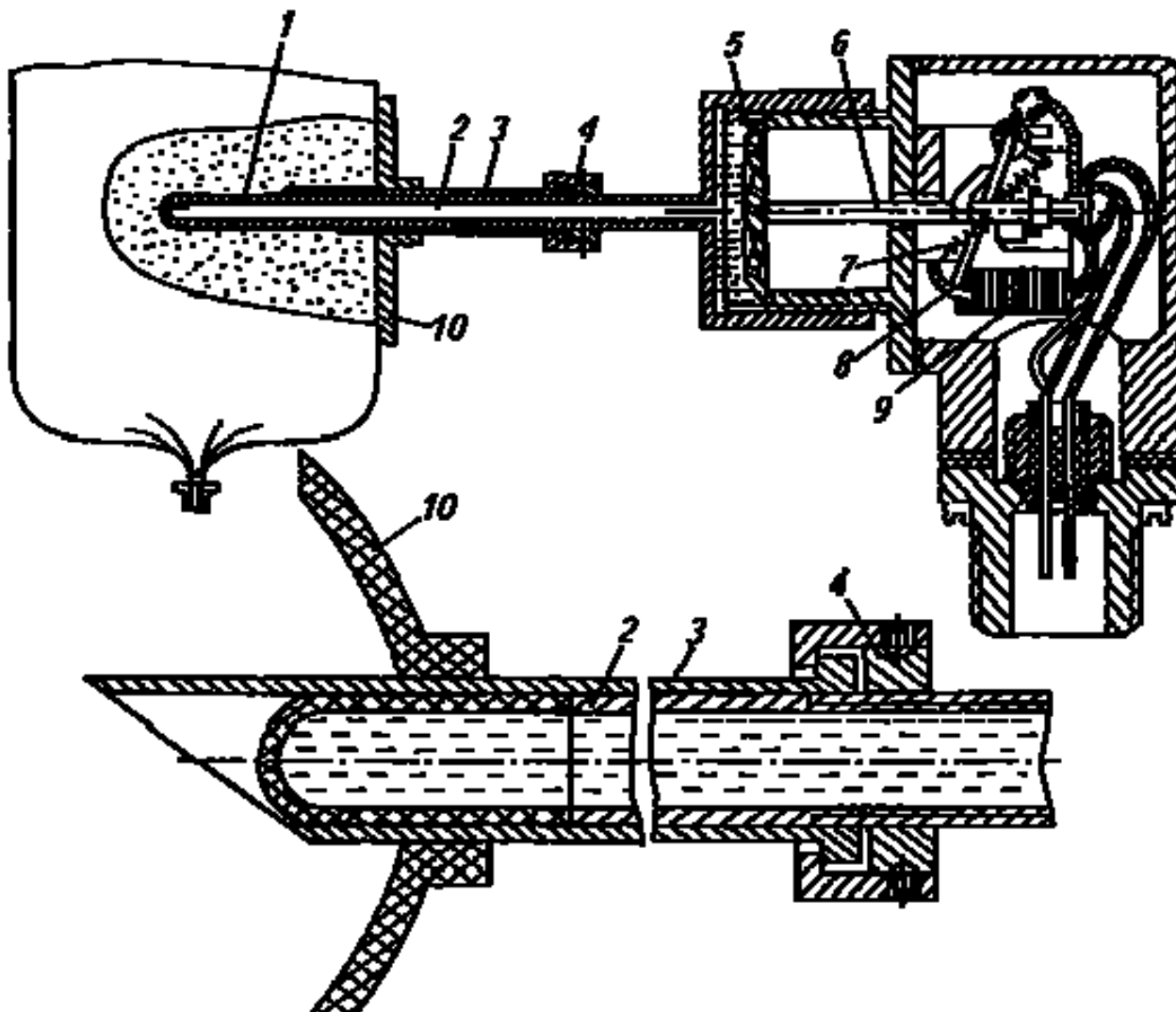


Рисунок 3.76 - Датчик потенціометра для виміру тиску в продукті:

1 - чутливий елемент; 2 - трубка з буферною рідиною; 3 - захисна трубка; 4 - гайка; 5 - мембрана; 6 - передатний механізм; 7 - пружина; 8 - щітка; 9 - реохорд; 10 – ущільнення

Пристрій забезпечений трубкою, яка охоплює перетворювач, та чутливим елементом, виконаним у вигляді склянки з еластичного матеріалу. З метою усунення витікання фаршу з оболонки трубка забезпечена манжетою.

Пристрій працює таким чином. Обертанням гайки захисна трубка насувається на чутливий елемент, надаючи перетворювачу необ-

хідну жорсткість. Потім облаштування перетворювача підводиться до батону ковбаси, манжета притискається до оболонки і внаслідок адгезії щільно прилягає до неї. Перетворювач гострим кінцем протикає оболонку і входить у батон. Обертанням гайки у зворотний бік захисна трубка зрушується з чутливого елемента. Фарш, що знаходиться під тиском, впливає на чутливий елемент, який, випробовуючи об'ємне стискування, передає його через буферну рідину на мембрану. Прогин останньої викликає зрушення щітки реостату, змінюючи його омичний опір, що фіксується вторинним приладом.

Пристрій дозволяє виміряти надмірний тиск фаршу усередині ковбасних батонів та по перерізу трубопроводу. У цьому пристрої є вільний доступ до чутливого елемента, що полегшує санітарну обробку. Пристрій характеризується високою точністю, відтворюваністю результатів та надійністю в роботі.

Таким чином, пристрої для виміру тиску в'язких та пластично - в'язких продуктів дозволяють контролювати, регулювати і автоматизувати процес транспортування продуктів по трубопроводах, а також ширше використовувати витратоміри змінного перепаду тиску.

Питання для самоконтролю

1. Яким вимогам повинні задовольняти прилади для виміру тиску пластично-в'язких мас?
2. Який принцип роботи мають механічні датчики з буферною рідиною?
3. Що служить силовим елементом у електричних датчиків тиску?
4. Який принцип роботи мають тензометричні датчики?
5. На які типи розділяють п'єзоелектричні датчики?
6. Які функції виконують пристрої для виміру тиску в'язких та пластично - в'язких продуктів?

Розділ 5

СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛОКА ТА МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ

5.1 Характеристики зсуву молочних продуктів

У залежності від фізико – хімічного стану високобілкових молочних продуктів, обумовленого їх температурою, хімічним складом та ступеню механічної обробки, характеристики зсуву оцінюються різними методами.

5.1.1 Характеристики зсуву рідинообразних продуктів

Молоко – це складна полідисперсна система, дисперсійним середовищем якої є вода (0,83 – 0,89 кг води у 1 кг молока 83-89%), дисперсною фазою – жир, білки, гази і так далі (17-11%).

В'язкість молочних продуктів можна навести як суму в'язкості дисперсійного середовища та дисперсної фази, а також приріст в'язкості внаслідок утворення структури [96].

$$\eta_{E\Phi} = 0,69 \cdot 10^{-3} e^{19000T^*/R} \left\{ (1 + 4,5V_{D.\Phi.}) + 1,67 \left(e^{3800T^*/R} - 1 \right) \right\}, \quad (5.1)$$

де T^* - надлишкова зворотня абсолютна температура, 1/К;

R - універсальна газова стала, 8,314 Дж/(моль·К);

$V_{D.\Phi.}$ - об'ємна концентрація дисперсної фази, м³/м³.

Член, який стоїть перед фігурною дужкою, характеризує змінення в'язкості води у залежності від температури; $4,5V_{D.\Phi.}$ - поправка на дисперсну фазу; другий комплекс у фігурних дужках враховує при-

ріст в'язкості з урахуванням структури.

Структурна складова в'язкості молока зникає після механічного діянні на молоко (багатократне пропускання однієї і тієї же порції молока через капілярну трубку), що веде до зниження в'язкості.

Таблиця 5.1 – Залежність в'язкості цільного молока від температури

Температура $^{\circ}\text{C}$	Динамічна в'язкість $\mu \cdot 10^3$, Па·с	Кінематична в'язкість $\nu \cdot 10^6$, м ² /с
10	2,47	2,39
20	1,79	1,74
30	1,33	1,30
40	1,04	1,02
50	0,85	0,84
60	0,71	0,70
70	0,62	0,62
80	0,57	0,57

У концентрованих білкових молочних продуктів, навпаки, структурна компонента в'язкості настільки велика, що в порівнянні з нею в'язкістю дисперсного середовища можна зневажити. При цьому концентрованої білковій масі будуть притаманні граничне напруження зсуву та аномалія в'язкості.

В'язкість молока, яка була зміряна на реовіскозиметрі Гепплера, зменшується з підвищенням температури, що наведено у таблиці 5.1.

Це явище спостерігається доки температура молока не перейде границю, вище якої починається денатурація білків молока, внаслідок чого темп зростання в'язкості молока зі збільшенням температури підвищується. Цей процес необоротний, тому після охолодження його в'язкість буде вище попереднього значення.

Ступінь денатураційних змінень білків молока залежить не тільки від температури, але і від тривалості теплового діяння. Вплив температури пастеризації та витримки на в'язкість обезжиреного молока наведений у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Вплив температури пастеризації та витримки при неї на в'язкість обезжиреного молока $\eta \cdot 10^3$, Па·с

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Витримка в процесі пастеризації, с								
	0	15	30	60	120	300	600	1200	1800
63	1,532	-	-	-	-	1,533	1,533	1,533	1,533
72	1,539	1,542	1,544	-	-	1,646	1,550	1,566	1,572
80	1,576	1,578	1,579	1,581	1,581	1,592	1,596	-	-
85	1,578	1,579	-	-	1,591	1,599	1,601	-	-
90	1,611	-	1,613	-	1,616	1,626	1,656	-	-

Високотемпературна обробка приводе до підвищення в'язкості згущених молочних продуктів [14]. Згущене цільне молоко та обезжирене молоко без цукру при концентрації сухих речовин до 45 кг на 1 кг згущеного молока (45%) проявляє малу аномалію в'язкості.

Для розрахунку в'язкості незгущеного та згущеного молока у залежності від температури зручно користуватися універсальною узагальненою залежністю $\lg \frac{B_0^* T_{PP} \rho_{PP}}{B_0^* T \rho} = -\frac{a(T - T_{PP})}{b + (T - T_{PP})}$. Наприклад, для молока з $\varphi = 0,032$ кг жиру на 1 кг молока (3,2%) $T_{PP} = 295$ К та $\eta_{PP} = 1,65 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Згущені молочні продукти з цукром є псевдоеластичними неньютонівськими рідинами. Існує єдина температурно – інваріанта характеристика в'язкості $(\eta/\eta_0) - (t_P \dot{\gamma})$, де η - в'язкість при градієнті швидкості $\dot{\gamma}$ (с⁻¹), Па·с; η_0 - найбільша ньютонівська в'язкість, Па·с; t_P - осереднений період релаксації напружень, с [27]. У таблиці 5.3 наведена залежність безрозмірної в'язкості η/η_0 від приведенного градієнту швидкості $t_P \dot{\gamma}$. Для згущених молочних продуктів з цукром осереднене значення релаксації дорівнює $2,5 \cdot 10^{-5}$ с.

Таблиця 5.3 - Залежність безрозмірної в'язкості η/η_0 від приведенного градієнту швидкості $t_P \dot{\gamma}$

$t_P \dot{\gamma}$	0,002	0,006	0,01	0,02	0,06	0,1	0,2	0,6	1	2	6	10
η/η_0	1	1	0,98	0,92	0,76	0,67	0,55	0,33	0,25	0,17	0,11	0,10

В інтервалі змінення $t_P \dot{\gamma}$ від $2 \cdot 10^{-2}$ до 3 безрозмірна в'язкість згущених молочних продуктів з цукром визначається за формулою:

$$\eta/\eta_0 = 1 / [3(\tau_P \dot{\gamma})^{0,85} + 1] \quad (5.2)$$

Значення найбільшої ньютонівської в'язкості згущених молочних продуктів з цукром одразу після згущення повинна знаходитися у границях від 2 до 5 Па·с. Внаслідок розвитку структуроутворення в'язкість таких продуктів швидко збільшується, особливо протягом першої доби. Помітне збільшення в'язкості продовжується протягом перших трьох місяців, після чого темп приросту в'язкості різко зни-

жується та значення в'язкості асимптотичне наближується до деякої граничної величини. На в'язкість згущених молочних продуктів суттєвий вплив оказує способи згущення та внесення цукру у молоко.

В'язкість обезжиреного молока, згущеного за допомогою ультрафільтрації, розраховується за формулою:

$$\eta \cdot 10^3 = 660c^{2,24} + 1,71, \quad (5.3)$$

де c - концентрація білка, кг білка на 1 кг продукту.

Таблиця 5.4 – В'язкість обезжиреного згущеного молока

c , кг/кг	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15
$\eta \cdot 10^3$, Па·с	1,996	2,919	4,709	7,424	11,13

Ця формула дійсна при $c < 0,15$ та $t = 20^\circ\text{C}$. Значення в'язкості наведені у таблиці 5.4.

Кисломолочні продукти створюють внесенням у молоко закваски, під дією якої відбувається згортання білків та утворення просторової структури з білків молока зі включенням молочного жиру та вологи. Підвищення температури прискорює процес структуроутворення. У таблиці 5.5 наведені дані впливу температури на в'язкість згустку. В'язкість кисломолочних продуктів визначається видом закваски, а також видом та кількістю стабілізаторів.

Таблиця 5.5 – Вплив температури на в'язкість згустку $\eta_{EF} \cdot 10^3$ (Па·с)

Стан структури	Температура пастеризації, $^\circ\text{C}$			
	63	72	80	90
Незруйнована	457	549	1234	1896
Зруйнована	4,53	6,01	6,39	7,9
Через 15 хв. після зруйнування	6,32	6,32	8,22	10,11

У залежності від концентрації жиру вершки можуть бути віднесені як до ньютонівських, так і до не ньютонівських рідин. Вершки з вмістом жиру до 30% незначно проявляють аномалію в'язкості, і при інженерних розрахунках їх можна відносити до ньютонівських рідин. До ньютонівських рідин відносяться також вершки і з більш високим вмістом жиру, якщо жир знаходиться у розплавленому стані.

Температура зведення для вершків зростає зі збільшенням в них вмісту жиру:

$$T_{IP} = 293 + 51,6\varphi, \quad (5.4)$$

де φ - вміст жиру, кг жиру на 1 кг вершків.

В'язкість вершків з вмістом жиру 0,3-0,5 кг/кг може бути визначена за формулою:

$$\eta = 0,07\varphi^{4,22}\dot{\gamma}^{-0,6}e^{\frac{5527\dot{\gamma}^{0,09}\varphi^{-0,4}}{RT}}. \quad (5.5)$$

Для вершків з вмістом жиру 0,6-0,83 кг/кг

$$\eta = 0,9\varphi^{5,9}\dot{\gamma}^{-1,0}e^{\frac{8709\dot{\gamma}^{0,09}\varphi^{-0,15}}{RT}}. \quad (5.6)$$

Формула справедлива при значеннях $\dot{\gamma} = 30-130 \text{ с}^{-1}$; $T = 293-363 \text{ К}$; $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$.

В'язкість вершків визначається співвідношенням фракцій жиру з високою та низькою температурою плавлення, тривалістю та умовами їх зберігання. Вершки після дозрівання перед збиванням їх в масло мають більшу в'язкість, ніж вершки, які отримані з свіжого молока та не піддавалися дозріванню.

В'язкість розплавленого масла відповідна в'язкості вершків при однакової температурі та вмісті жиру. $\eta_{E\Phi}$ (Па·с) при температурі нижче фазових переходів більшості фракцій жиру, визначається залежністю:

$$\eta_{E\Phi} = K\dot{\gamma}^{n-1}. \quad (5.7)$$

Значення постійних K та n для масла з 0,16 кг вологи на 1 кг масла (16%), отриманого по методу перетворення високожирних вершків у масло, наведені у таблиці 5.6, а для масла, збитого у масло-робці безперервної дії - у таблиці 5.7.

Маргарин при температурі нижче температури фазових переходів більшості фракцій жиру проявляє аномалію в'язкості, тобто зі збільшенням градієнту швидкості в'язкість маргарину зменшується. При змінненні $\dot{\gamma}$ від 0,1 до 30 с^{-1} і ΔT від -5 до +20 К в'язкість різномані-

тних видів маргарину можна отримати за формулою:

$$B_0^* / B_{PP}^* = e^{-(0,53+0,76 \ln \dot{\gamma})} \quad (5.8)$$

Таблиця 5.6 - Значення K (Па·с^{*n*}) та n

Температура °С	Гradient швидкості с ⁻¹					
	0,1667-2,7		2,7-48,6		48,6-145,8	
	<i>n</i>	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>K</i>
14	0,07	505	0,17	506	0,3	304
16	0,08	410	0,18	372	0,36	186
18	0,12	280	0,22	254	0,42	115
20	0,15	145	0,28	135	0,46	67,6
25	0,22	56	0,33	50,2	0,58	13,7
30	-	-	0,44	15,8	0,76	5,8

Таблиця 5.7 - Значення K (Па·с^{*n*}) та n

Температура °С	Гradient швидкості с ⁻¹					
	0,1667-2,7		2,7-48,6		48,6-145,8	
	<i>n</i>	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>K</i>
13	0,005	1180	0,29	854	-	-
16	0,008	916	0,295	860	0,345	512
19	0,081	352	0,306	259	0,43	198
25	0,175	176	0,33	129	0,48	94

Значення зведеної ефективної в'язкості B_{PP}^* при температурі зведення $T_{PP} = 283$ К та gradientі швидкості $\dot{\gamma} = 0,5$ с⁻¹ для маргаринів наведені у таблиці 5.8.

Одним зі шляхів створення нових функціональних продуктів є комбінування вторинної молочної сировини із сировиною рослинного походження,

що дозволяє одержувати продукти з високим вмістом тваринного білка, збагачені природними біологічно активними сполуками.

Таблиця 5.8 - Залежність ефективної в'язкості $B_0^* \cdot 10^3$ (Па·с) маргаринів від gradientу швидкості

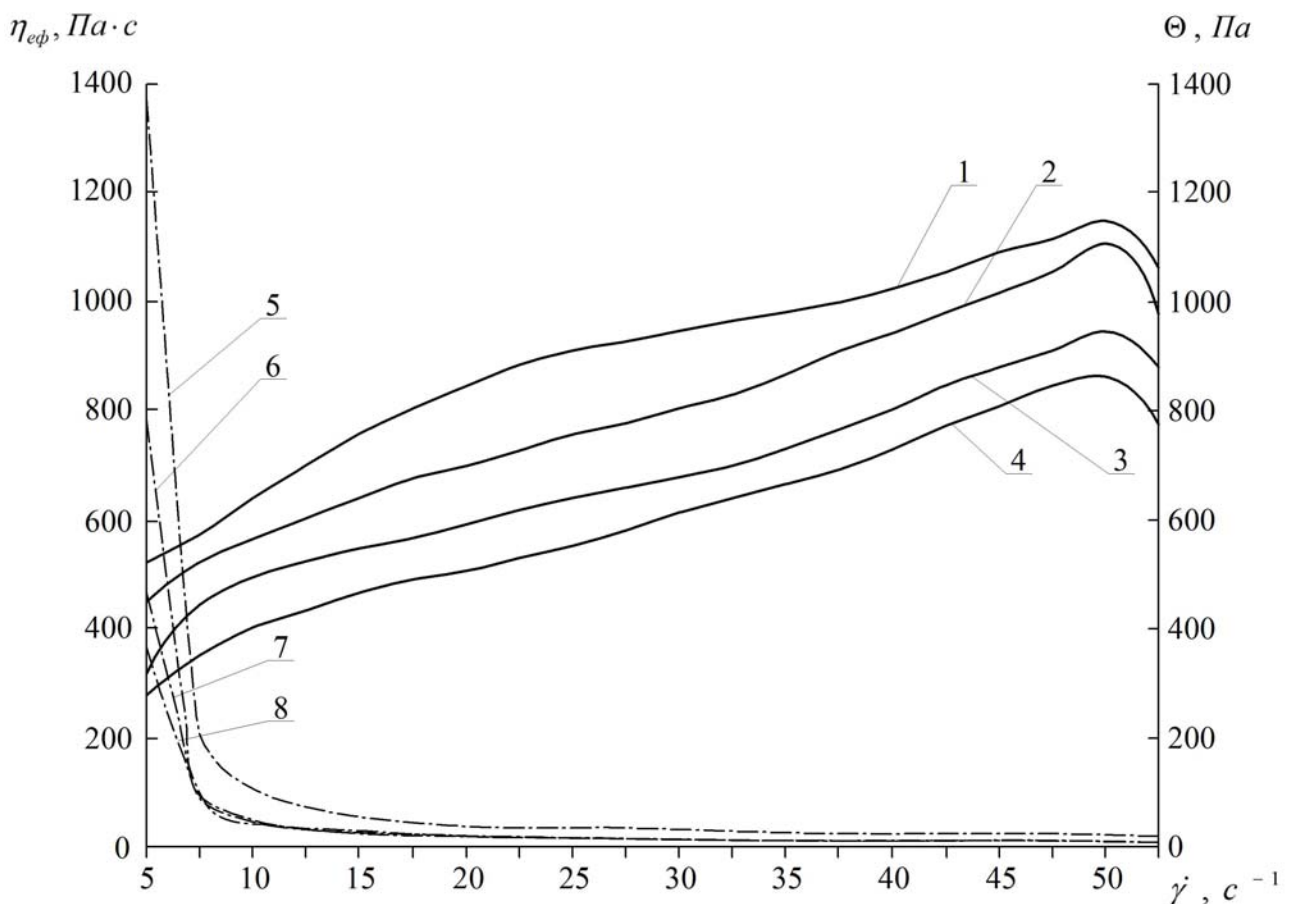
Вид маргарину	Приведена в'язкість B_{PP}^*	Гradient швидкості, с ⁻¹						
		0,1	0,5	1,0	5,0	10,0	20,0	30,0
Вершковий	2260	7655	2253	1330	391,5	231,2	136,5	100,3
Слов'янський бутербродний	2350	7960	2343	1383	407,1	240,4	141,9	104,3
«Ера»	2150	7282	2143	1265	372,4	219,9	129,9	95,4

Були розроблені технології виробництва молочно-рослинних фаршів з використанням молочно-білкового концентрату зі сколотин (МБК) як основного компоненту, та введення до складу фаршів овочевих пюре [23]. Особливості технології та перспективи подальшого використання цих фаршів в харчовій продукції визначили необхід-

ність дослідження їх реологічних властивостей.

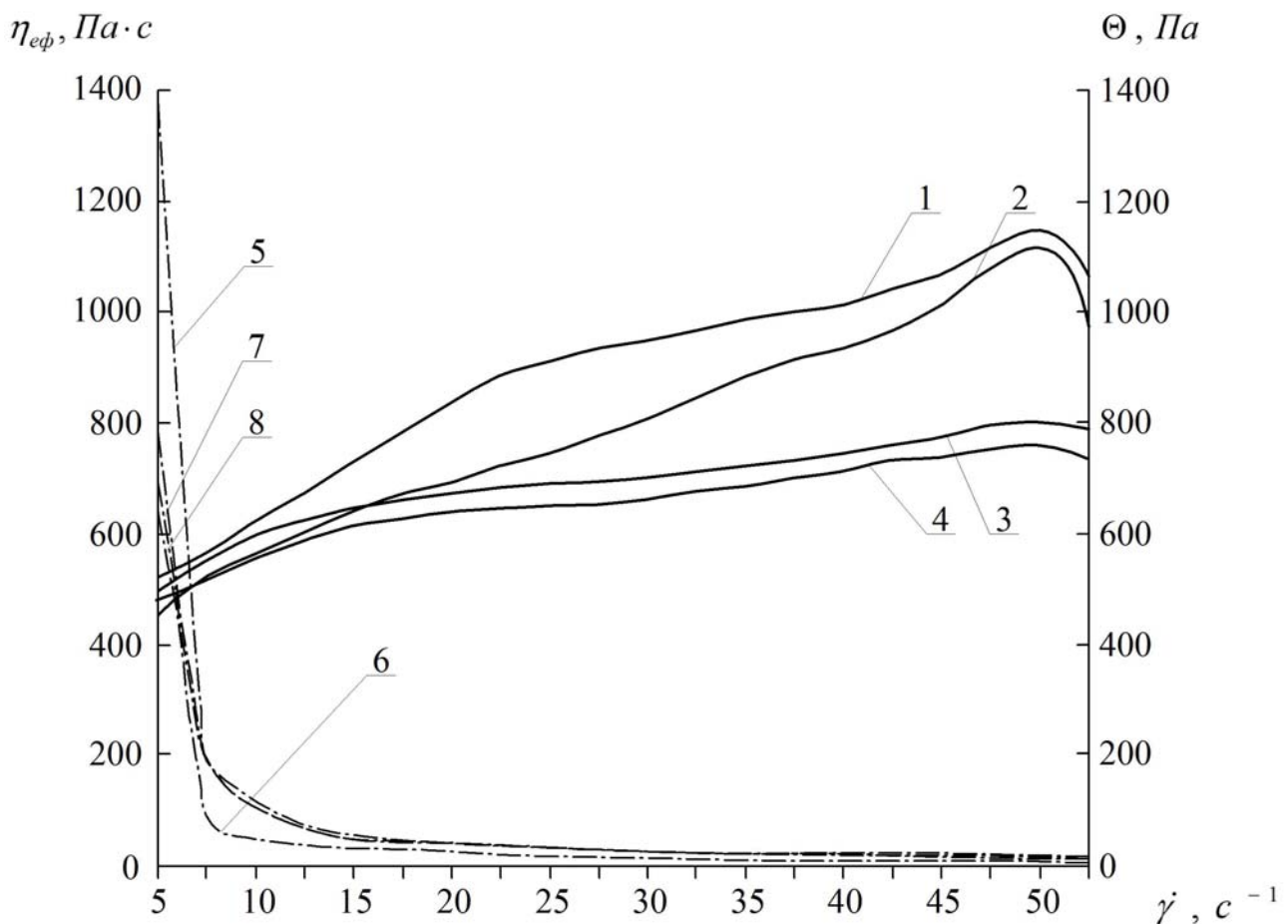
Об'єктом дослідження були 8 зразків напівфабрикату зразки №1, №2 (контрольні) - фарші, отриманні при змішуванні протертого кислого сиру з яєчною масою і борошном у свіжому вигляді та після заморожування відповідно; зразки з додаванням овочевих пюре у кількості 17% у свіжому вигляді та після заморожування відповідно: №3, №4 - молочно-гарбузовий фарш; №5, №6 - молочно-кабачковий фарш; зразки №7, №8 – молочно - морквяний фарш.

На рисунках 5.1 – 5.3 зображені криві зміни в'язкості та напруження зсуву за часом виміру у залежності від швидкості зсуву.



Напруження зсуву: 1, 2 –контрольного свіжого зразку та після заморожування; 3, 4 – молочно - гарбузового свіжого фаршу та після заморожування; ефективна в'язкість: 5, 6 – контрольного зразку після заморожування та свіжого; 7, 8 – молочно - гарбузового свіжого фаршу та після заморожування

Рисунок 5.1 - Криві зміни в'язкості та напруження зсуву

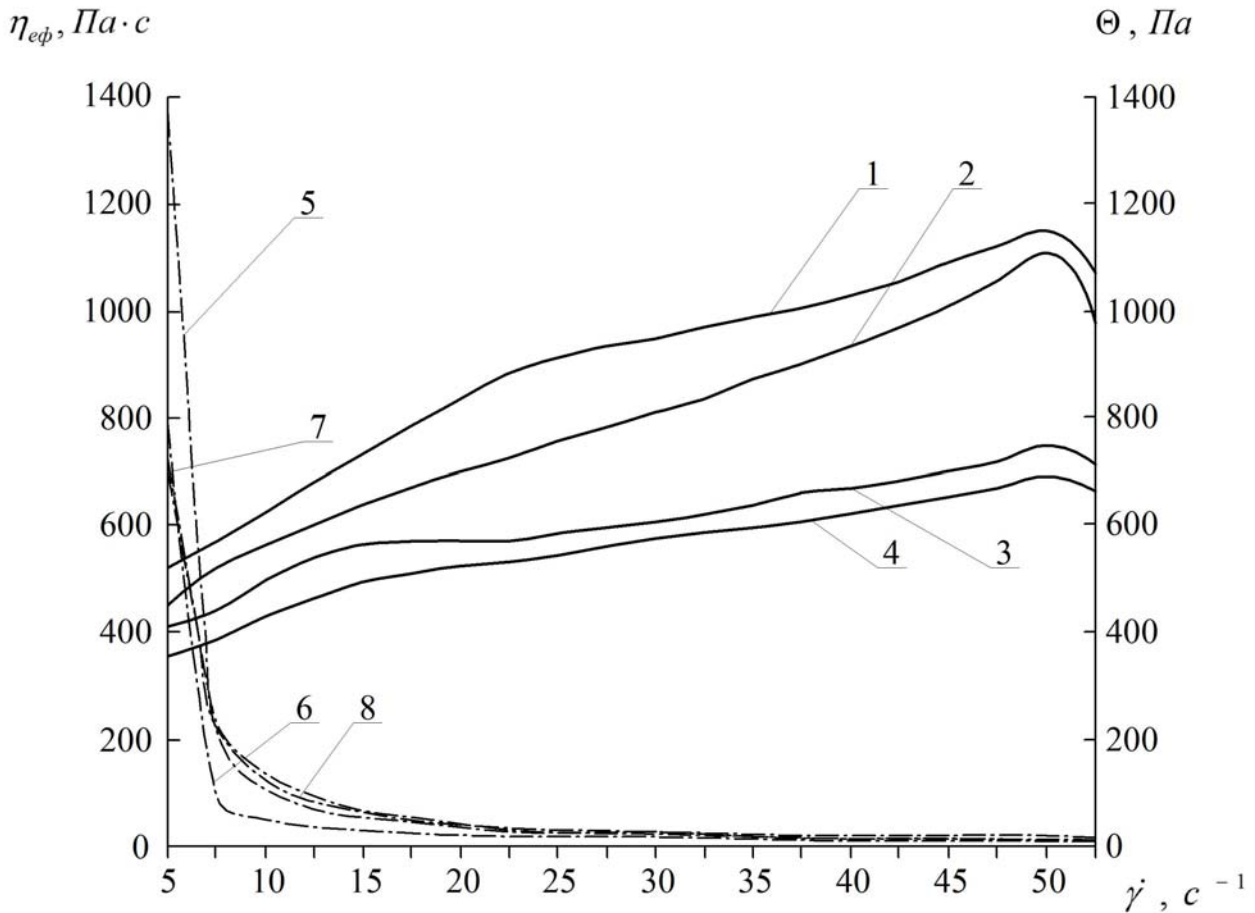


Напруження зсуву: 1, 2 – контрольного свіжого зразку та після заморожування; 3, 4 – молочно-кабачкового свіжого фаршу та після заморожування; ефективна в'язкість: 5,6 – контрольного зразку після заморожування та свіжого; 7,8 – молочно - кабачкового свіжого фаршу та після заморожування

Рисунок 5.2 - Криві зміни в'язкості та напруження зсуву

Змінення рецептури фаршу як у свіжому фарші, так і після заморожування, не впливає на вигляд кривих, а впливає на значення отриманих величин. З підвищенням градієнту швидкості в'язкість спадає та стабілізується перед переходом в область зруйнованої структури. Значне спадання в'язкості відбувається при градієнті швидкості зсуву до 10 c^{-1} . При збільшенні значень швидкості зсуву в'язкість спадає уповільнено. Руйнування структури відбувається при швидкості зсуву 50 c^{-1} . Вид овочевого пюре майже не впливає на значення в'язкості. В'язкість контрольного зразку після заморожування при швидкості зсуву 5 c^{-1} на 50% вище, ніж для свіжого фаршу. Для зраз-

ків з додаванням овочевого пюре всіх типів заморожування практично не впливає на значення в'язкості.



Напруження зсуву: 1, 2 – контрольного свіжого зразку та після заморожування; 3, 4 – молочно - морквяного свіжого фаршу та після заморожування; ефективна в'язкість: 5, 6 – контрольного зразку після заморожування та свіжого; 7, 8 - молочно - морквяного свіжого фаршу та після заморожування;

Рисунок 5.3 - Криві зміни в'язкості та напруження зсуву

Додавання овочевих пюре знижує значення напруження зсуву для всіх зразків у порівнянні з контрольним зразком, але вид овочевого пюре незначно впливає на коливання величини напруження зсуву. Заморожування також незначно знижує значення напруження зсуву незалежно від виду пюре.

Обробка результатів експерименту дозволила отримати залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву:

$$\eta_{E\Phi} = a + b\dot{\gamma} + cd^{\dot{\gamma}}, \quad (5.9)$$

де $\eta_{E\Phi}$ - ефективна в'язкість; $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву;
 a, b, c, d - емпіричні коефіцієнти.

Аналіз різноманітних законів, що враховують умови при обробці результатів вимірювань, довів що змінення напруження зсуву всіх зразків, які досліджувалися описується законом Бінгама:

$$\theta = \theta_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}, \quad (5.10)$$

де η - пластична в'язкість (Па·с); $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву, с^{-1} ; θ_0 - границя текучості (Па).

Залежності змінення напруження зсуву та ефективної в'язкості від швидкості зсуву для всіх зразків наведені у таблиці 5.9.

Результати досліджень свідчать, що додавання овочевих пюре до молочно – білкового концентрату зі сколотин призводить до змін структурного стану фаршів, змінюючи кількісні значення ефективної в'язкості та напруження зсуву та поліпшуючи структуру суміші.

Дослідниками встановлено, що збільшення вмісту цукру, а також концентрації жиру веде до підвищення в'язкості суміші мороженого. Але збільшення жирових часток, а внаслідок чого, зменшення їх загальної кількості сприяє зниженню в'язкості мороженого. Суміші для мороженого проявляють незначну аномалію в'язкості – зі збільшенням градієнту швидкості вона незначно понижується. При додатних температурах сумішам для мороженого притаманні малі значення граничного напруження зсуву. В'язкість сумішей для приготування мороженого можна розраховувати за формулою [14]:

$$B_0^* = f_1(B_{PP}^*(\dot{\gamma}=729), T) f_2(\dot{\gamma}), \quad (5.11)$$

де f_1, f_2 - відповідно функції параметрів зведення та градієнту швидкості.

Для сумішей для мороженого значення функцій визначаються за формулами:

$$f_1 = (B_{PP}^*(\dot{\gamma}=729), T/T_{PP}) e^{0,017-0,048\Delta T-0,0003\Delta T^2}, \quad (5.12)$$

$$f_2 = 1,631 - 0,096 \ln \dot{\gamma} \quad , \quad (5.13)$$

Таблиця 5.9 - Залежності змінення напруження зсуву та ефективної в'язкості від швидкості зсуву

Тип зразку		Закони течії	R^2	Закони змінення ефективної в'язкості від швидкості зсуву	R^2
Контрольний зразок	Свіжий	$\theta = 592,52 + 11,77\dot{\gamma}$	0,93	$\eta_{E\Phi} = 40,09 - 0,76\dot{\gamma} + 1533 \cdot 0,37\dot{\gamma}$	0,99
	Після заморожування	$\theta = 497,67 + 11,70\dot{\gamma}$	0,97	$\eta_{E\Phi} = 18,28 + 13,72\dot{\gamma} + 347 \cdot 0,09\dot{\gamma}$	0,96
Молочно – гарбузовий фарш	Свіжий	$\theta = 402,56 + 10,76\dot{\gamma}$	0,96	$\eta_{E\Phi} = 30,62 - 0,52\dot{\gamma} + 909 \cdot 0,42\dot{\gamma}$	0,99
	Після заморожування	$\theta = 323,51 + 10,85\dot{\gamma}$	0,97	$\eta_{E\Phi} = 30,65 - 0,54\dot{\gamma} + 576 \cdot 0,49\dot{\gamma}$	0,99
	Після заморожування	$\theta = 497,67 + 11,70\dot{\gamma}$	0,97	$\eta_{E\Phi} = 18,28 + 13,72\dot{\gamma} + 347 \cdot 0,09\dot{\gamma}$	0,96
Молочно – кабачковий фарш	Свіжий	$\theta = 564,10 + 5,01\dot{\gamma}$	0,92	$\eta_{E\Phi} = 65,11 - 1,19\dot{\gamma} + 1087 \cdot 0,53\dot{\gamma}$	0,99
	Після заморожування	$\theta = 533,36 + 4,77\dot{\gamma}$	0,92	$\eta_{E\Phi} = 63,72 - 1,17\dot{\gamma} + 971 \cdot 0,54\dot{\gamma}$	0,99
	Після заморожування	$\theta = 497,67 + 11,70\dot{\gamma}$	0,97	$\eta_{E\Phi} = 18,28 + 13,72\dot{\gamma} + 347 \cdot 0,09\dot{\gamma}$	0,96
Молочно – морквяний фарш	Свіжий	$\theta = 456,86 + 5,75\dot{\gamma}$	0,93	$\eta_{E\Phi} = 69,59 - 1,35\dot{\gamma} + 992 \cdot 0,57\dot{\gamma}$	0,99
	Після заморожування	$\theta = 405,81 + 6,01\dot{\gamma}$	0,95	$\eta_{E\Phi} = 69,80 - 1,41\dot{\gamma} + 915 \cdot 0,61\dot{\gamma}$	0,99

Значення в'язкості при $\dot{\gamma} = 729 \text{ c}^{-1}$ та $T_{IP} = 288 \text{ K}$ наведені у таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Значення в'язкості сумішей мороженого

Вид мороженого	$B_{ПР}^* \cdot 10^3$	Вид мороженого	$B_{ПР}^* \cdot 10^3$
Вершкове	26,0	Пломбір вершковий	43,4
Вершкове крем - брюле	24,4	Пломбір кофейний	45,6
Молочне шоколадне	26,8	Пломбір крем - брюле	46,5
Молочне	14,5	Пломбір шоколадний	64,7
Пломбір суничний	52,5		

Питання для самоконтролю

1. Які складові має в'язкість молочних продуктів?
2. Як впливає температура на в'язкість молока?
3. Які фактори впливають на в'язкість згущених молочних продуктів?
4. Як впливає температура на в'язкість кисломолочних продуктів?
5. Яким чином впливає додавання овочевих пюре до молочно – білкового концентрату зі сколотин на реологічні властивості молочно – рослинних фаршів?
6. Як впливають вмісту цукру та концентрація жиру на в'язкість суміші мороженого?

5.1.2 Характеристики зсуву твердообразних систем

Властивості зсуву твердообразних систем оцінюють головним образом граничним напруженням зсуву та показниками в'язкості.

Сублімовані молочні продукти потребують обводнення при різному співвідношенні продукту та води. Консистенцію продукту характеризували граничним напруженням зсуву, змінення величини якого у залежності від часу набухання наведені у таблиці 5.11.

Найкраща якість продукту досягається у період, коли волога рівномірно розподіляється по всьому об'єму, та значення граничного напруження зсуву стає максимальним.

Розроблена технологія нового сирного продукту на основі сухого знежиреного молока зі частковою його заміною на рослинний компонент – концентрат ядра арахісу та борошно кукурудзяне [36].

Були дослідженні контрольний зразок продукту, що не містить заміни, а також зразки зі заміною сухого знежиреного молока на концентрат ядра арахісу та борошно кукурудзяне 2,5; 5; 7,5; 10% та у співвідношенні рослинних компонентів, відповідно 3:1; 1:1; та 1:3.

Температура зразків - 8-12⁰С, та відносна вологість повітря 85-90%, дослідження проводили протягом 28 діб.

Таблиця 5.11 - Змінення величини граничного напруження зсуву (Па) у залежності від часу набухання сублімованих продуктів

Продукт	Ступінь розводження	Вологість, кг на 1 кг продукту	Вологовміст, кг на 1 кг сухої речовини	Час набухання продуктів, хв.					
				5	15	45	75	135	195
Пудинг з кислого сиру	1:1,5	0,61	1,56	54,1	56,4	58,4	63,6	59,6	58,9
	1:1	0,52	1,08	452	494	515	674,4	614,6	515
Пудинг вишневий	1:2	0,68	2,12	90,4	81,2	93,6	93,8	93,8	94,5
Кислий сир з горіхами	1:1	0,52	1,08	87,1	97,2	116,5	118,8	116,5	114,2

На рисунках 5.4 – 5.6 побудовано залежність граничного напруження зсуву зразків продукту від тривалості їх зберігання $\theta_0 = f(t)$.

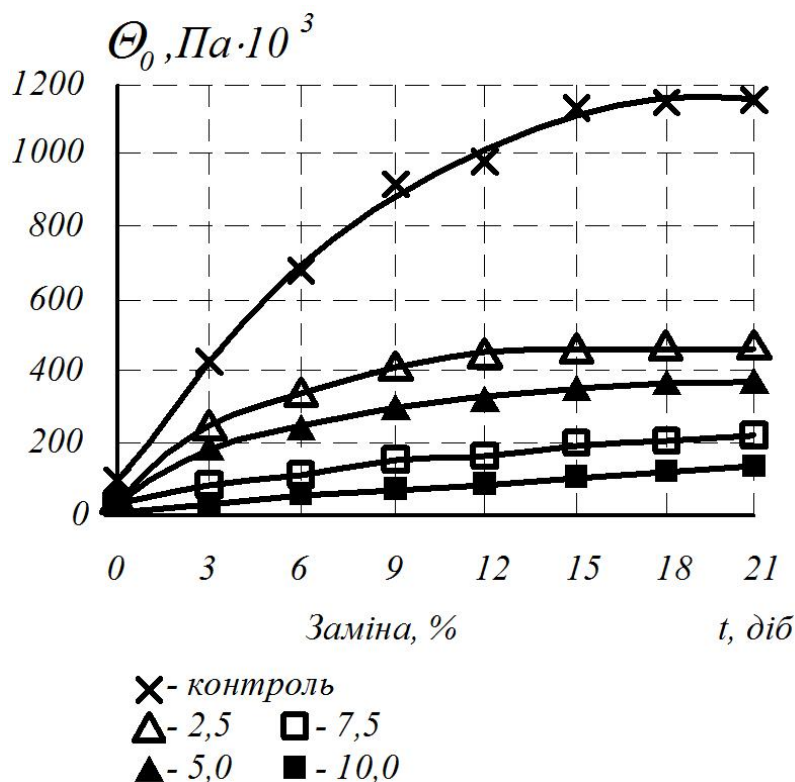


Рисунок 5.4 – Залежність граничного напруження зсуву сирного продукту із концентратом ядра арахісу від тривалості зберігання

Рисунки 5.4 – 5.6 свідчать, що граничне напруження зсуву сві-

жовиготовлених зразків майже однакова, незалежно від вмісту рецептурних компонентів; упродовж зберігання зразків продукту граничне напруження зсуву підвищується.

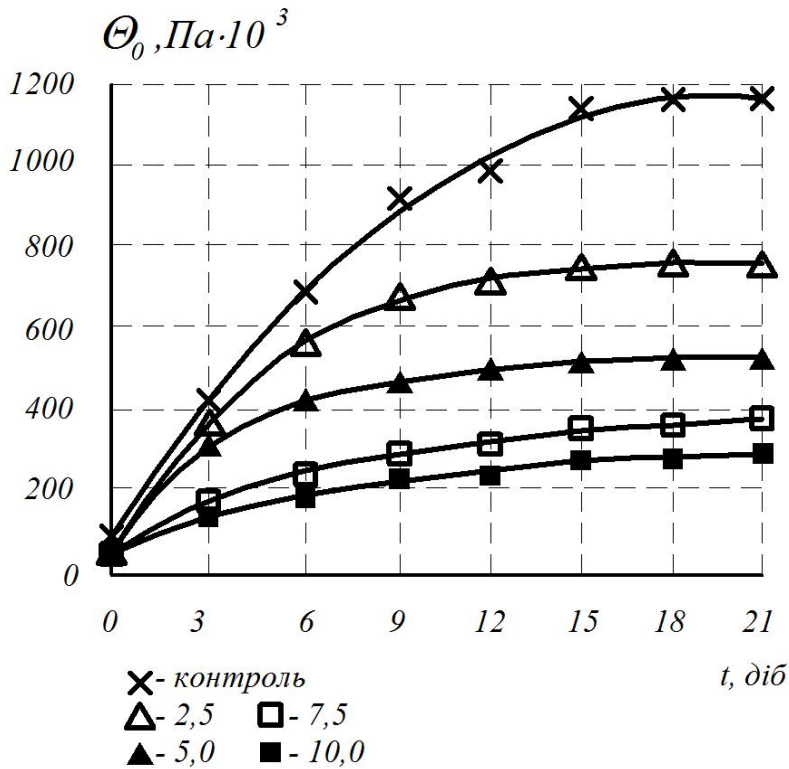


Рисунок 5.5 – Залежність граничного напруження зсуву сирного продукту із борошном кукурудзяним від тривалості зберігання

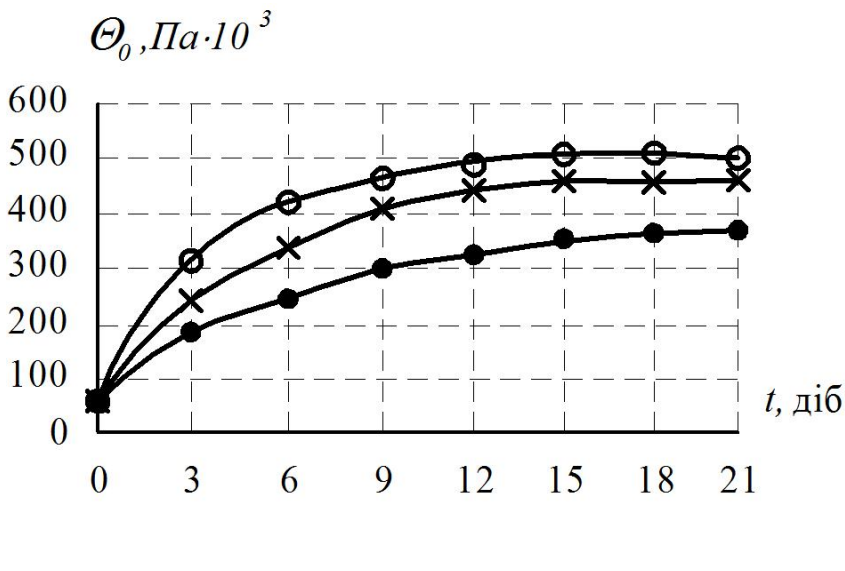


Рисунок 5.6 – Залежність граничного напруження зсуву сирного продукту від тривалості зберігання відносно вмісту рослинних компонентів у разі заміни молока 5%:
 x - концентрат і борошно 1:1;
 ○ - борошно;
 ● - концентрат

Суттєве збільшення опірності продукту відбувається протягом перших 12-15 діб. Такий характер зміни свідчить про ущільнення структури, а також зміцнення просторового каркасу внаслідок взаємодії рецептурних компонентів. Максимальне граничне напруження зсуву притаманне контрольному зразку.

Введення рослинних компонентів знижує граничне напруження зсуву відносно контролю. Підвищення їх вмісту призводить до зниження граничного напруження зсуву зі зберіганням тенденції до її підвищення впродовж строку дослідження. Зі збільшенням дозування рослинних компонентів упродовж дозрівання значення граничного напруження зсуву знижується. Це свідчить про те, що введення цих компонентів обумовлює високі пластичні властивості продукту.

Визначено раціональну заміну знежиреного сухого молока на рослинний компонент, яка не повинна перевищувати 5%; співвідношення концентрату ядра арахісу та борошна кукурудзяного один до одного дає можливість удосконалити характеристики цього продукту.

Дослідження граничного напруження зсуву напівфабрикату сирного кисломолочного (НСК) з використанням ядра соняшникового насіння проводили порівняно з продуктом - аналогом – сиром кисломолочним з масовою часткою жиру 0,5-15% [37].

Як видно з рисунку 5.7, вологість зразків сиру кисломолочного має рішучий вплив на значення граничного напруження зсуву; з підвищенням масової частки жиру, міцність структури збільшується.

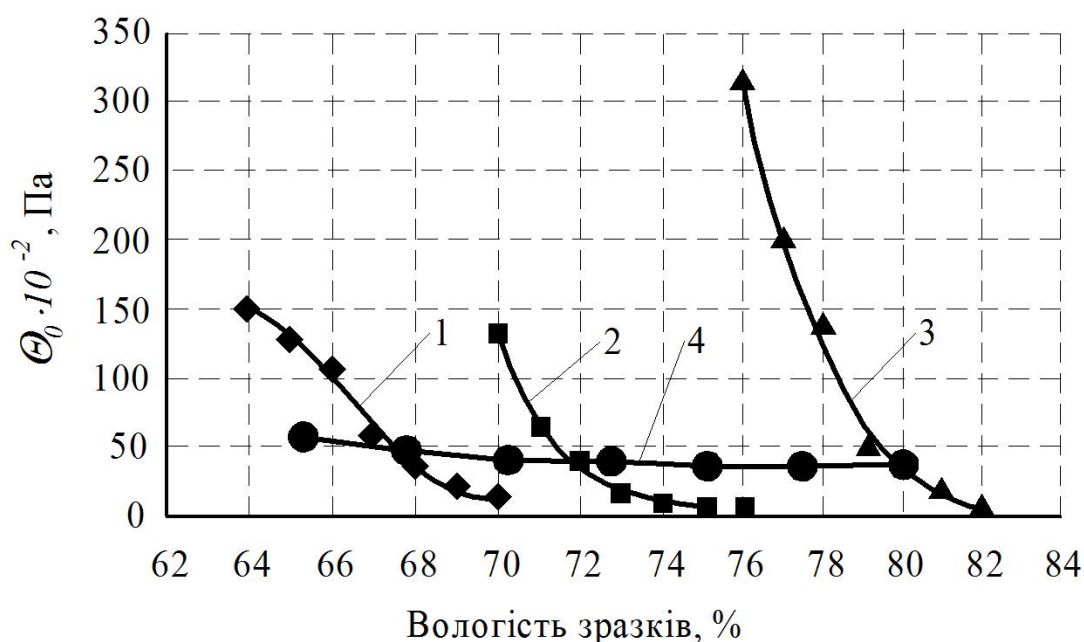


Рисунок 5.7 – Залежність граничного напруження зсуву зразків сиру кисломолочного з масовою часткою жиру:

1 – 15%; 2 – 9%; 3 – 0,6% та розробленого НСК від їх вологості

Змінення масової частки вологи досліджуваних зразків викликає істотну зміну значень граничного напруження зсуву. Структура зраз-

ків сиру кисломолочного з масовою часткою жиру 0,6; 9,0 та 15% змінюється від дуже м'якої до м'якої, що розмашується. Окрім того, в інтервалі вологості 76-77% структура зразків набуває пластичності.

Згідно з органолептичними дослідженнями раціональною концентрацією білково-жирової емульсії на основі ядра соняшникового насіння у напівфабрикаті обрано 15%.

Для розрахунку ефективної в'язкості жирного кислого сиру та солодких мас з кислого сиру використовують формулу $\eta_{E\Phi} = B(w/w_1)^{-m} = Bw_*^{-m}$. Реологічні характеристики мас з кислого сиру різного хімічного складу наведені у таблиці 5.12 [13].

Таблиця 5.12 – Реологічні характеристики жирного кислого сиру та солодких мас з кислого жиру

Продукт	Абсолютний вміст основних хімічних компонентів				Реологічні характеристики			
	білків	жиру	вологи	цукрози	θ_0 , Па	η , Па·с	Коефіцієнти рівняння	
							B	m
Кислий сир жирний	0,179	0,250	1,840	0	263,0	30	5,7	0,62
Маси з кислого сиру з цукром	0,079	0,333	0,484	0,541	64,2	7	1,2	0,58
	0,079	0,351	0,484	0,541	73,0	21	2,4	0,59
	0,110	0,282	0,725	0,541	93,4	15	2,9	0,59
	0,105	0,316	0,730	0,541	102,0	25	1,5	0,61
	0,101	0,220	0,811	0,541	58,	10	2,2	0,60
	0,064	0,282	0,725	0,541	87,5	30	1,3	0,58

Проводили дослідження властивостей зсуву розплавленої сирної маси різної жирності. У таблиці 5.13 наведені значення граничного напруження зсуву та пластичної в'язкості розплавленої маси з кислого сиру.

Таблиця 5.13 - Гранична напруга зсуву та пластична в'язкість розплавленої сирної маси

Температура сиру, °С	θ_0 (Па) для сиру з вмістом жиру в сухої речовині, кг/кг			Температура сиру, °С	η (Па·с) для сиру з вмістом жиру в сухої речовині, кг/кг		
	0,30	0,55	0,60		0,30	0,55	0,60
50	430	335	1,44	50	46,0	20,0	18,0
60	300	238	0,58	60	29,0	9,1	5,0
70	240	162	0,31	70	20,2	5,6	2,0
80	175	118	0,17	80	13,6	3,5	1,1
90	135	88	0,12	90	8,9	2,0	0,8

Узагальнене рівняння для розрахунку ефективної в'язкості розплавленої сирної маси має вигляд $\eta_{E\Phi} = Ae^{E/RT} (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_1)^{-m}$. Коефіцієнти рівняння наведені у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 – Значення коефіцієнтів до рівняння $\eta_{E\Phi} = Ae^{E/RT} (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_1)^{-m}$ для плавлених сирів

Плавлений сир	Коефіцієнти			Границі змінення температури $^{\circ}\text{C}$
	A , Па·с	E , Дж/моль	m	
«Новий»	$1,3 \cdot 10^{-3}$	31900	0,36	50-95
«Янтар»	$7,7 \cdot 10^{-10}$	66000	0,26	50-95
«Дружба»	$2,6 \cdot 10^{-6}$	43300	0,67	60-95

У результаті досліджень на віскозиметрі «Реотест» 15 видів плавлених сирів доведено, що всі вони у границях температур від 20 до 80 $^{\circ}\text{C}$ та швидкості зсуву від 0,167 до 437 c^{-1} мають єдину температурно – інваріантну характеристику

напружень зсуву. В указаній області значення безрозмірної в'язкості та безрозмірного напруження зсуву можуть бути визначені за наступними залежностями [14]:

$$\eta_{E\Phi}/\eta_{\dot{\gamma}=0,5} = 0,644e^{-0,65 \ln \dot{\gamma}}, \quad (5.14)$$

$$\theta/\theta_{\dot{\gamma}=0,5} = 1,35e^{0,39 \ln \dot{\gamma}}, \quad (5.15)$$

де $\eta_{E\Phi}$ і θ - відповідно ефективна в'язкість сиру, Па·с, та напруження зсуву, Па; $\eta_{\dot{\gamma}=0,5}$ і $\theta_{\dot{\gamma}=0,5}$ - масштабні значення в'язкості, Па·с, та напруження зсуву, Па, знайдені при швидкості зсуву 0,5 c^{-1} .

Вивчались реологічні характеристики нових плавлених сирів пікантної групи з застосуванням реогоніометру Вайссенберга моделі R-19 (Великобританія) [13]. Об'єктом дослідження були існуючі плавлені сири “Дружба” – контроль 1 і “Шоколадний” – контроль 2 та розроблені нові плавлені сири оздоровчого призначення на основі кисломолочного сиру з використанням кропу, органічного білково-йодного комплексу - йодказеїну, сухих натуральних грибів, пекарських дріжджів, еламіну, цикорлакту, зародків пшениці та лецитину: “Цілюща сила” з кропом, збагачений йодом, “Цілюща сила” з грибами, збагачений мінералами, “Цілюща сила” з біокоректорами та соло-

дкої групи: “Інтелект” цикорний, збагачений йодом, “Інтелект” цикорно-полівітамінний та “Інтелект” цикорно-шоколадний, збагачений йодом. Вивчали вплив на реологічні властивості нових продуктів часткової, технологічно можливої заміни сичугових сирів кисломолочних без використання стабілізаторів структури, а також вплив смакових та біологічно активних добавок. Реологічні параметри пікантних та солодких плавлених сирів наведені у таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 - Реологічні параметри сирів

Частота деформування, Гц	Найменування сирів	Комплексний модуль зсуву G^* , Па	Комплексна в'язкість η^* , Па с	Найменування сирів	Комплексний модуль зсуву G^* , Па	Комплексна в'язкість η^* , Па с
0,316	Контроль 1	10817,9	5448,5	Контроль 2	2803,4	1411,8
1,0		12714,6	2023,6		3911,3	622,5
3,16		15554,0	783,4		5448,0	274,4
6,28		18217,4	461,7		6829,8	173,1
10,0		20027,5	318,7		8172,7	130,1
0,316	“Цілюща сила” з кропом, збагачений йодом	3077,1	600,2	“Інтелект” цикорний, збагачений йодом	3484,0	1754,7
1,0		4906,0	371,2		4517,4	719,0
3,16		7150,2	223,9		5985,7	301,5
6,28		8721,2	152,5		7347,3	186,2
10,0		1035,1	109,2		8765,3	139,5
0,316	“Цілюща сила” з грибами, збагачений мінералами	6378,8	3212,7	“Інтелект” цикорно-полівітамінний	2989,3	1392,4
1,0		7733,8	1230,9		4099,1	613,2
3,16		10141,4	510,8		5492,0	273,9
6,28		12052,9	305,5		6551,7	165,1
10,0		14542,2	231,4		7422,1	119,7
0,316	“Цілюща сила” з біокоректорами	3390,7	1707,8	“Інтелект” цикорно-шоколадний, збагачений йодом	2787,8	1404,0
1,0		5036,1	8015,0		3605,1	573,8
3,16		7306,9	3680,2		4589,7	231,3
6,28		9189,6	2329,1		5599,7	141,9
10,0		11050,2	1759,1		6487,8	103,3

Порівняльний аналіз отриманих даних показав, що всі зразки плавлених сирів пікантної групи володіють в'язко-пружними властивостями. Встановлено, що найбільш щільною і зв'язною консистенцією характеризується контрольний плавлений сир “Дружба”, пружний компонент комплексного модуля зсуву якого значно вищий (в середньому близько в 3,5 рази) у порівнянні з дослідними зразками.

Найменш щільну, більш ніжну консистенцію має плавлений сир “Цілюща сила” з кропом, збагачений йодом. Комплексний модуль зсуву плавленого сиру “Цілюща сила” з біокоректорами дуже близький до першого, а сир “Цілюща сила” з грибами, збагачений мінералами, за величиною комплексного модуля зсуву займає проміжне положення між контрольним зразком і плавленим сиром “Цілюща сила” з біокоректорами. Плавлений сир “Цілюща сила” з грибами, має більш щільну, тверду структуру і консистенцію, ніж плавлений сир “Цілюща сила” з біокоректорами. Більш міцний характер структури плавленого сиру “Цілюща сила” з грибами можна пояснити наявністю у складі цього продукту еламіну, який в деякій мірі проявляє вологозв’язуючі властивості. За характером реологічних властивостей всі плавлені сири пікантної групи можна віднести до плавлених сирів з перехідною (між скибковою та пастоподібною) консистенцією.

Аналізуючи результати досліджень плавлених сирів солодкої групи можна відмітити, що найбільш різку відмінність за консистенцією має плавлений сир “Інтелект” збагачений йодом. За характером реологічної поведінки він має найменшу щільність, більш ніжну та пластичну консистенцію. Найбільшою щільністю та пружністю характеризується плавлений сир “Цикорний” збагачений йодом, що обумовлено найбільш оптимальним співвідношенням у складі рецептури сичугових сирів та кисломолочного сиру, а також вищою, порівняно з рештою дослідних зразків, кількістю цикорлакту.

До складу цикорлакту входить значна частина сухого молока, яке виступає емульгатором та стабілізатором структури. Контрольний плавлений сир та цикорно-полівітамінний сир “Інтелект” займають за консистенцією проміжне положення.

Результати проведених досліджень реологічних властивостей нових плавлених сирів, дозволяють зробити висновок, що вони мають практично однакові за ступенем виявлення пластичні та пружно-в’язкісні властивості. Типовий характер реологічної поведінки при зсувному деформуванні плавлених сирів з добавками і контрольних зразків, свідчить про незначний вплив добавок на процеси структуроутворення нових плавлених сирів.

Властивості зсуву гелів доцільно визначати з використанням прибору Вейлера – Ребіндера, формуючі гель безпосередньо у зазорі між плоско паралельними пластинами прибору.

Визначаються наступні реологічні характеристики:
модуль умовно – миттєвої пружності (Па)

$$G_1 = \theta / \gamma_0 ; \quad (5.16)$$

еластичний модуль пружності (Па)

$$G_2 = \theta / (\gamma_m - \gamma_0) ; \quad (5.17)$$

рівноважний модуль (Па)

$$G_3 = \theta / \gamma_m ; \quad (5.18)$$

границя текучості (пружності) (Па) θ_{K_1} ;

в'язкість істинної течії (Па·с)

$$\eta_1 = (\theta - \theta_{K_1}) / \dot{\gamma}_{\min} ; \quad (5.19)$$

в'язкість пружної післядії (Па·с)

$$\eta_1 = \theta / (\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min}) ; \quad (5.20)$$

період істинної пружної релаксації (с)

$$t_1 = \eta_1 / G_1 ; \quad (5.21)$$

період еластичної релаксації (с)

$$t_2 = \eta_2 / G_2 . \quad (5.22)$$

У залежностях (5.16– 5.22) прийняті позначення: θ - напруження зсуву; γ_0 - умовно – миттєва відносна деформація за 1 с; γ_m - оборотна складова загальної деформації γ , $\gamma_m = \gamma - \gamma_{зал}$, де $\gamma_{зал}$ - залишкова деформація; $\dot{\gamma}_{\max}$ - швидкість зсуву в момент часу 1 с (після умовно – миттєвої деформації); $\dot{\gamma}_{\min}$ - швидкість зсуву в момент початку необоротної течії сирної маси.

Роботи дослідників показали, що для оцінки споживчих і технологічних властивостей м'яких сирів доцільно використовувати реологічні показники: коефіцієнт пенетрації, гранична напруга зрізу, робота різання, щільність, відносний об'єм, коефіцієнт стискальності, мо-

дуль об'ємного стиску (модуль об'ємної пружності) [13, 14, 31].

Досліджувалися зразки сиру, виготовлені з використанням технології високого тиску, та контрольні зразки м'якого сиру «Здоров'я», виробленого за традиційною технологією. Обробку м'якого сиру високим тиском робили на установці високого тиску в лабораторії «Використання високого тиску у харчових виробництвах» ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського [23]. Параметри процесу обробки ВТ - тиск: 400, 500 і 600 МПа; тривалість обробки: 10×60с, 20×60с, 30×60с; температура процесу прийнята постійною і дорівнює температурі продукту в момент завершення його самопресування: + 20⁰С.

Дослідження показників «коефіцієнт пенетрації», «гранична напруга зрізу» і «робота різання» були виконані на Електромеханічній універсальній випробувальній машині SANS CMT2503 виробництва "Shenzhen SANS Testing Co. Ltd." Вимірювання на цьому приладі базуються на принципі зрізання зразків продукту з прикладенням зусиль з постійною швидкістю 20 мм/хв. Для визначення зусиль зрізання зразки сиру визначеної форми розміщали на нерухомій рамі та центрували відносно ножа. Напруження зрізання визначали за формулою:

$$Q = P/F, \text{ Н/м}^2,$$

де: P – зусилля різання, Н; F – площа зрізу, м².

У таблиці 5.16 наведені показники м'якого сиру «Здоров'я».

Таблиця 5.16 - Значення показників «коефіцієнт пенетрації», «гранична напруга зрізу», «робота різання» досліджуваних зразків м'якого сиру

Значення показників	Контрольний зразок	P = 300 МПа			P = 450 МПа			P = 600 МПа		
		$\tau = 10 \cdot 60\text{с}$	$\tau = 20 \cdot 60\text{с}$	$\tau = 30 \cdot 60\text{с}$	$\tau = 10 \cdot 60\text{с}$	$\tau = 20 \cdot 60\text{с}$	$\tau = 30 \cdot 60\text{с}$	$\tau = 10 \cdot 60\text{с}$	$\tau = 20 \cdot 60\text{с}$	$\tau = 30 \cdot 60\text{с}$
Коефіцієнт пенетрації, кН/м ²	21,67	18,54	17,83	16,45	14,09	15,84	14,55	14,73	13,28	12,18
Граничне напруження зрізу, кН/м ²	35,67	33,42	32,05	31,48	31,98	29,94	29,11	30,01	28,82	27,12
Робота різання, Дж	285,8	205,0	192,1	160,9	184,4	171,2	159,9	172,1	154,6	149,1

Аналіз динаміки зміни показників показав (рисунки 5.7 – 5.9), що значення «коефіцієнт penetрації» і «робота різання» відрізняються від значень даних параметрів у контрольному зразку та істотно залежать від величини тиску в процесі обробки.

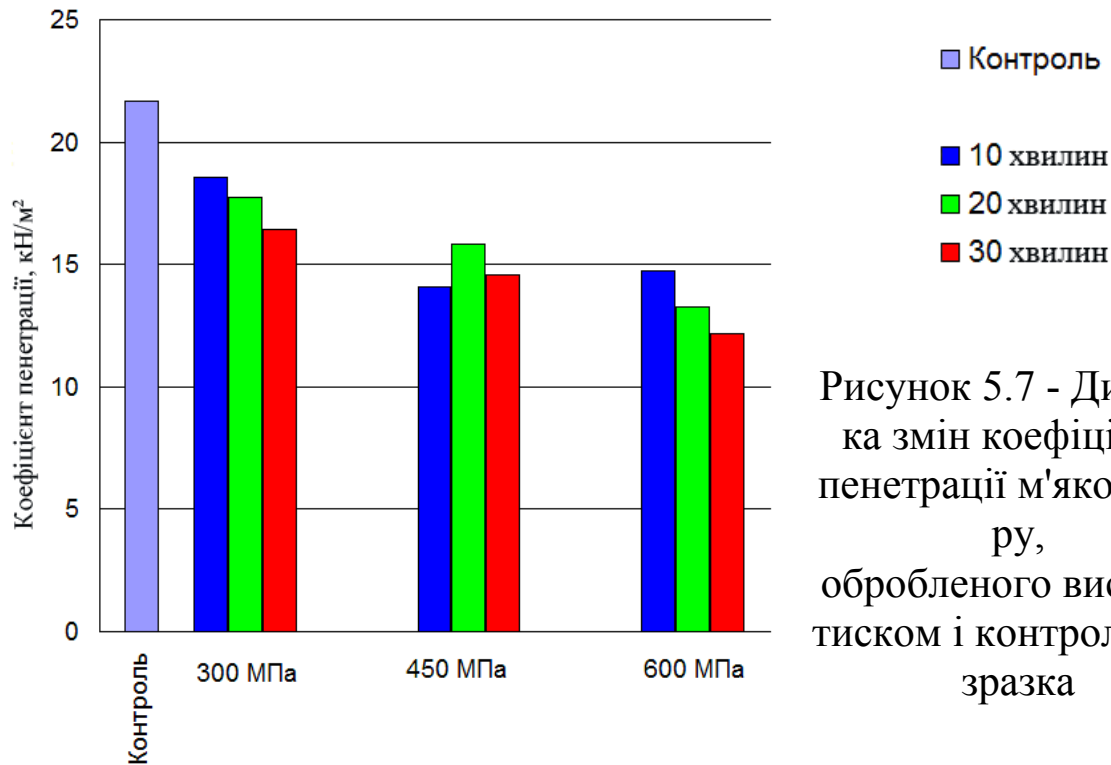


Рисунок 5.7 - Динаміка змін коефіцієнта penetрації м'якого сиру, обробленого високим тиском і контрольного зразка

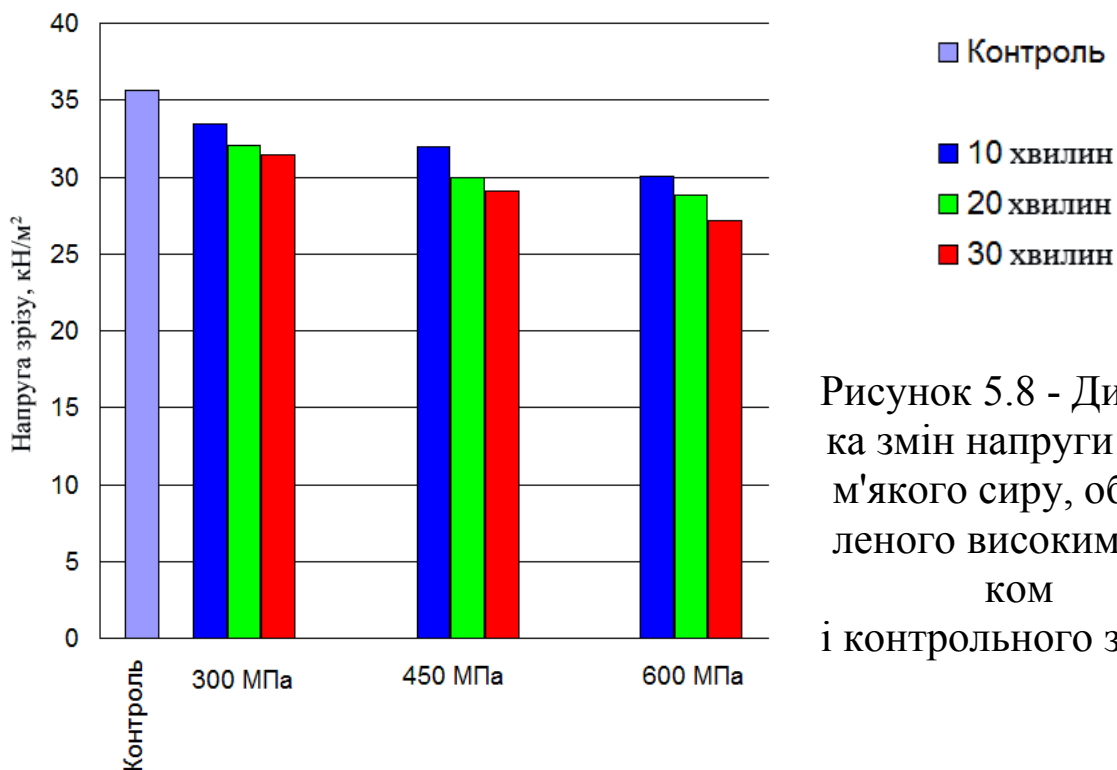


Рисунок 5.8 - Динаміка змін напруги зрізу м'якого сиру, обробленого високим тиском і контрольного зразка

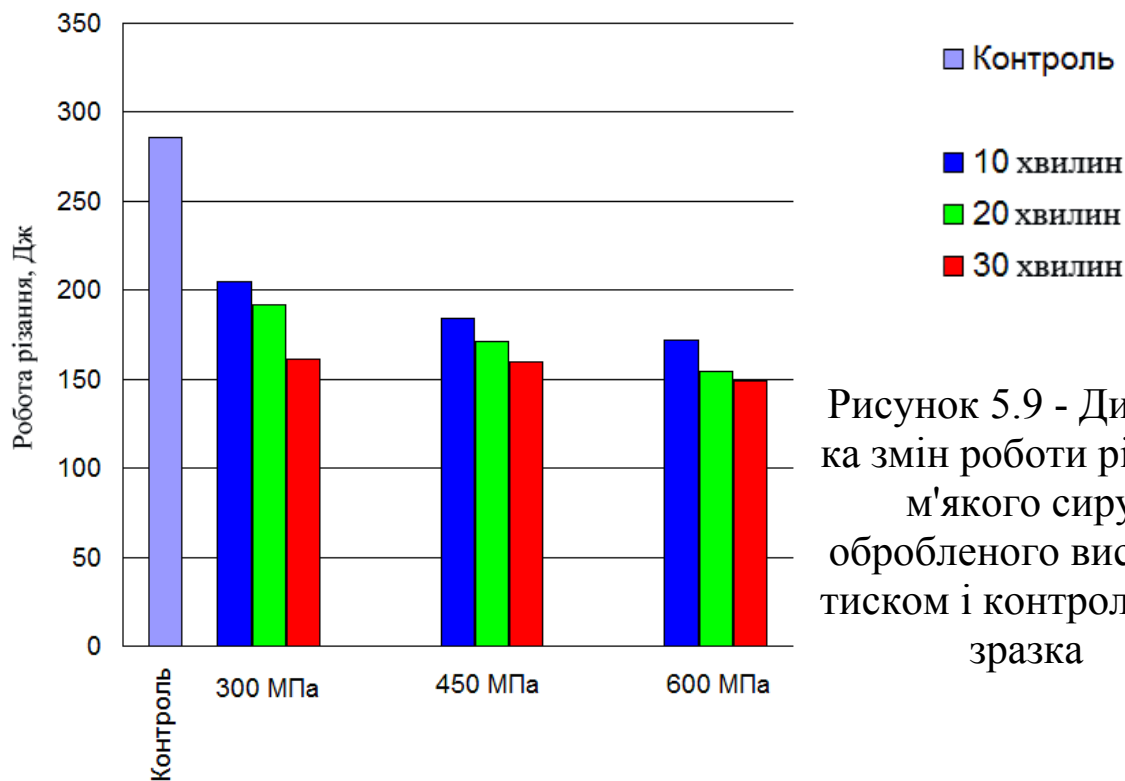


Рисунок 5.9 - Динаміка змін роботи різання м'якого сиру, обробленого високим тиском і контрольного зразка

Значення граничного напруження зрізу менш піддається впливу параметрів процесу обробки й стосовно контрольного зразка змінюється не так істотно. У таблиці 5.17 наведені основні реологічні характеристики сирів, які визначені по кінетичним кривим розвитку деформації зсуву під постійним навантаженням та наступного спаду деформації після зняття навантаження, які отримані з використанням прибору Толстого з подвійним плоскопаралельним зазором [14].

У таблиці 5.18 наведені наступні реодинамічні характеристики сирів, отримані на реогоніометрі Вайссенберга. Модуль пружності G' , який характеризує енергію, що запасується та віддається матеріалом у кожному циклі коливань, $G' = (\theta_0/\gamma_0)\cos\delta$. Модуль утрат G'' - який характеризує ту частину опору деформування, яка у кожному циклі коливань переходить у тепло, $G'' = (\theta_0/\gamma_0)\sin\delta$.

По цим характеристикам розраховуються динамічна в'язкість $\eta' = G''/\omega$ (де ω - кругова частота коливань), час релаксації напружень при даній частоті коливань $\tau_\omega = 2G'/G''\omega$, а також тангенс кута механічних втрат $\tan\delta = G''/G'$. Тангенс куту механічних втрат характеризує степінь твердообразності матеріалу: для пружного тіла $\tan\delta = 0$, а для в'язкої рідини $\tan\delta \rightarrow \infty$.

Таблиця 5.17 – Реологічні характеристики натуральних та плав-
лених сирів

Найменування сиру та його фізико – хі- мічні показники	$\sigma_1 \cdot 10^{-4}$	$\sigma_2 \cdot 10^{-4}$	$\sigma_3 \cdot 10^{-4}$	$\eta_1 \cdot 10^{-7}$	$\eta_2 \cdot 10^{-6}$	τ_1	τ_2
	Па			Па·с		с	
Пошехонський (СР=0,578; рН 5,25; $c=0,027$; 18 ⁰ С)	9,34	7,84	4,19	9,42	4,16	1035	59
Пікантний (СР=0,588; рН 5,25; $c=0,028$; 16 ⁰ С)	14,50	12,72	6,16	17,26	10,15	1229	76
Латвійський (СР=0,528; рН 5,35; $c=0,028$; 18 ⁰ С)	8,88	5,47	3,32	4,95	4,48	599	43
Чеддер (СР=0,73; рН 5,6; $c=0,018$; 17 ⁰ С)	9,37	12,36	5,03	7,06	5,51	788	48
Ковбасний плавле- ний (СР=0,51; рН 5,7; $c=0,007$; 17 ⁰ С)	5,31	3,47	2,07	3,03	3,03	566	86
Костромський пла- влений (СР=0,514; рН 5,75; $c=0,018$; 20 ⁰ С)	3,70	2,51	1,37	0,69	0,16	188	79
Городський плав- лений (СР=0,462; рН 5,7; $c=0,013$; 21 ⁰ С)	1,47	1,71	0,70	0,10	0,08	65	72

Примітка. СР – сухі речовини; c – вміст хлориду натрію, кг на 1 кг продукту.

Реодинамічні характеристики залежать від частоти змушених коливань. У діапазоні частот від 0,05 до 25 Гц ця залежність описується рівнянням [14]:

$$\lg Y = a_1 + a_2 \lg X, \quad (5.23)$$

де Y - реодинамічний показник (G' , G'' , η'), Па або Па·с відповідно
 X - частота, Гц; a_1 та a_2 - константи, які залежать від хімічного складу продукту.

Рівняння регресії, які рекомендовано для визначення цих кон-
тант наведені у таблиці 5.19.

Таблиця 5.18 - Реодинамічні характеристики сирів

Найменування та характеристика сирів	Температура °С	Комплексний модуль зсуву $G^* \cdot 10^{-3}$, Па	Модуль пружності $G' \cdot 10^{-3}$, Па	Модуль втрат $G'' \cdot 10^{-3}$, Па	Комплексна в'язкість $\eta^* \cdot 10^{-3}$, Па·с	Динамічна в'язкість $\eta' \cdot 10^{-3}$, Па·с
Пошехонський (СР=0,57; рН 5,4)	18	87,9	84,7	23,9	140,0	38,0
Пікантний (СР=0,656; рН 5,3)	18	74,6	71,4	21,9	118,7	34,8
Чеддер (СР=0,659; рН 5,11)	20	99,8	96,1	27,0	158,9	43,0
Російський (СР=0,60; рН 5,25)	18	108,6	103,0	33,9	172,7	54,1
Костромський (СР=0,588; рН 5,1)	18	88,9	84,9	26,0	141,3	41,3
Швейцарський (СР=0,612; рН 5,6)	16	54,5	51,5	18,0	86,8	28,6

Таблиця 5.19 – Залежність параметрів a_1 і a_2 від основних фізико – хімічних показників сирів

Реологічна характеристика	Рівняння множинної регресії параметрів a_1 і a_2 по вмісту вологи W (кг/кг), жиру $Ж$ (кг/кг), солі c (кг/кг) та величини рН	Відносне відхилення розрахункових параметрів від експериментальних, %
Модуль пружності G'	$4,99 - 1,1W + 0,8Ж + 14,0c$ $0,041 + 0,4W - 0,04Ж - 0,0013pH - 0,8c$	3,0 10,0
Модуль утрат G''	$4,96 - 1,3W + 0,13Ж - 0,025pH + 9,6c$ $0,16 + 0,27W + 0,2Ж - 0,009pH - 1,1c$	1,5 14,9
Динамічна в'язкість η'	$4,15 - 1,25W + 0,12Ж - 0,024pH + 9,7c$ $- 0,86 + 0,27W - 0,20Ж - 0,0043pH - 1,2c$	1,7 2,8

Рівняння отримані для умов: температура 18⁰С; $0,30 \leq W \leq 0,51$; $0,23 \leq Ж \leq 0,51$; $4,9 \leq pH \leq 6,5$; $0,003 \leq c \leq 0,040$; жир віднесений до маси сухих речовин. Верхній рядок – значення a_1 , нижній - a_2 .

При дослідженні характеристик зсуву сирів використовують також інші реологічні методи, які більш швидкодіючі, і тому застосовані для масових вимірювань та контролю виробництва. З таких експрес – методів найбільше застосування отримали методи пенетрації та реологічного зондування.

Пенетрацію здійснюють з використанням напівавтоматичних пенетрометрів «Лабор» або AP4/1. Вимірюють у показниках пенетрації (1 одиниця пенетрації дорівнює $1 \cdot 10^{-4}$ м) глибину занурення у продукт конусного (кут конусу 30°) або кульового (діаметр 0,0127 м) індикаторів під дією корисної маси рухомої частини прибору, яка дорівнює відповідно 0,15 та 0,4 кг, за 5 с. За величиною показника пенетрації конусом знаходять пенетраційну твердість продукту, користуючись формулою Ребіндера для визначення граничної напруги зсуву:

$$\theta_0 = K_a gM / h_{\max}^2 = KM / h_{\max}^2, \quad (5.24)$$

де M - маса навантаження, яке діє на конус (за відніманням величини, яка компенсує тертя та опір пружини індикатору); K_a - константа конусу, яка залежить від куту при його вершині α (град):

$$K_a = (1/\pi) \cos^2(\alpha/2) \operatorname{ctg}(\alpha/2). \quad (5.25)$$

Величина пенетраційної твердості тісно корелює (0,8-0,9) з граничним напруженням зсуву сиру θ_0 , визначеним методом конічного шарометру.

Таблиця 5.20 - Пенетраційна твердість костромського сиру (Па) при різних температурах

Температура сиру $^{\circ}\text{C}$	Обезжирений сир	Сир жирністю 0,45 кг жиру на 1 кг сухої речовини (45%)
15	6,8	2,8
20	6,4	2,2
25	4,4	1,5
30	3,1	0,9
35	1,8	0,6

Показники, які характеризують пенетраційну твердість сиру при різних температурах, наведені у таблиці 5.20 [14].

При реологічному зондуванні в продукт з постійною швидкістю на глибину більшу ніж висота індикатора проникають металевий конус (діаметр основи 0,015 – 0,025 м, кут $45 - 90^{\circ}$), або кульку (діаметр 0,012–0,016 м), вимі-

рюючи при цьому силу опору продукту. За результатами реологічного зондування конусним індикатором визначають границю міцності θ_r (Па), граничне напруження зсуву (динамічне) θ_s (Па), ефективну в'язкість $\eta_{E\Phi}$ (Па·с) та модуль зсуву G (Па).

$$\theta_r = K_\alpha P_{\max} / l^2 ; \quad (5.26)$$

$$\theta_s = K_\alpha P_s / l^2 ; \quad (5.27)$$

$$\eta_{E\Phi} = K_\alpha P_s \sqrt{l^2 + r^2} / (2wl^2) ; \quad (5.28)$$

$$G = K_\alpha \frac{(P_K - P_0) \sqrt{l^2 + r^2}}{2l^2(h_K - r)} , \quad (5.29)$$

де P_{\max} , P_s , P_0 , P_K - сили опору проникання індикатору відповідно максимальна; на ділянці стаціонарної течії; в початку та при кінці гуковського деформування (Н); h_K - глибина занурення індикатору, яка відповідає величині P_K (м); l - висота конуса (м); r - радіус основи конуса (м); w - швидкість руху індикатору (м/с); K_α - поправка, яка залежить від куту конусу при його вершині.

При кульковому індикаторі ефективну в'язкість визначають за формулою Стокса:

$$\eta_{E\Phi} = P_s / 6\pi r w , \quad (5.30)$$

де r - радіус кульки, м.

Характеристики зсуву сиру, визначені методом реологічного зондування, наведені у таблиці 5.21 [14].

Реологічні характеристики сиру дуже залежать від його віку та хімічного складу. Наприклад, сири голландської групи при однакової вологості мають у 75-дневному віці величину пенетраційної твердості на 20-25% нижче, ніж при 10-дневному. Тісний кореляційний в'язок (0,7-0,9) спостерігається між вологістю та твердістю сиру.

Для різних груп сиру кондиційної зрілості цю залежність можна виразити через показник пенетрації Y , отриманий при температурі 20⁰С, та величину вологості W за наступними рівняннями регресії :

Таблиця 5.21 – Значення структурно – механічних показників голландського відпресованого та зрілого сиру

Індикатори	Вік си- ру	Граничне на- пруження зсуву $\theta_s \cdot 10^{-3}$, Па	Границя міцності $\theta_r \cdot 10^{-3}$, Па	Модуль пружності $G \cdot 10^{-3}$, Па	Ефективна в'язкість $\eta_{EF} \cdot 10^{-3}$, Па·с
Конус 30 ⁰	Після пресу	25,0	25,1	12,5	301,9
	Зрілий	32,3	34,8	15,2	389,7
Конус 45 ⁰	Після пресу	24,6	24,7	13,6	218,2
	Зрілий	29,6	32,2	25,2	260,3
Конус 60 ⁰	Після пресу	25,1	25,2	14,2	183,8
	Зрілий	28,0	28,6	31,1	209,0
Конус 90 ⁰	Після пресу	28,1	28,2	14,4	147,5
	Зрілий	30,0	33,7	33,6	167,5
Кулька ді- аметром 0,016 м	Після пресу	-	-	-	158,9
	Зрілий	-	-	-	167,6

голландська група сирів

$$Y = 523W - 115,1; \quad (5.31)$$

сири розсільного та пів розсільного типу (чанах, лорі та інші)

$$Y = 248W - 56,4; \quad (5.32)$$

крупні сири з пастеризованого молока

$$Y = 474W - 112,8; \quad (5.33)$$

$$W = 0,00091Y + 0,306; \quad (5.34)$$

крупні сири з сирого молока

$$Y = 618W - 158,0; \quad (5.35)$$

$$W = 0,00094Y + 0,293. \quad (5.36)$$

Користуючись рівняннями (5.31 – 5.36) за показником пенетрації, виміряному при контролі консистенції, визначають вологість сиру.

Проведений порівняльний аналіз реологічних властивостей сирів Гауда в обробленому високим тиском та не обробленому вигляді. Оброблені тиском зразки менш еластичні у порівнянні з необробленими. Починаючи з 50 МПа тиску в'язкість була менш ніж у необроблених зразків. При 400 МПа помічене менше зменшення. Обробка високим тиском не впливає на пружність сиру, а з дозріванням пружність знижується у всіх зразків. Дослідження показали, що відразу після обробки тиском зменшується тривалість зберігання та піддатливість. При обробці тиском 400 МПа, зразки ставали менш цільними та більш високоеластичними, мали границю текучості.

Вивчення релаксації зразків показали значні зменшення напруження. Після 42 днів дозрівання не помітно практично ні якої різниці між обробленими та необробленими зразками. Експерименти довели, що гідрофобні взаємодії після обробки тиском ослабли, що привело до структурних змінень реологічних властивостей.

Питання для самоконтролю

1. Якими показниками оцінюють властивості зсуву твердообразних систем?
2. При яких умовах досягається найкраща якість продукту?
3. Як залежить граничне напруження зсуву сирних продуктів з концентратом ядра арахісу та борошном кукурудзяним від тривалості зберігання?
4. Як впливають вологість та масова частка жиру зразків сиру кисломолочного на міцність структури?
5. Як впливають добавки, які використовуються для процесів структуроутворення нових плавлених сирів на характер реологічної поведінки при зсувному деформуванні?
6. Які реологічні показники використовуються для оцінки споживчих і технологічних властивостей м'яких сирів?
7. Яка динаміка змін коефіцієнта пенетрації та роботи різання м'якого сиру, обробленого високим тиском?
8. Які реологічні характеристики сирів визначаються за кінетичними кривими розвитку деформації зсуву під постійним навантаженням та наступного спаду деформації після зняття навантаження?
9. Як залежать реологічні характеристики сиру від температури,

віку та хімічного складу?

10. Що показує порівняльний аналіз реологічних властивостей сирів Гауда в обробленому високим тиском та необробленому виді?

11. Чому відбуваються структурні змінення реологічних властивостей після обробки тиском?

5.2 Компресійні характеристики та характеристики міцності, щільність молочних продуктів

Компресійне ущільнення молочних продуктів супроводжується зміненням фазового стану. Фазовий стан високобілкових молочних продуктів, які є пористими дисперсними тілами, можна охарактеризувати фазовими об'ємами, які визначаються за формулами:

$$v_{II} = (V_T + V_P)/V, \quad (5.37)$$

$$v_{\Gamma} = V_{\Gamma}/V, \quad (5.38)$$

де v_{II} - загальна пористість продукту, $\text{м}^3/\text{м}^3$; v_{Γ} - пористість продукту по газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$; V , V_P , V_{Γ} - відповідно об'єм всього продукту та об'єму порожнин, що заповнені рідинною та газовою фазою.

Пористість матеріалів також характеризують коефіцієнтом пористості ε_{II} , пов'язаного зі загальною об'ємною пористістю співвідношенням:

$$\varepsilon_{II} = v/(1 - v). \quad (5.39)$$

Дані, які характеризують загальну пористість кислого сиру та інших видів сирів наведені у таблиці 5.22.

Таблиця 5.22 – Загальна пористість кислого сиру та інших сирів

Продукт	Вологість, кг/кг	Загальна пористість, $\text{м}^3/\text{м}^3$	Коефіцієнт пористості
Кислий сир жирний	0,70	0,73	2,76
Кислий сир жирний	0,60	0,64	1,78
Сир угличський	0,48	0,54	1,19
Сир пошехонський	0,44	0,48	0,94
Сир голландський	0,40	0,44	0,79
Сир російський	0,41	0,49	0,97

Пористість сирної маси по газу залежить від методу формування продукту.

Таблиця 5.23 – Коефіцієнти для розрахунку характеристик стиску маси з кислого сиру

Кислий сир	$\alpha_\varepsilon \cdot 10^4$	α_1	α_2	$\alpha_3 \cdot 10^4$
Обезжирений	7,3	0,37	0,343	13,0
Жирний	2,1	0,46	0,430	4,2

Компресійні характеристики можна визначити за формулами: 1.25, 1.26, 2.8, 4.14. Емпіричні коефіцієнти наведені у таблиці 5.23.

5.2.1 Компресійні характеристики в процесі деформування під дією високого тиску

Була розроблена технологія виробництва кислого сиру високої харчової цінності тривалого терміну придатності, в якій з метою збереження споживчих властивостей молока та підвищення терміну придатності кислого сиру термічні методи обробки молока замінені на обробку високим тиском готового продукту [23].

Знання компресійних характеристик кислого сиру в процесі його обробки високим тиском необхідні при створенні технологічного обладнання для реалізації даної технології на виробництві.

Був досліджений кислий сир, оброблений високим тиском, без термічної обробки. Дослідження проводились на установці високого тиску нового покоління, розробленої в проблемній лабораторії високого тиску ДонНУЕТ [23]. Методика досліджень включена до програмного забезпечення дослідницького комплексу, який реєструє змінення абсолютного та відносного об'ємів об'єкту, коефіцієнтів стисливості та модулю об'ємної пружності. Термодинамічний коефіцієнт стисливості χ , який характеризує відносну зміну об'єму системи при ізотермічному зменшенні її тиску на одиницю, системи з N компонентів (у даному випадку: об'єкт, який досліджується, пакувальний матеріал, проміжна рідина) дорівнює:

$$\chi = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T; \quad (5.40)$$

$$V\chi = -\left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T; \quad (5.41)$$

Об'єм системи, який складається з N компонентів, дорівнює сумі їхніх об'ємів:

$$V_{cuc} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_N = \sum_{i=1}^N (V_i); \quad (5.42)$$

Зміна об'єму системи з N компонентів дорівнює:

$$\partial V_{cuc} = \sum_{i=1}^N (\partial V_i); \quad (5.43)$$

Після перетворень, отримали:

$$\sum_{i=1}^N (V_i \chi_i) = \left(-\frac{1}{\partial P} \sum_{i=1}^N (\partial V_i) \right)_T. \quad (5.44)$$

Модуль об'ємної пружності β дорівнює відношенню величини нормального напруження σ до величини відносного об'ємного стиску Δ , викликаного цим напруженням:

$$\beta = \frac{\sigma}{\Delta}, \quad (5.45)$$

та пов'язаний з ізотермічним коефіцієнтом стисливості χ співвідношенням:

$$\beta = \frac{1}{\chi}. \quad (5.46)$$

Після виконання математичних перетворень отримали:

$$\chi_{3p} = \frac{1}{V_{3\delta p}^0} \cdot \left(\frac{\Delta V_{POK}}{P - P^0} - \chi_{PЖ} \cdot V_{PЖ}^0 \right)_{T=Const}, \quad (5.47)$$

де: $\Delta V_{POK} = (P - P^0) \cdot (\chi_{PЖ} \cdot V_{PЖ}^0 + \chi_{3p} \cdot V_{3p}^0)$;

$$\Delta V_{POK} \approx \Delta V_{PЖ} + \Delta V_{3p}; \quad (5.48)$$

$$\Delta V_{PЖ} = \chi_{PЖ} \cdot V_{PЖ}^0 \cdot \Delta P = \chi_{PЖ} \cdot V_{PЖ}^0 \cdot (P - P^0); \quad (5.49)$$

$$\Delta V_{3p} = \chi_{3p} \cdot V_{3p}^0 \cdot \Delta P = \chi_{3p} \cdot V_{3p}^0 \cdot (P - P^0); \quad (5.50)$$

де $\chi_{PЖ}$ та χ_{3p} – ізотермічні коефіцієнти стисливості робочої рідини та зразку відповідно; $V_{PЖ}^0$ і V_{3p}^0 – початкові об'єми робочої рідини та зразку відповідно; P^0 – нульовий (атмосферний) тиск.

Криві зміни компресійних характеристик у залежності від величини тиску та рівняння їх опису наведені на рисунках 5.10 – 5.14.

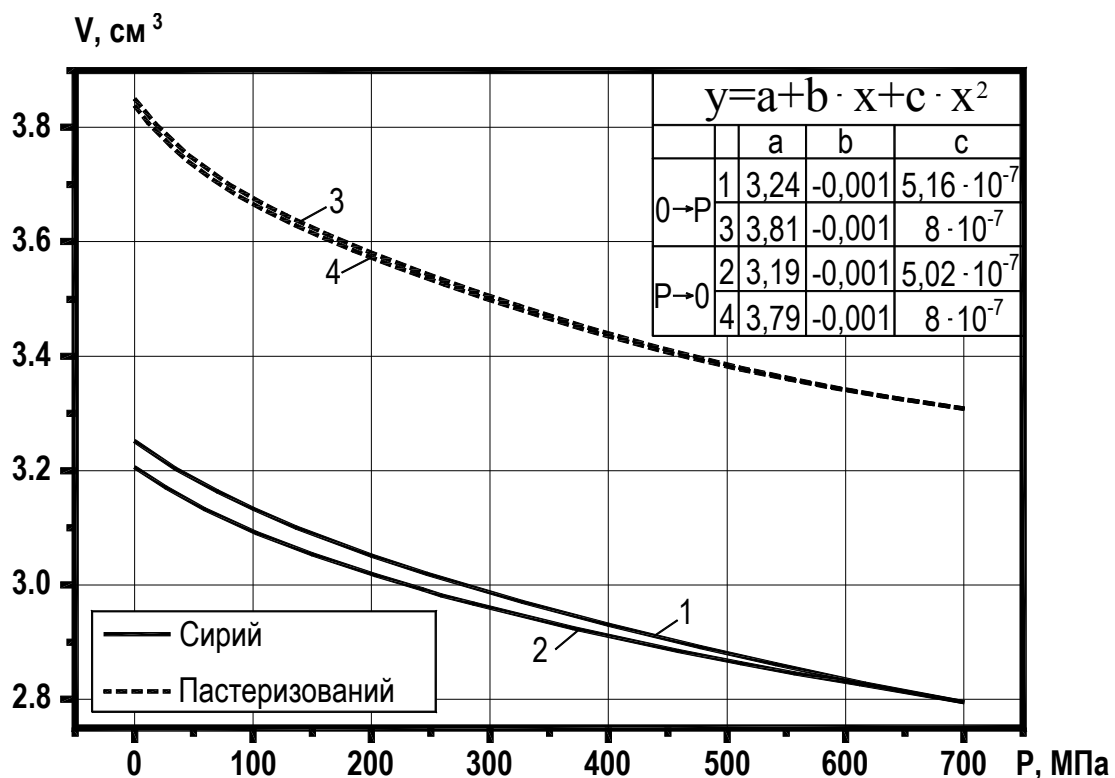


Рисунок 5.10 – Залежність змінення об'єму зразків під дією тиску

Пружні властивості зразків визначали, збільшуючи тиск від атмосферного до 400 МПа, запис контрольованих параметрів здійснювали як у період збільшення тиску від 0 до величини P ($0 \rightarrow P$), так і в оборотному напрямку при зменшенні величини тиску від значення P до 0 МПа ($P \rightarrow 0$).

Дослідження компресійних властивостей зразків м'якого сиру були проведені на дослідницькому комплексі «Використання високо-

го тиску у харчових виробництвах» ДонНУЕТ [23].

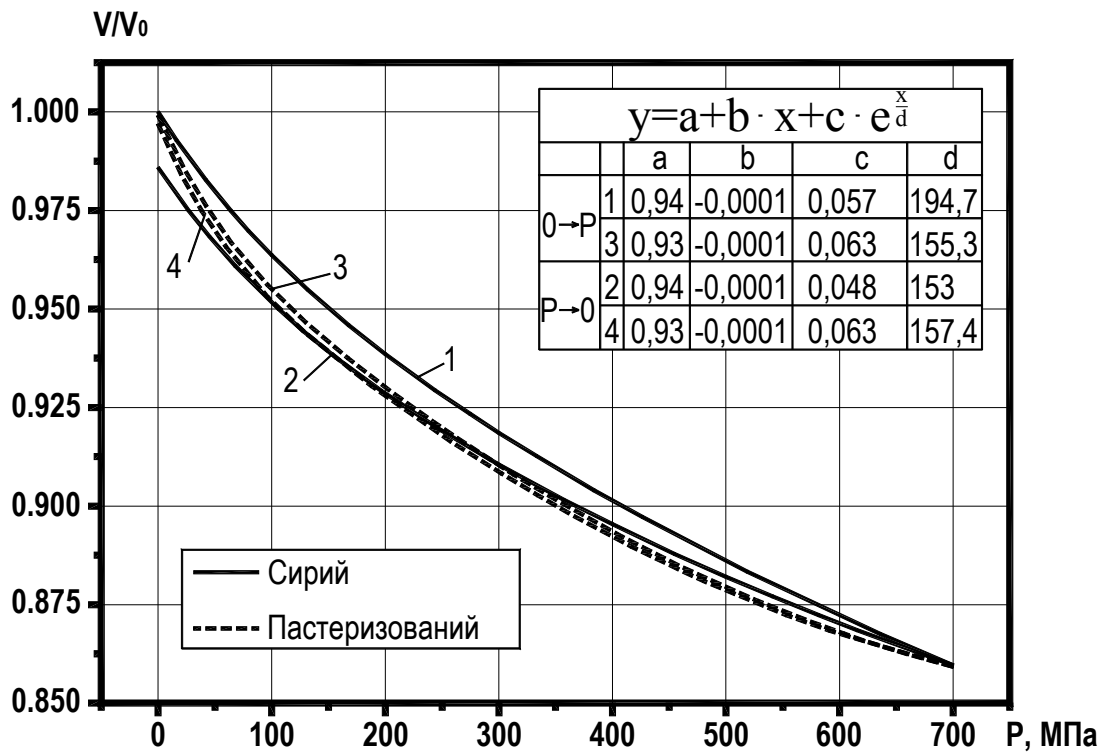


Рисунок 5.11 – Залежність зміння питомого об'єму зразків під дією тиску

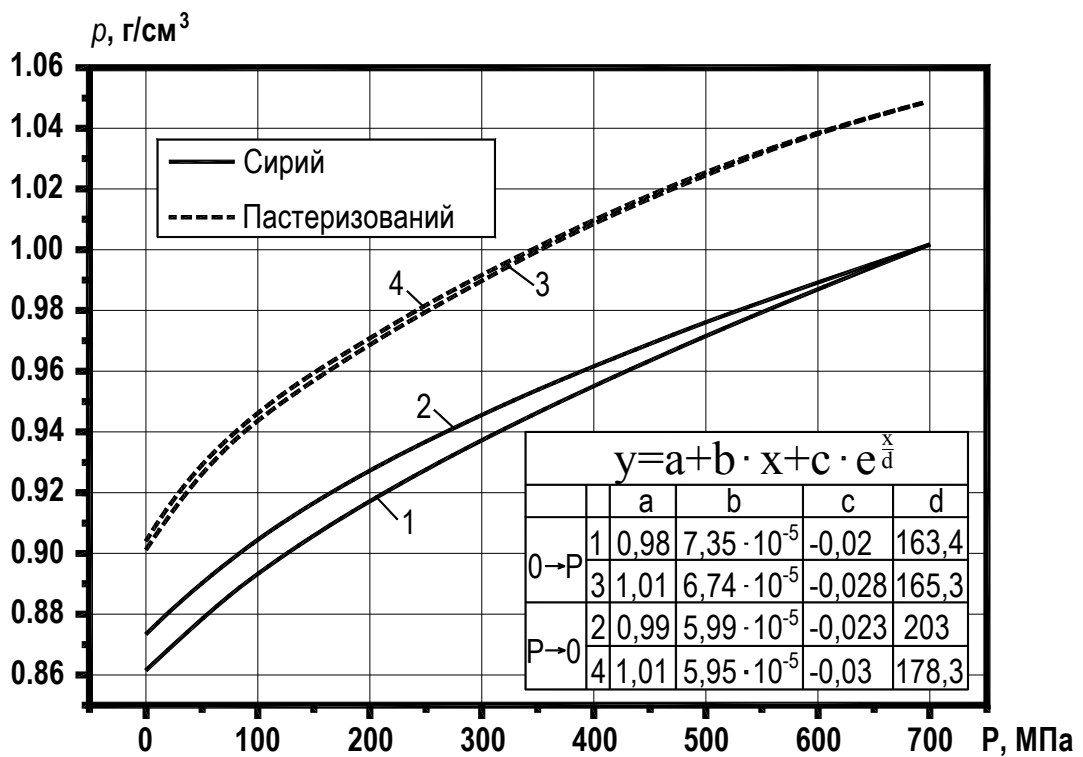


Рисунок 5.12 – Залежність зміння щільності зразків під дією тиску

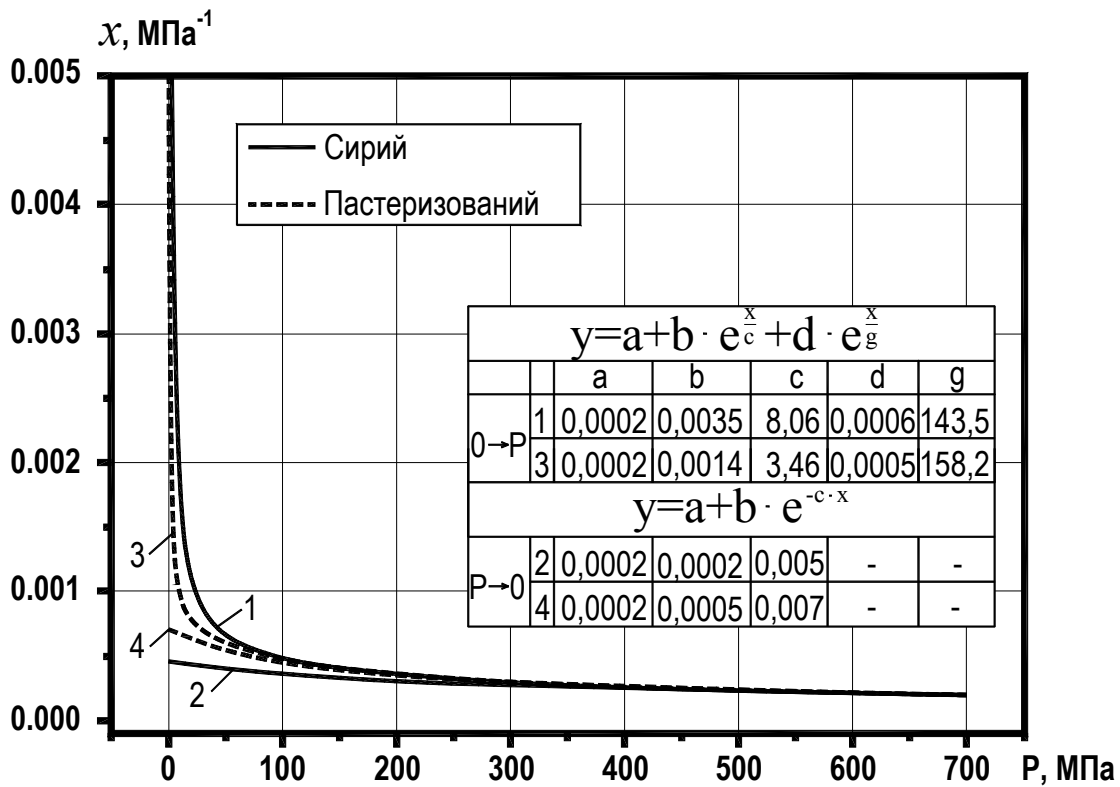


Рисунок 5.13 – Залежність змінення коефіцієнту стисливості зразків під дією тиску

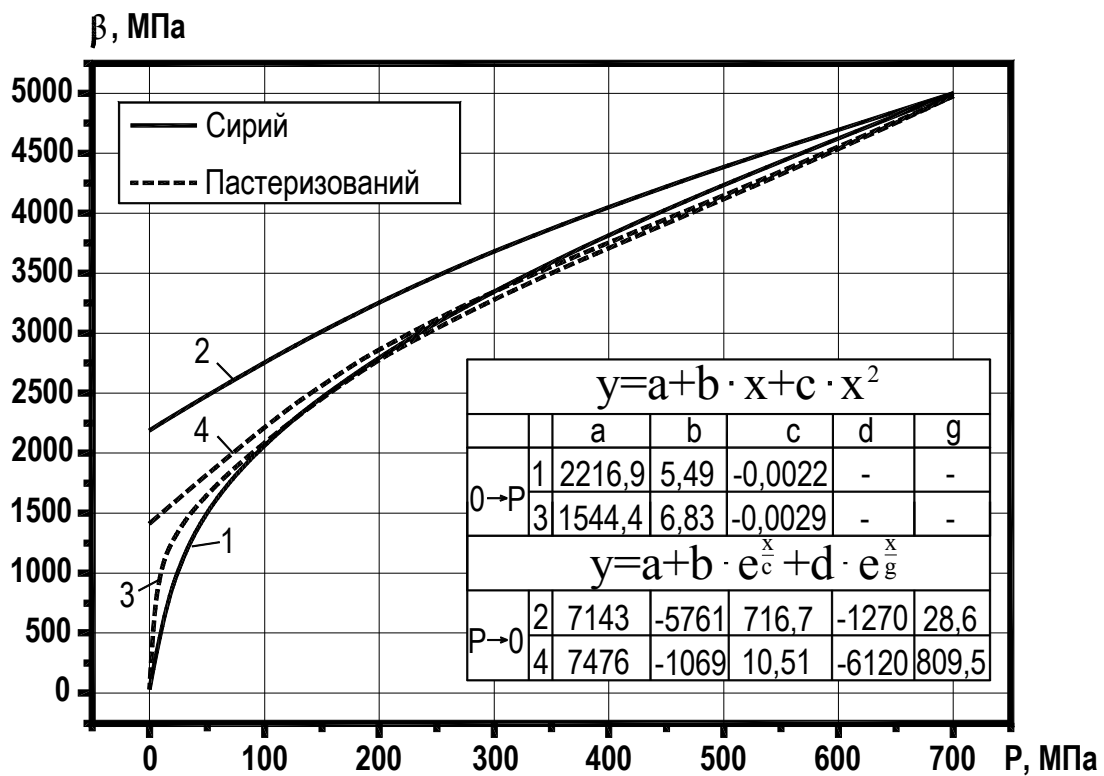


Рисунок 5.14 – Залежність змінення модулю об'ємної пружності зразків під дією тиску

Відповідно до методики експериментальних досліджень, що враховує гістерезисні явища при дослідженні компресійних показників об'єктів, запис контрольованих параметрів здійснювали як у період збільшення тиску від 0 до величини P ($0 \rightarrow P$), так і у зворотному напрямку при зменшенні величини тиску від значення P до 0 МПа ($P \rightarrow 0$). У якості прикладу, на рисунку 5.15 представлені криві зміни зусиль різання залежно від переміщення ножа.

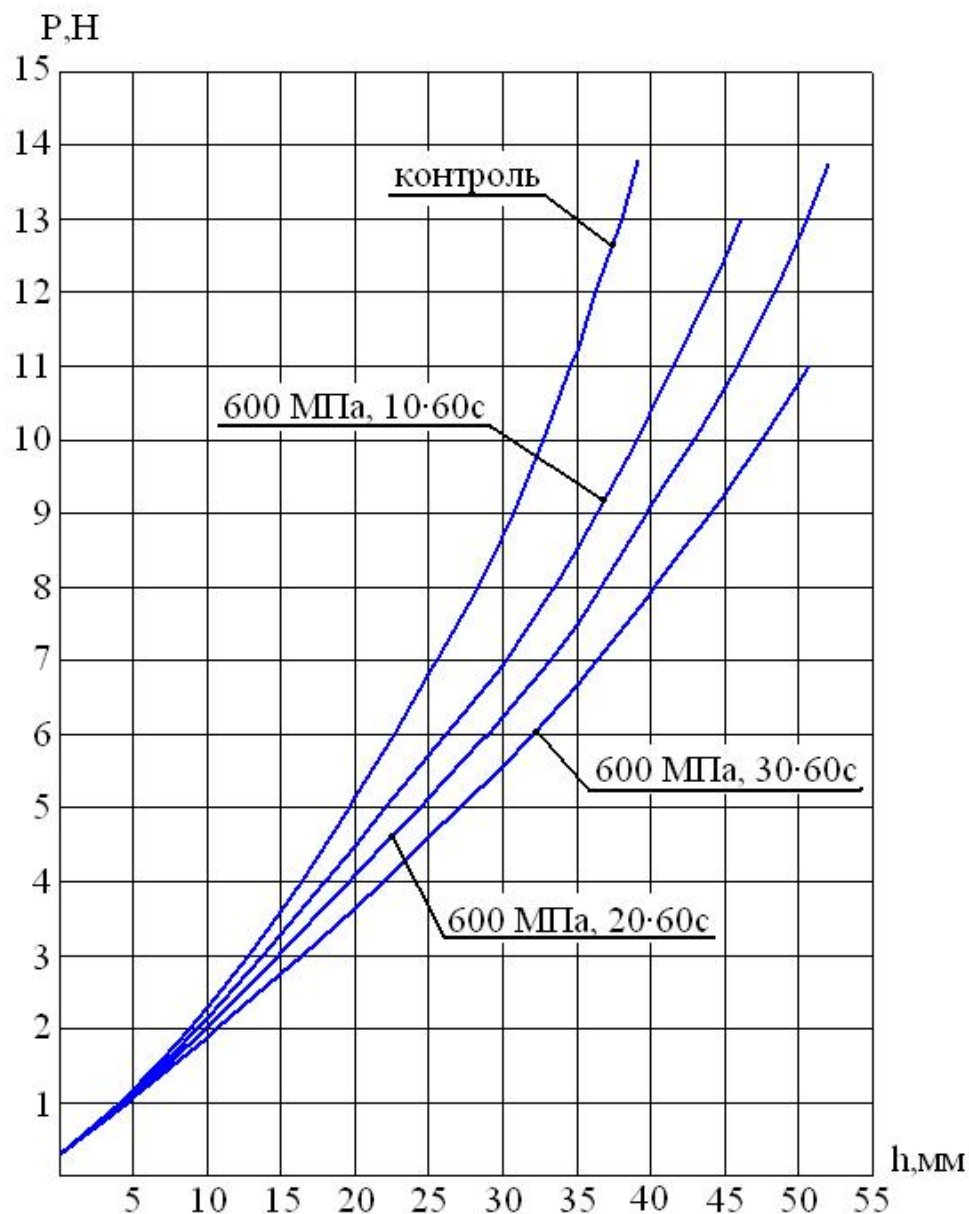


Рисунок 5.15 – Зміни зусиль різання залежно від переміщення ножа для контрольного зразка сиру, і зразків, зроблених з використання технології високого тиску

Криві отримані для контрольного зразка сиру, і зразків, зробле-

них з використання технології високого тиску при тиску 600 МПа та тривалості обробки 10×60с, 20×60с, 30×60с.

Математична обробка отриманих експериментальних кривих $P = f(h)$ виконана в програмі FindGraph, version 2.291. Дані були описані залежністю (5.51), а результати обробки та статистичний аналіз отриманих залежностей наведений у таблиці 5.24.

$$y = a + b \cdot e^{\frac{x}{c}} + d \cdot e^{\frac{x}{g}} \quad (5.51)$$

Таблиця 5.24 – Результати математичної обробки залежності $P = f(h)$

Параметр	R ²	F-statistics	Значення коефіцієнтів				
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>g</i>
Контр-роль	0,999	17235,21	-7,212	0,0003	4,724	7,37	39,58
10 хв	0,999	11704,94	-21,69	0,008	8,487	21,98	112,89
20 хв	0,999	28748,73	-15,34	0,003	8,283	15,54	94,21
30 хв	0,999	29288,21	-25,45	0,023	1,785	25,59	166,26

Результати експериментальних досліджень компресійних характеристик сиру м'якого наведені на рисунку 5.16.

Аналіз отриманих залежностей показав, що в процесі обробки сиру від 0 до 600 МПа відбуваються наступні зміни його реологічних показників: відносний об'єм продукту зменшується до 0,76, але після зняття тиску повертається й становить 0,95 від первинного значення; щільність продукту збільшується на 29 % (с 1,047 кг/м² до 1,351 кг/м²), після зняття тиску щільність знижується до значення 1,085 кг/м², що складає 3,6% від первинного; значення модуля об'ємного стиску при збільшенні тиску збільшується практично в 17 разів (з 0,55×10⁻³ МПа до 9,4×10⁻³ МПа) та потім зменшується до величини 2,0×10⁻³ МПа; ізотермічний коефіцієнт стиску при підйомі тиску знижується на 77,3 % (від 1,1×10⁻³ до 0,25×10⁻³ МПа⁻¹), при знятті тиску його значення перевищує 4,5×10⁻³ МПа⁻¹.

Залежності $\chi = f(P)$ та $\beta = f(P)$ описані функцією:

$$y = a + b \cdot e^{\frac{x}{c}} + d \cdot e^{\frac{x}{g}} \quad (5.52)$$

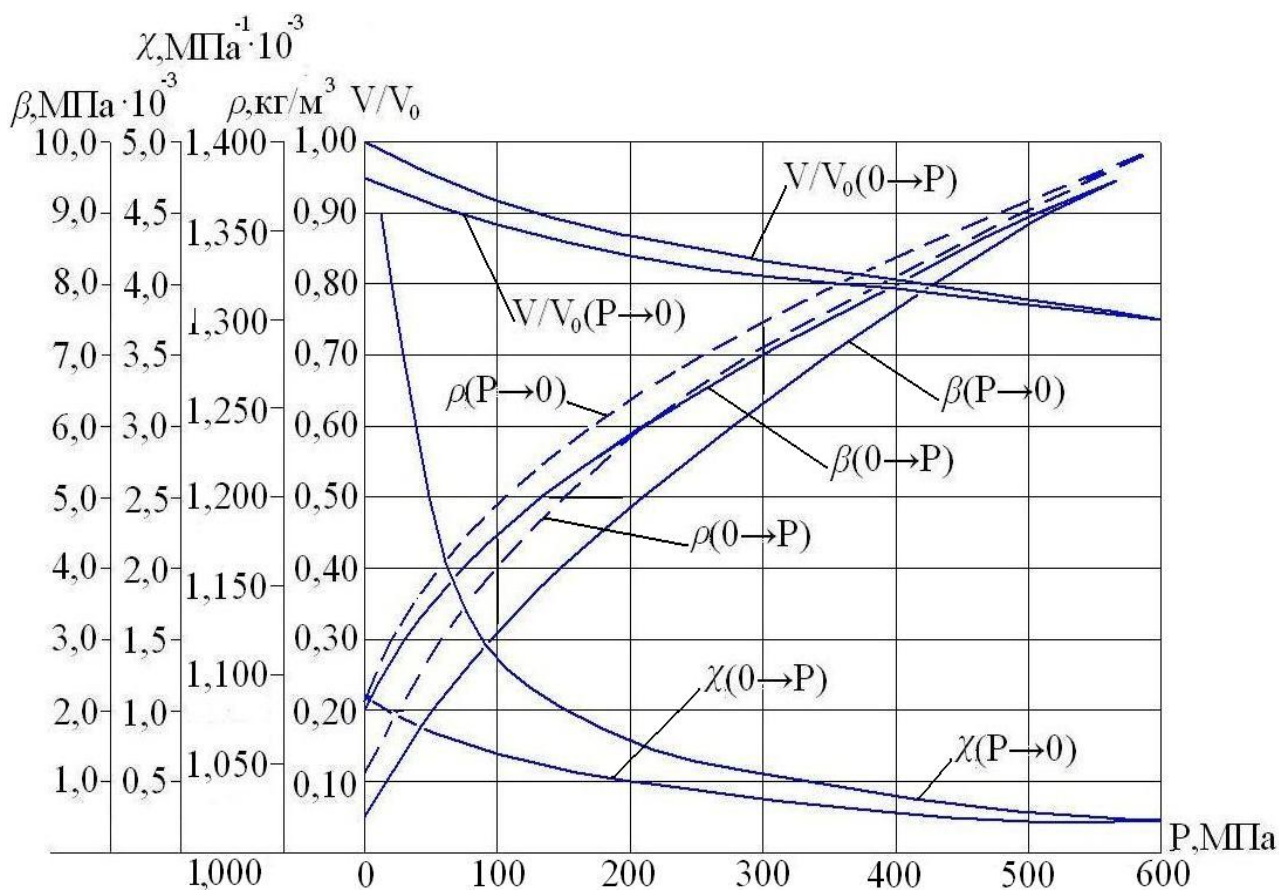


Рисунок 5.16 – Зміна компресійних показників м'якого сиру

та залежності $\rho = f(P)$ та $V/V_0 = f(P)$ – функціями виду (5.53):

$$y = a + b \cdot x + c \cdot e^{\frac{x}{d}} \quad (5.53)$$

Коефіцієнти рівнянь (5.52) та (5.53) наведені у таблиці 5.25.

Таблиця 5.25 - Результати математичної обробки залежностей

Параметри		R ²	F-statistics	Значення коефіцієнтів				
				a	b	c	d	g
$\chi = f(P)$	0→P	0,997	1835,22	0,393	149,86	326,59	-149,25	329,28
	P→0	0,998	4980,93	0,061	6,98	15,5	2,42	157,42
$\beta = f(P)$	0→P	0,999	17668	19,4	-0,84	64,46	-16,45	1152,6
	P→0	0,999	36032	16,94	-0,41	44,49	-15,92	770,89
$\rho = f(P)$	0→P	0,999	29087	820,5	0,96	-586,16	221,16	-
	P→0	0,999	17527,4	2544,52	-0,41	-2140,7	710,94	-
$V/V_0 = f(P)$	0→P	0,998	4425,07	0,84	-0,0002	0,159	192,07	-
	P→0	0,997	3180,8	0,63	$3 \cdot 10^{-5}$	0,312	428,8	-

5.2.2 Вплив компонентів складу продукту на компресійні характеристики

Досліджений вплив компонентів складу на структурно – механічні властивості продукту структурованого на основі сиру кисломолочного [20]. Метою досліджень були: визначення структурно – механічних властивостей продукту структурованого з різним вмістом желатину, жирової компоненти та концентрату ядра насіння соняшнику для встановлення діапазону концентрацій компонентів у рецептурі; визначення умовно – миттєвого модуля пружності та високоеластичного модуля продукту структурованого за діапазоном концентрацій основних компонентів; установлення кінетики еластичності, пластичності та пружності готового продукту в діапазоні концентрації основних компонентів у рецептурі продукту структурованого. Отримані дані виражали у вигляді кривих повзучості (рисунки 5.17 – 5.19).

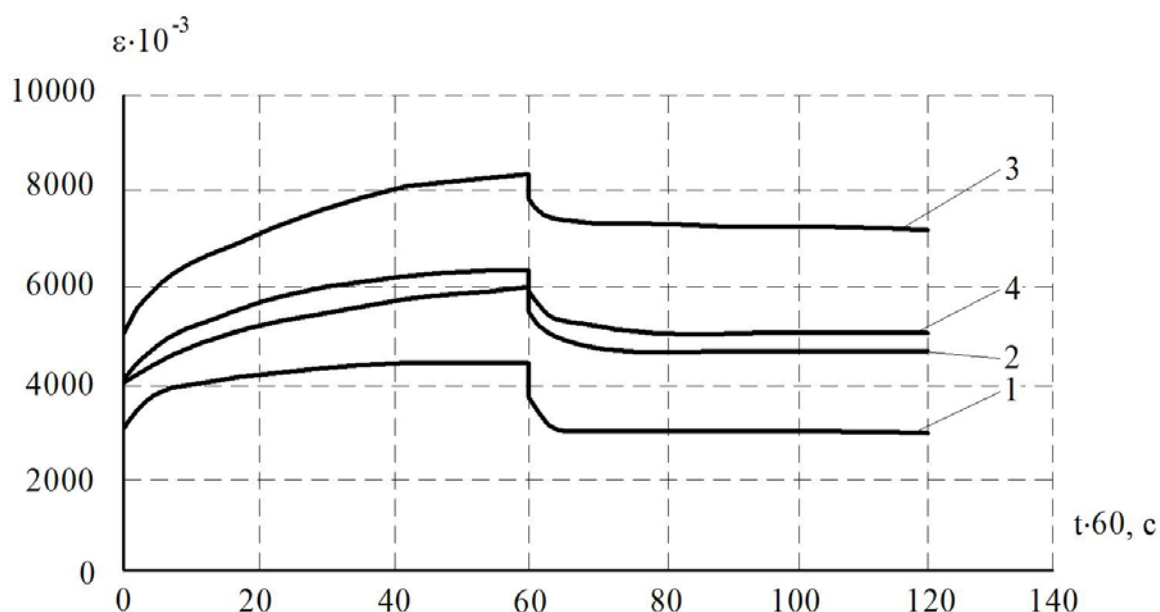


Рисунок 5.17 – Залежність деформації навантаження та релаксації продукту структурованого від концентрації желатину:
1 – 1%; 2 – 3%; 3 – 5%; 4 – контроль (сир «Фета»)

За результатами дослідження впливу концентрації основних рецептурних компонентів на кінетику деформації отримані реологічні характеристики, наведені у таблицях 5.26 та 5.27.

При збільшенні вмісту желатину в рецептурі понад 3% зростає модуль пружності. При збільшенні вмісту концентрату ядра насіння соняшнику в рецептурі понад 7,5% та вмісту рослинного жиру понад

15% знижується модуль пружності, що веде до в'язкої структури.

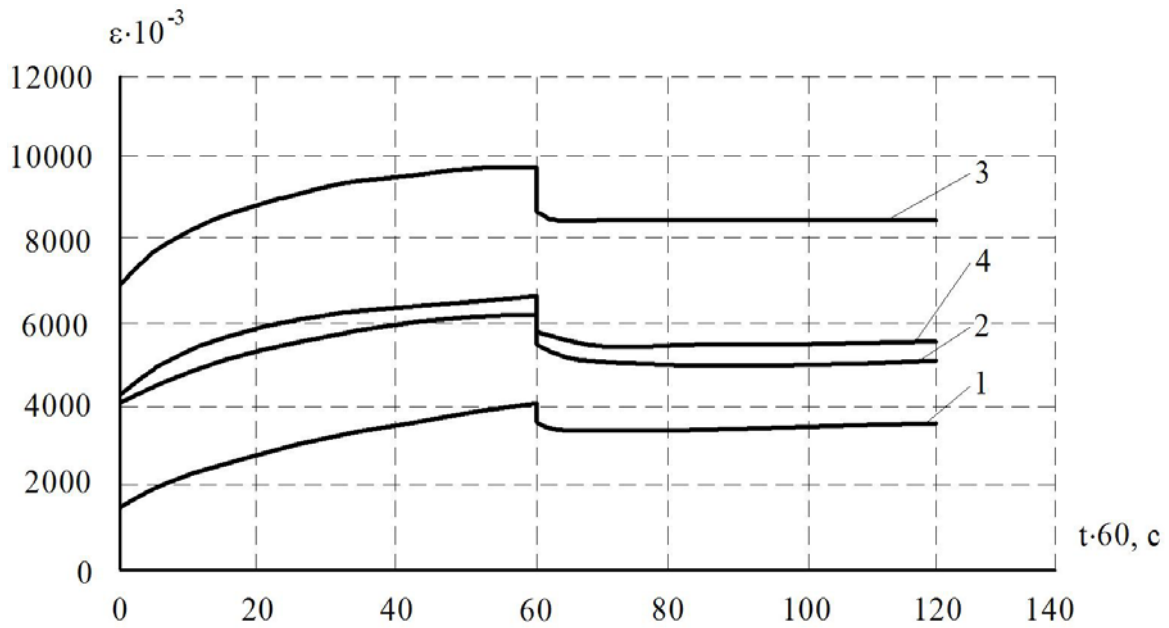


Рисунок 5.18 – Залежність деформації навантаження та релаксації продукту структурованого від концентрації концентрату ядра насіння соняшнику: 1 – 2,5%; 2 – 5%; 3 – 7,5%; 4 – контроль (сир «Фета»)

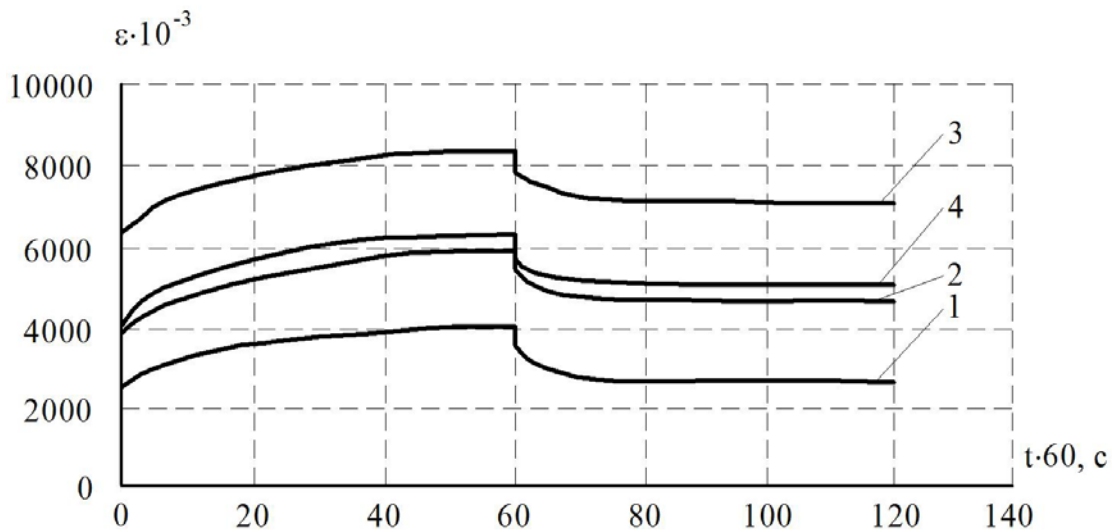


Рисунок 5.19 – Залежність деформації навантаження та релаксації продукту структурованого від концентрації жирової компоненти: 1 – олія 30%; 2 – олія: жир рослинний - 1:1, 30%; 3 – жир рослинний, 30%; 4 – контроль (сир «Фета»)

Зменшення концентрації желатину понад 1% зменшує модуля пружності та збільшує текучість структури. Зменшення вмісту олії понад 15% збільшує модуль пружності та ущільнює структуру.

Таблиця 5.26 – Характеристика залежності показників продукту структурованого від вмісту компонентів

Позначення	Показник	Концентрація желатину, %			Вміст концентрату ядра насіння соняшнику, %		
		1	3	5	2,5	5	7,5
$\epsilon_{зв}$	Зворотна деформація, 10^{-3}	7192	4688	4304	8432	4688	2160
$\epsilon_{нез}$	Незворотна деформація, 10^{-3}	1248	1344	192	1248	1344	1536
$\epsilon_{заг}$	Загальна деформація, 10^{-3}	8440	6032	4496	9680	6032	3696
σ	Напруження, Па	1249	1249	1249	1249	1249	1249
I	Піддатливість, Па^{-1} , 10^{-4}	6,76	4,83	3,60	7,8	4,8	2,9
$E_{пр}$	Умовно миттєвий модуль пружності, Па	250,21	312,26	415,24	192,8	312,3	940,6
$E_{ел}$	Високоеластичний модуль, Па	567,8	1815,5	963,8	639,9	1815,5	1501,3
η_0^*	Пластична в'язкість, Па·с	3603023	3345664	2341965	3,60	3,35	2,93
K	Відношення деформації зворотної до загальної	0,85	0,78	0,96	0,87	0,78	0,58
$\eta_{пр}$	В'язкість пружної післядії, Па·с	267653	936786	374714	3,23	9,37	5,20

Таблиця 5.27 - Залежність показників модельної системи продукту структурованого від вмісту олії та рослинного жиру

Позначення	Показник	Олія, 30%	Олія + жир рослинний, 30%	Жир рослинний, 30%
$\epsilon_{зв}$	Зворотна деформація, 10^{-3}	8016	4688	3552
$\epsilon_{нез}$	Незворотна деформація, 10^{-3}	480	1344	480
$\epsilon_{заг}$	Загальна деформація, 10^{-3}	8496	6032	4032
σ	Напруження, Па	1249	1249	1249
I	Піддатливість, Па^{-1} , 10^{-4}	0,0068	0,0048	0,0032
$E_{пр}$	Умовно миттєвий модуль пружності, Па	222,4	312,2	494,1
$E_{ел}$	Високоеластичний модуль, Па	520,4	1815,5	1219,8
η_0^*	Пластична в'язкість, Па·с	9367860	3345664	9367860
K	Відношення деформації зворотної до загальної	0,94	0,78	0,88
$\eta_{пр}$	В'язкість пружної післядії, Па·с	191180	936786	624524

Встановлено, що діапазон концентрацій концентрату ядра насіння соняшнику $5 \pm 2\%$, рослинних жирів $30 \pm 5\%$ та желатину $3 \pm 2\%$ в продукті є раціональним і дозволяє регулювати консистенцію готового продукту для продуктів структурованих та найкраще узгоджується з характеристиками аналогу – сиру «Фета».

5.2.3 Щільність молочних продуктів

Щільність цільного та обезжиреного молока знижується з підвищенням температури (таблиця 5.28) [14].

Таблиця 5.28 – Залежність щільності цільного молока ρ (кг/м³) від температури $T^{\circ}\text{C}$

T	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
ρ	1033	1032	1031	1029	1026	1021	1017	1011	1006	1000

Щільність молока ρ (кг/м³) з вмістом жиру 0,03 кг/кг (3%) та сухого обезжиреного молочного залишку (СОМЗ) 0,087 кг/кг (87%) при температурі від 0 до 45⁰С може бути виражена залежністю [18]:

$$\rho = 1035 - 0,358T + 0,0049T^2 - 0,0001T^3, \quad (5.54)$$

а щільність обезжиреного молока [$\varphi=0,0002$ кг/кг (0,02%) СОМЗ - 0,089 кг/кг (8,9%)] у тому же інтервалі змінення температури [17]:

$$\rho = 1036,6 - 0,146T + 0,0023T^2 - 0,00016T^3. \quad (5.55)$$

Щільність кисломолочних продуктів практично не відрізняється від щільності первинної сировини до заквашування.

Щільність вершків у залежності від температури визначається з залежності:

$$\rho/\rho_{np} = 1,125 - 0,15T/T_{np}. \quad (5.56)$$

Приведена щільність ρ_{np} для вершків у залежності від жирності наведена у таблиці 5.29.

Розрахункові дані щільності вершків наведені у таблиці 5.30.

Щільність згущених молочних продуктів знижується з підвищенням температури та підвищується зі збільшенням концентрації сухих речовин (таблиця 5.31).

Таблиця 5.29 – Залежність приведеної щільності вершків (кг/м³) від жирності (кг жиру на 1кг вершків)

Жирність	Приведена щільність	Жирність	Приведена щільність
0,285	1004	0,500	959
0,305	989	0,600	949
0,400	971	0,700	930

Таблиця 5.30 - Залежність щільності вершків (кг/м³) різної жирності від температури

$t, ^\circ\text{C}$	Жирність кг жиру на 1 кг вершків					$t, ^\circ\text{C}$	Жирність кг жиру на 1 кг вершків				
	0,285	0,5	0,6	0,71	0,834		0,28	0,5	0,6	0,71	0,834
2	1014	992,7	976,4	965,8	949,0	50	985,2	956,4	942,8	929,8	913,9
7	1011	988,1	972,8	962,8	945,8	55	982,3	952,8	941,1	926,8	907,9
10	1010	985,2	970,1	960,5	943,6	60	980,0	946,4	940,2	923,4	902,5
15	1009	983,5	963,9	955,8	941,9	65	977,7	945,8	936,8	921,5	898,2
20	1004	978,0	962,0	949,5	940,0	70	974,7	941,6	934,2	918,8	890,3
25	1001	971,9	959,2	947,2	936,3	75	970,6	937,5	927,9	913,3	886,5
30	997	968,3	952,3	943,3	932,6	80	967,8	930,1	925,1	909,2	880,6
35	994	964,0	948,2	940,2	929,3	85	964,7	927,1	919,5	907,1	877,0
40	992	961,2	948,0	938,8	923,5	90	960,8	919,6	917,9	903,4	874,6
45	988	958,8	946,1	935,0	919,0	95	956,3	917,3	912,9	896,6	871,3

Таблиця 5.31 – Залежність щільності згущеного молока ρ (кг/м³) від концентрації сухих речовин c (кг/кг)

c	ρ	c	ρ	c	ρ
0,23	1091	0,34	1140	0,45	1190
0,28	1114	0,39	1162	0,50	1209
0,33	1135	0,44	1186	0,55	1231

Щільність згущеного молока з цукром та какао зі згущеним молоком і цукром у залежності від температури розраховується за формулою:

$$\rho/\rho_{np} = 1,19 - 0,19 T/T_{np} . \quad (5.57)$$

При $T_{np} = 308 \text{ K}$ та $\rho_{np} = 1295 \text{ кг/м}^3$.

Питання для самоконтролю

1. Якими показниками можна охарактеризувати фазовий стан високобілкових молочних продуктів?
2. Для чого необхідні знання компресійних характеристик кислого сиру в процесі його обробки високим тиском?

3. Який характер мають залежності змінення об'єму, питомого об'єму, щільності, коефіцієнту стисливості та модулю об'ємної пружності зразків під дією тиску?

4. На які реологічні властивості продукту структурованого на основі сиру кисломолочного впливають компоненти складу?

5. Охарактеризуйте залежність деформації навантаження та релаксації продукту структурованого від концентрації желатину, концентрату ядра насіння соняшнику та жирової компоненти?

6. Як залежить щільність цільного та обезжиреного молока від температури?

7. Як залежить щільність згущених молочних продуктів від температури та збільшенням концентрації сухих речовин?

5.3 Поверхневі характеристики молока та молочних продуктів

Поверхневий натяг α (Н/м) цільного та обезжиреного молока зменшується з підвищенням температури. Поверхневий натяг обезжиреного молока вище, ніж цільного, але з підвищенням температури ця різниця зменшується [22].

Таблиця 5.32 – Поверхневий натяг

Молоко	Температура, °С				
	0	10	30	50	70
Цільне	46	45	42,5	42	-
Обезжирене	-	50	46	42	39

У таблиці 5.32 наведена залежність поверхневого натягу молока від температури. Підвищення тиску гомогенізації сирого непастеризованого молока веде до деякого зниження величини поверхневого натягу молока (таблиця 5.33). Це пояснюється подрібненням жирових кульок молока та механічним пошкодженням білкових часток, тобто руйнуванням білково – жирових агрегатів [7].

Таблиця 5.33 – Вплив тиску гомогенізації на поверхневий натяг молока

Молоко	Тиск гомогенізації $p \cdot 10^{-5}$, Па		
	0	105	176
Сире гомогенізоване при 32°С	43,62	38,47	39,16
Пастеризоване гомогенізоване при 63°С	44,53	45,27	45,55

Залежність поверхневого натягу вершків від температури та жирності наведена у таблиці 5.34.

Поверхневий натяг згущеного молока на виході з вакуумного апарату нижче, ніж у молока до згущення. Але з течією часу він

Таблиця 5.34 – Поверхневий натяг вершків при різних значеннях температури

Вміст жиру, кг на 1 кг продукту	Температура, °С			
	10	20	40	60
0,10	48,6	46,4	44,1	41,9
0,20	46,8	44,8	41,8	41,6
0,22	48,8	45,4	43,5	41,7

Таблиця 5.35 – Поверхневий натяг згущеного обезжиреного та цільного молока

Тривалість витримки після згущення, хв	Молоко обезжирене, СЗМО 41%	Молоко цільне, СЗМО 55%
15	40,92	42,44
60	40,16	40,15
120	41,68	47,77
180	51,97	-

відриву та тривалості контактування, наведена у таблиці 5.37.

Таблиця 5.36 – Липкість маси з кислого сиру (Па) до різноманітних матеріалів

Матеріал	Тривалість контакту, с	
	1 - 3	600
Поліетилен	8200	17600
Неіржавна сталь	9300	16700
Латунь	9000	15300
Фторопласт – 4	12500	14300
Чавун	13300	13500
Дюралюміній	10500	12000
Сталь Ст. 3	8300	11000

Таблиця 5.37 – Значення липкості (Па) маси з кислого сиру при різних значеннях тривалості контакту та швидкості відриву

Матеріал	Тривалість контакту, с	Швидкість відриву, м/с		
		0,0017	0,0038	0,0193
Неіржавна сталь	3	6700	12000	13400
	180	9100	15100	16300
	300	10500	16300	21850
Фторопласт-4	600	14500	23000	26600
	3	9600	16300	18400
	300	14200	21850	28000
	600	15300	24600	32000

Липкість сирів голландської групи до різноманітних матеріалів наведена у таблиці 5.38.

збільшується і оказується вище, ніж у первісного молока (таблиця 5.35).

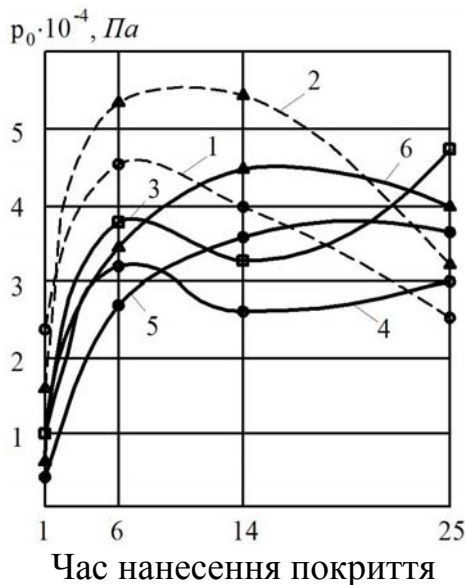
Липкість маси з кислого сиру (вологовміст 0,84 кг на 1 кг сухого залишку, жирність 0,25 кг на 1 кг та вміст білку 0,18 кг на 1 кг) до різноманітних матеріалів, визначена при тиску контакту 4910 Па, площі контакту 0,001 м², товщині 0,001 м при швидкості відриву 0,00358 м/с (таблиця 5.36).

Величина липкості маси з кислого сиру, визначена при тиску контакту 4910 Па та товщині шару 0,001 м у залежності від швидкості

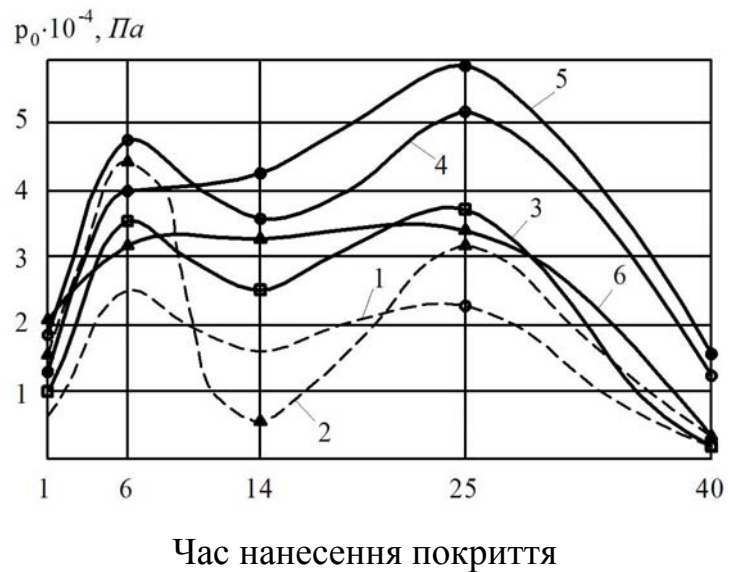
Таблиця 5.38 – Липкість сирів голландської групи до різних матеріалів

Матеріал	Вік сиру	Липкість, Па
Деревина	1 день	2600
Пергамент	1,5 міс.	1400
Поліетилен	1,5 міс.	600
Фольга	1,5 мес.	1700
Переліжний папір	1,5 мес.	800

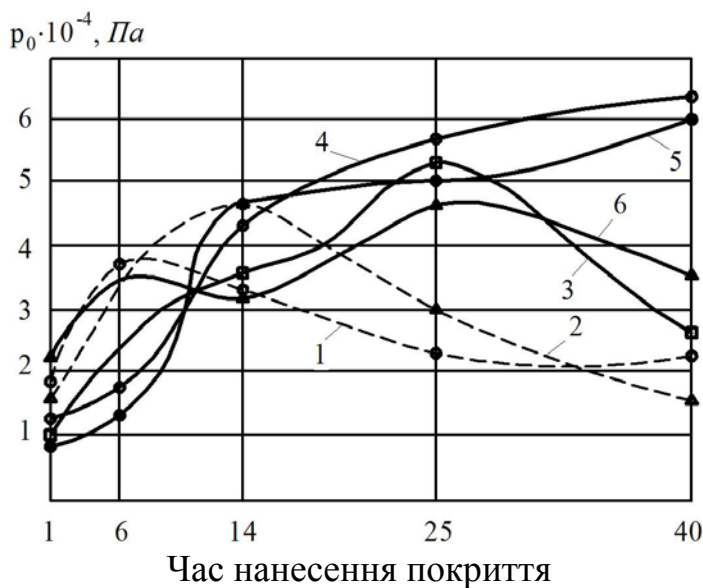
На рисунку 5.20 наведені величини липкості до сирів захисних покриттів парафінового та комбінованого типів. Адгезив наносили на поверхню сиру, потім розтасовували перфоровану або сталеву пластинку, отвори якої заливали адгезивом.



а



б



в

Рисунок 5.20 – Липкість парафінових та комбінованих захисних покриттів до сирів різного виду та віку:

а – литовський; б – голландський; в – російський;

1 – восковий склад для сирів; 2 – сплав СКФ – 15; 3 – Новаллен-Д; 4 – ВІМ-К; 5 – ВІМ-Д; 6 – Новаллен-К

Після витримки (2 години) проводили нормальний відрив пластинки зі швидкістю 0,001 м/с.

Липкість плавленого сиру розраховується за формулою:

$$p_0 = a_0 t_k^b, \quad (5.58)$$

де t_k - тривалість контактування сиру з матеріалом, с; a_0 - липкість при тривалості контакту 1с, Па; b - темп зростання липкості при зміні t_k від 3 до 420 с.

У таблицях 5.39 та 5.40 наведені значення емпіричних коефіцієнтів a_0 , b для сирів різної вологості та жирності («Новий» - жиру в сухої речовині 0,30; вологість 0,55; «Дружба» - відповідно 0,55 та 0,50; «Янтар» - 0,60 та 0,50) у залежності від матеріалів та тиску контактування [14]. Дані отримані при тиску контактування 4900 Па, площі контакту 0,001 м², висота проби 0,001 м.

Таблиця 5.39 – Значення розрахункових коефіцієнтів a_0 , b для визначення липкості плавлених сирів до різних матеріалів

Матеріал пластин	«Новий»		«Дружба»		«Янтар»	
	$a_0 \cdot 10^{-3}$	b	$a_0 \cdot 10^{-3}$	b	$a_0 \cdot 10^{-3}$	b
Фторопласт-4	0,4	0,39	2,4	0,18	7,2	0,14
Сталь Ст.3	0,6	0,45	2,3	0,15	5,0	0,18
Латунь	1,6	0,30	3,0	0,17	-	-
Неіржавна сталь	3,6	0,17	4,1	0,15	8,0	0,12
Чавун	3,8	0,21	4,5	0,18	10,0	0,12

Таблиця 5.40 – Коефіцієнти для визначення липкості плавлених сирів до неіржавної сталі

Тиск контактування p_k , Па	«Новий» $b=0,17$	«Дружба» $b=0,15$	«Янтар» $b=0,17$
	$a_0 \cdot 10^{-3}$	$a_0 \cdot 10^{-3}$	$a_0 \cdot 10^{-3}$
3420	2,4	3,4	5,8
4900	3,6	4,1	8,0
6850	4,8	6,2	10,0
9800	5,4	8,6	13,0

Аутогезія сирного зерна, обробленого у виробнику сиру, наведена у таблиці 5.41.

Аутогезію сирів визначають методом нормального відриву циліндричного зразку діаметром 0,015 м та висотою 0,015 м від співвісне розташованого прямокутного зразку сиру,

який має розміри 0,06x0,06x0,01 м.

Таблиця 5.41 – Аутогезія сирного зерна голландської групи сирів у різні моменти обробки

Тривалість обробки зерна з моменту розробки згустку, хв	Показники зерна		Аутогезія, Па
	Волога, кг/кг	pH	
Температури обробки 39 ⁰ С			
20	0,80	6,51	700
40	0,75	6,44	1400
60	0,71	6,40	1700
80	0,69	6,40	2200
100	0,70	6,40	1500
120	0,68	6,39	1200
Температури обробки 42 ⁰ С			
20	0,78	6,50	600
40	0,75	6,47	1700
60	0,71	6,43	2500
80	0,68	6,42	2100
100	0,67	6,41	600
120	0,66	6,40	500

Таблиця 5.42 – Аутогезія сирів

Найменування сирів	Аутогезія, Па
Маса російського сиру	4400
Камамбер	5820
Пошехонський	6900
Голландський	8300
Чеддер	9600
Сир плавлений ковбасний	5040
Сир плавлений латвійський	4900

поверхні, змоченої розсолем, коефіцієнт тертя зменшується у 3 рази.

У таких же умовах при ковзанні вздовж алюмінієвої або дерев'яної поверхонь коефіцієнт тертя знижується у 1,3-1,6 разів. При змочуванні поверхні матеріалу водою коефіцієнт тертя коркового шару сиру без покриття зменшується у 1,5 – 2 рази, виключенням є гума, для якої тертя зменшується у 1,1 рази. Тертя коркового шару сиру, який покритий парафіном по змоченої водою поверхні неіржавної сталі та дерева зростає у 1,1-1,4 рази, а по гумі - зменшується у 1,2 рази.

Площа контакту зразку $1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, тиск контактування 10^4 Па , тривалість 60 с, швидкість відриву $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Значення аутогезії відпресованої сирної маси та різноманітних видів натуральних та плавлених сирів наведені у таблиці 5.42.

Аутогезія вимірювалася при температурі 18⁰С. При контактуванні в умовах вакууму (більш $6 \cdot 10^4 \text{ Па}$) аутогезія підвищується у 2 рази. У таблиці 5.43 наведені дані, які характеризують залежність аутогезії скибків сиру від шорсткості їх поверхні.

Коефіцієнти тертя отримані по мінімальному куту нахилу поверхні матеріалу, при якому брусок сиру голландської групи починає ковзати (таблиця 5.44). При змочуванні поверхні матеріалу коефіцієнт тертя зменшується за рахунок утворення плівки, що мастить. При ковзанні сиру після пресу вздовж гумової

Таблиця 5.43 – Вплив шорсткості поверхонь сиру, які контактують, на аутогезію

Шорсткість поверхні, мкм	3±0,7	9±0,9	11±1,7	13±1,5	21±3,1	103±9,0
Аутогезія, Па	440	690	2030	5350	3090	310

Таблиця 5.44 – Коефіцієнти тертя сиру на різних стадіях його технологічної обробки

Стан продукту	Температура, °С	Матеріал та стан його поверхні								
		Алюміній			Неіржавна сталь			Гума		
		Сух.	Зм. р.	Зм. в.	Сух.	Зм. р.	Зм. в.	Сух.	Зм. р.	Зм. в.
Сир після пресу	25-27	0,78	0,49	-	-	0,70	-	0,91	0,39	-
Сир у процесі дозрівання, поверхня корки чиста	12-14	0,75	-	0,38	0,83	-	0,49	0,67	-	0,60
Сир зрілий, покритий парафіном	10-12	-	-	0,52	0,50	-	0,56	0,78	-	0,62

Примітка. Сух. – суха поверхня; зм. р. – поверхня, змочена розсолом; зм. в. – поверхня, змочена водою.

Таким чином, при конструюванні машин та транспортуючих пристроїв з ціллю стабілізації їх роботи необхідно базуватися на значеннях коефіцієнтів тертя для відповідних пар тертя ковзання.

Питання для самоконтролю

1. Як залежить поверхневий натяг цільного та обезжиреного молока від температури та тиску гомогенізації?
2. Як змінюється поверхневий натяг вершків при різних значеннях температури?
3. Як залежить поверхневий натяг згущеного обезжиреного та цільного молока від тривалості витримки після згущення?
4. Чи змінюються значення липкості маси з кислого сиру при різних значеннях тривалості контактування та швидкості відриву?
5. Як впливає шорсткість поверхонь сиру, які контактують, на аутогезію? Чи залежать коефіцієнти тертя сиру від стадій його технологічної обробки?

Розділ 6

СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИПУЧИХ ПРОДУКТІВ ТА БОРОШНЯНИХ ВИРОБІВ

6.1 Характеристики зсуву сипучих продуктів та борошняних виробів

6.1.1 Характеристики зсуву рідинообразних продуктів

У процесі виробництва хлібу готові закваски періодично перекачують у дозувальну апаратуру, а потім вони поступають у тістомісильні машини. Протягом перекачки можливе суттєве змінення реологічних властивостей напівфабрикатів, але у дозувальниках не враховуються ці змінення. У результаті відбуваються значні відхилення дозувальних порцій закваски від норми, що веде до змінення властивостей замішаного тіста.

Молочна закваска є складною дисперсною системою, яка утворена твердою, рідинною та газовою фазами. Коли закваска досягає максимальної кислотності (23^0), вона у подальшому не піддається значним структурним зміненням, її щільність практично стабілізується і складає 800 кг/м^3 [30]. В інтервалі вологості 0,65-0,67 кг вологи на 1 кг закваски не спостерігається статичної границі текучості. Зниження вологості до 0,63 викликає появу цієї границі; закваска має динамічне граничне напруження зсуву, яке змінюється від 3,5 до 6 Па. У діапазоні швидкостей зсуву від 20 до 105 с^{-1} середнє значення індексу течії $n_{сер} = 0,8$, а темпу руйнування $m_{сер} = 0,2$.

Отримані на віскозиметрі РМ-2 залежності довели, що молочна закваска володіє аномалією в'язкості (таблиця 6.1).

$$\eta_{E\Phi}(\dot{\gamma}, W, p)$$

Обробка результатів експериментів дозволила отримати наступне рівняння регресії:

$$\dot{\gamma} = -1928,0 + 49,22W - 0,3539W^2 + 10,18T - 0,1147T^2 - 4,095p - 2,935p^2 + 1,872\theta + 0,0132\theta^2, \quad (6.1)$$

Таблиця 6.1 – Ефективна в'язкість (Па·с) молочної закваски ($t=39^{\circ}\text{C}$, кислотність 23°)

Вологість, кг/кг	Тиск $p \cdot 10^{-5}$, Па	Швидкість зсуву, c^{-1}				
		25	40	60	80	100
0,63	0	0,62	0,54	0,52	0,47	0,46
0,65	0	0,53	0,47	0,45	0,43	0,42
0,67	0	0,48	0,43	0,40	0,38	0,38
0,65	0,2	0,55	0,50	0,46	0,44	0,43

Діапазон змінення факторів - аргументів, які входять в це рівняння: вологість W від 63 до 67%; температура T від 36 до 42°C ; надлишковий тиск p від 0 до 0,4 МПа; напруження зсуву θ від 9,9 до 64 Па.

На ротаційному віскозиметрі РМ-2 вивчали житню закваску вологістю 0,663-0,669 кг води на 1 кг закваски при швидкостях зсуву від 3,6 до 122 c^{-1} [30]. В цьому інтервалі швидкостей індекс течії $n = 0,45$. При існуючому технологічному процесі отримання закваски її вологість змінюється у значному діапазоні. Це змінення оказує вплив не тільки на реологічні параметри, але і на тип структури.

При вологості 0,70 закваска є рідинообразною аномально – в'язкою системою, а при 0,61 – твердообразною. Тому використовувати для опису житньої закваски який-небудь відомий реологічний закон без врахування технологічних параметрів не можливо.

Аналіз залежності ефективної в'язкості заквасок від швидкості зсуву показав, що зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість знижується. При швидкостях зсуву більш ніж 50 c^{-1} інтенсивність зниження

в'язкості мала, тобто в'язкість практично перестає залежати від швидкості зсуву (таблиця 6.2).

Таблиця 6.2 – Ефективна в'язкість (Па·с) житньої закваски

Вологість, кг/кг	Щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$	Швидкість зсуву, c^{-1}					
		5	20	40	60	80	100
0,70	838	6,0	2,8	1,9	1,5	1,3	1,2
0,61	845	10,0	4,5	2,8	2,2	2,0	1,9

Вивчення впливу тиску на

в'язкість показало, що зі збільшенням тиску вона зростає особливо

різко при зміні тиску від 0 до 100 кПа.

Був досліджений також вплив температури. Рівняння регресії має вигляд:

$$\dot{\gamma} = 1,746 \cdot 10^{-19} \theta^{2,225} W^{6,93} T^{1,95} P^{0,35} \rho^{-0,159}, \quad (6.2)$$

де θ - напруження зсуву, Па; P - тривалість перекачки, год;
 ρ - тиск, МПа; W - вологість.

Рівняння (6.2) справедливе при зміні факторів – аргументів у інтервалах $61,2\% \leq W \leq 70,9\%$; $28^{\circ}\text{C} \leq T \leq 32^{\circ}\text{C}$; $1\text{г} \leq P \leq 8\text{г}$; $0 \leq \rho \leq 0,4\text{МПа}$; $25 \text{ Па} \leq \theta \leq 350 \text{ Па}$.

Таблиця 6.3 – Ефективна в'язкість та щільність житньої закваски

Щільність, кг/м ³	750	800	850	900	950
Ефективна в'язкість, Па·с	2,25	2,35	2,65	3,05	3,35

Ефективна в'язкість житньої закваски залежить від її щільності. У таблиці 6.3 наведені ці значення при швидкості зсуву $\dot{\gamma} = 27,1 \text{ с}^{-1}$.

При проведенні розрахунків без врахування надлишкового тиску, використовується наступне рівняння:

$$\dot{\gamma} = 1,068 \cdot 10^{-7} \theta^{2,225} W^{6,93} T^{1,95} \rho^{-3,86}, \quad (6.3)$$

де ρ - щільність напівфабрикату (кг/м³), яка змінюється у границях від 600 до 1000 кг/м³.

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільший вплив на процес течії оказують вологість, щільність та напруження зсуву; менш – температура, тривалість перекачки та надлишковий тиск. При збільшенні вологості на 1% швидкість зсуву зростає на 6,93%.

Обцукрована заварка це двофазна дисперсна система з постійною щільністю (1130 кг/м³) [30]. У досліджах використовували заварку, виготовлену у виробничих умовах з житньої муки, дослідження проводили на віскозиметрі РМ-2 при тиску від 0 до 250 кПа.

Значення ефективної в'язкості у залежності від швидкості зсуву наведені у таблиці 6.4. Графік залежності ефективної в'язкості заварки від швидкості зсуву та температури має дві ділянки: перша – при швидкості зсуву до 31 с^{-1} , на якій залежність суттєво нелінійна; друга

– в області великих швидкостей зсуву, коли починається «лавинне» руйнування структури з малим відновленням.

Таблиця 6.4 – Ефективна в'язкість (Па·с) обцукрованої заварки

Температура, °С	Швидкість зсуву, с ⁻¹				
	20	40	60	80	100
49	3,0	1,8	1,4	1,2	1,0
59	2,5	1,5	1,2	0,9	0,8

З достатньою для практичних цілей точністю можна вважати, що на другій ділянці поведінка заварки не є аномальною та може бути описана законом ньютонівської рідини. Для заварки вологістю 67,5-70,6% індекс течії сталий та дорівнює 0,4. Зі збільшенням температури в'язкість заварки зменшується.

6.1.2 Характеристики зсуву твердообразних продуктів

Рідинна опара з пшеничного борошна I та II сортів у діапазоні змінення вологості 0,62-0,68 кг на 1 кг опари при температурі 28 °С була досліджена у процесі бродіння [30]. Результати досліджень, проведених на віскозиметрі РВ-8 наведені у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Реологічні характеристики рідинної опари

Сорт борошна	Вологість, кг/кг	Свіжезамішана опара		В'язкість бродячої опари (Па·с) при часі бродіння						
		В'язкість, Па·с	Граничне напруження зсуву, Па	30	60	90	120	150	180	240
I сорт	0,62	11,1	2,8	13	14,3	15,0	15,3	14,0	14,5	13,4
	0,64	8,2	2,5	9,8	10,8	11,5	12,0	11,9	11,6	10,5
	0,66	3,7	2,1	4,8	5,4	5,9	6,0	6,1	5,7	4,8
	0,68	1,9	1,8	3,0	3,4	3,7	4,0	4,1	3,8	3,9
II сорт	0,62	15,3	3,8	16,0	17,2	17,7	18,0	17,6	17,5	16,5
	0,64	11,7	3,1	13,5	14,0	14,2	14,4	14,4	13,2	13,2
	0,66	5,0	2,7	5,5	6,9	7,3	7,3	8,2	7,7	6,3
	0,68	2,9	2,4	3,7	4,0	4,1	4,5	4,9	4,6	3,7

Наведені дані показують, що у початковий період бродіння в'язкість опари з борошна II сорту значно (приблизно в 1,4 рази) перевищує в'язкість опари з борошна I сорту. Протягом бродіння ця різниця згладжується. Рідинна опара вологістю 0,65-0,70 за своїми властивостями наближається до ньютонівських рідин. На віскозиметрі

РВ-8 були отримані значення початкової та усталеної в'язкості опари з пшеничного борошна, які наведені в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – В'язкість рідинної опари з пшеничного борошна

Опара з пшеничного борошна	Вологість кг/кг	В'язкість, Па·с	
		Початкова	Усталена
I сорту	0,65	6,32	3,95
	0,70	1,45	0,88
II сорту	0,65	5,50	2,90
	0,70	1,33	0,84
I сорту (розведене водою та сольовим розчином)	0,65	2,80	1,75
	0,70	0,79	0,52
I сорту (розведене водою та сольовим розчином)	0,65	1,80	1,31
	0,70	0,58	0,47

Одним з перспективних методів інтенсифікації виготовлення тіста є акустична обробка рідинних напівфабрикатів хлібопекарного виробництва. Для визначення оптимальних параметрів обробки необхідно знати реологічні властивості продукту. Опару піддавали інтенсивній обробці в полі звукових та ультразвукових коливань. Вплив акустичної обробки за часом бродіння на ефективну в'язкість рідинних напівфабрикатів вивчали з використанням ротаційного віскозиметру РМ-2, дані наведені у таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Змінення ефективної в'язкості опари протягом бродіння

Опара	Час бродіння, хв.				
	0	60	120	180	240
В'язкість опари, Па·с					
Необроблена	10	14,1	19,8	24,7	20,2
Оброблена	5	5,5	8,8	7,4	-

У результаті досліджень отримані залежності ефективної в'язкості обробленої та необробленої опари від швидкості зсуву та тривалості бродіння.

Дослідження довели, що оброблена і необроблена опара володіє аномальною в'язкістю та є неньютонівською рідиною.

При швидкості зсуву до 30 c^{-1} залежність $\eta = \eta(\dot{\gamma})$ описується степеневим законом, у подальшому в'язкість опари змінюється за лінійним законом. Інтерес викликає друга ділянка, оскільки більшість технологічних операцій по обробці та транспортуванні опари відбувається при високих швидкостях зсуву.

Для вивчення впливу акустичної обробки на реологічні властивості опари отримали криві змінення в'язкості при швидкості зсуву

10 с⁻¹. Найбільша в'язкість обробленої опари досягається після 120 хвилин бродіння. Оброблена опара володіє найбільшою здібністю утримання газу, що обумовлює високу якість готового продукту. В'язкість необробленої опари протягом бродіння також збільшується, досягаючи максимуму після 180 хвилин бродіння, а потім зменшується. Зіставлення отриманих даних показує, що акустична обробка опари суттєво знижує її в'язкість.

Структурно - механічні характеристики борошна у великої ступені залежать від властивостей клейковини. Ці характеристики клейковини, отримані при постійному малому градієнті швидкості ($3 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹) в умовах повного розвитку високоеластичних деформацій, наведені у таблиці 6.8 [3].

Таблиця 6.8 – Структурно – механічні характеристики клейковини

Сорт борошна	Вологість, кг/кг	$G \cdot 10^{-2}$, Па	$\eta \cdot 10^{-5}$, Па·с	η/G , с	Пружність, %	Еластичність, %
Вищий	0,65	4,8	3,4	680	57	74
I	0,67	3,4	2,1	690	57	71
II	0,68	5,5	2,2	445	52	65

Мучне тісто є складною гетерогенною колоїдною дисперсною системою. Починаючи з замісу тіста та закінчуючи випічкою хліба, у масі тіста відбуваються складні фізико – хімічні та біохімічні процеси. У результаті змінення структури тіста суттєво змінюються його фізико-механічні властивості [30]. Знання цих властивостей, їх залежності від різних технологічних параметрів та співвідношення рецептурних компонентів дозволяє розв'язати складну проблему контролю якості напівфабрикату та готової продукції при виробництві хліба.

Необхідність реологічних досліджень тіста необхідна також тому, що у процесі виготовлення тісто випробує різні механічні діяння з боку робочих органів машин. При формозмінненні в тісті порушуються структурні зв'язки, ступінь порушення яких визначається величиною зусилля зовнішнього діяння. Структурно-механічні характеристики залежать від сорту борошна, рецептури, специфіки технологічного режиму та інших факторів. Реологічні властивості тіста для масових сортів вивчені достатньо докладно при атмосферному тиску. У зв'язку з цим головна увага приділялася впливу тиску на реологічні властивості, зв'язку властивостей тіста з його якістю.

Була досліджена зміна в'язкості тіста, його кислотності та органолептичних показників протягом процесу бродіння. Використовували пшеничне борошно I сорту, тісто виготовляли безопарним способом з застосуванням різноманітних доданків (0,5%) та без них. У якості доданків застосовували різні поверхнево-активні речовини: фосфатидний концентрат (ФК), моногліцериди (МГ), стеарат (Ст), а також сонячну олію та сонячну олію з моногліцеридом. Вимірювання проводили безпосередньо після замісу, а також через 60, 120, 150 і 210 хвилин при температурі 30⁰С.

Таблиця 6.9 - Залежність в'язкості хлібопекарного тіста (кПа·с) від тривалості бродіння та швидкості зсуву

Тип місильного пристрою	Швидкість зсуву, с ⁻¹	Тривалість бродіння, хв.				
		0	60	120	150	210
Місильний пристрій фарінографу	0,167	7,29	6,78	5,59	5,34	4,44
	0,333	5,40	4,46	3,60	3,56	3,03
	0,5	3,78	3,16	2,37	2,43	2,02
	0,9	2,44	2,11	1,62	1,63	1,30
	1,5	1,64	1,51	1,15	1,15	0,97
	2,7	1,09	1,03	0,77	0,76	0,75
Тістомісильна машина	0,167	6,64	4,75	4,46	4,41	3,56
	0,333	4,52	4,37	4,04	4,00	3,20
	0,5	3,33	3,13	2,83	2,76	2,28
	0,9	2,18	1,96	1,80	1,75	1,45
	1,5	1,46	1,43	1,32	1,28	1,10
	2,7	0,95	0,93	0,87	0,79	0,66

Залежність в'язкості хлібопекарного тіста від тривалості бродіння та швидкості зсуву наведена у таблиці 6.9.

Зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість тіста при будь-якої тривалості бродіння зменшується, що характерно для більшості мас тіста. По мірі збільшення часу бродіння в'язкість та кож зменшується.

При тривалості бродіння 120 та 150 хв при всіх швидкостях в'язкість майже не відрізняється. При замісі на тістомісильній машині отримані аналогічні залежності, але абсолютні значення в'язкості нижчі.

Закономірність змінення в'язкості однакова для тіста як без доданків, так і з доданками. Додавання у тісто стеарату (Ст) різко знижує в'язкість, інші доданки впливають незначно. Доданки ПАР та сонячної олії поліпшують органолептичні властивості.

Зв'язок між змінною y (органолептична оцінка) та змінними x_1 (в'язкість) та x_2 (рН) може бути виражений рівнянням:

$$y = Ax_1 + Bx_2 + C, \quad (6.4)$$

де A, B, C - постійні коефіцієнти, які наведені у таблиці 6.10.

Таблиця 6.10 – Значення коефіцієнтів рівняння (6.4)

Вид тіста	Коефіцієнт кореляції	A	B	C
Без доданків	0,95	-0,063	-1,19	14,14
З доданками				
ПМ+МГ	0,94	0,012	-10,30	9,20
ПМ	0,98	0,200	15,30	-72,67
ФК	0,97	-0,059	0,38	4,80
МГ	0,98	-0,049	-1,20	13,34
Ст	0,98	-0,098	-2,67	21,37

Аналіз результатів досліджень показав, що між органолептичною оцінкою, в'язкістю та рН тіста з пшеничного борошна I сорту з доданками та без них існує тісний кореляційний зв'язок. Це дозволяє зробити висновок про можливість заміни органолептичної оцінки тіста вимірюванням рН та в'язкості, контроль

яких можна здійснювати за допомогою автоматичних приборів.

Одним з перспективних методів інтенсифікації виготовлення тіста є додавання різноманітних доданків до дріжджового середовища з метою попередньої активації дріжджів.

Для вивчення впливу сухої картопляної добавки (СКД) на реологічні властивості тіста проводилися експериментальні дослідження дріжджового тіста [23]. Використовували віскозиметр Rheotest RN4.1. При швидкостях зсуву $0,3-6,5 \text{ c}^{-1}$ визначали в'язкість та напруження зсуву тіста вологістю 38%, виготовленого за класичною рецептурою і з додаванням сухої картопляної добавки у різному співвідношенні до маси борошна при температурі 32°C .

Об'єктом дослідження були 4 зразки дріжджового тіста: 1 - контрольний (тісто, виготовлене за класичною технологією); 2, 3, 4 – з додаванням добавки 3%, 1%, 6% до маси борошну відповідно.

При обробці результатів експерименту отримали залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву:

$$\eta_{E\Phi} = a \cdot e^{\frac{b}{\dot{\gamma}+c}}, \quad (6.5)$$

де $\eta_{E\Phi}$ - ефективна в'язкість; $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву; a, b, c - емпіричні коефіцієнти.

Для всіх зразків криві залежності напруження зсуву від швидко-

сті зсуву апроксимується функцією закону Гершеля – Балклі:

$$\theta = \theta_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (6.6)$$

де θ - напруження зсуву; θ_0 – границя текучості; k – коефіцієнт кон-
систенції; n – показник текучості.

На рисунках 6.1 та 6.2 зображені криві змінення ефективної в'язкості та напруження зсуву зразків тіста, які отриманні за даними експерименту, зі значеннями параметрів рівнянь для кожного зразку.

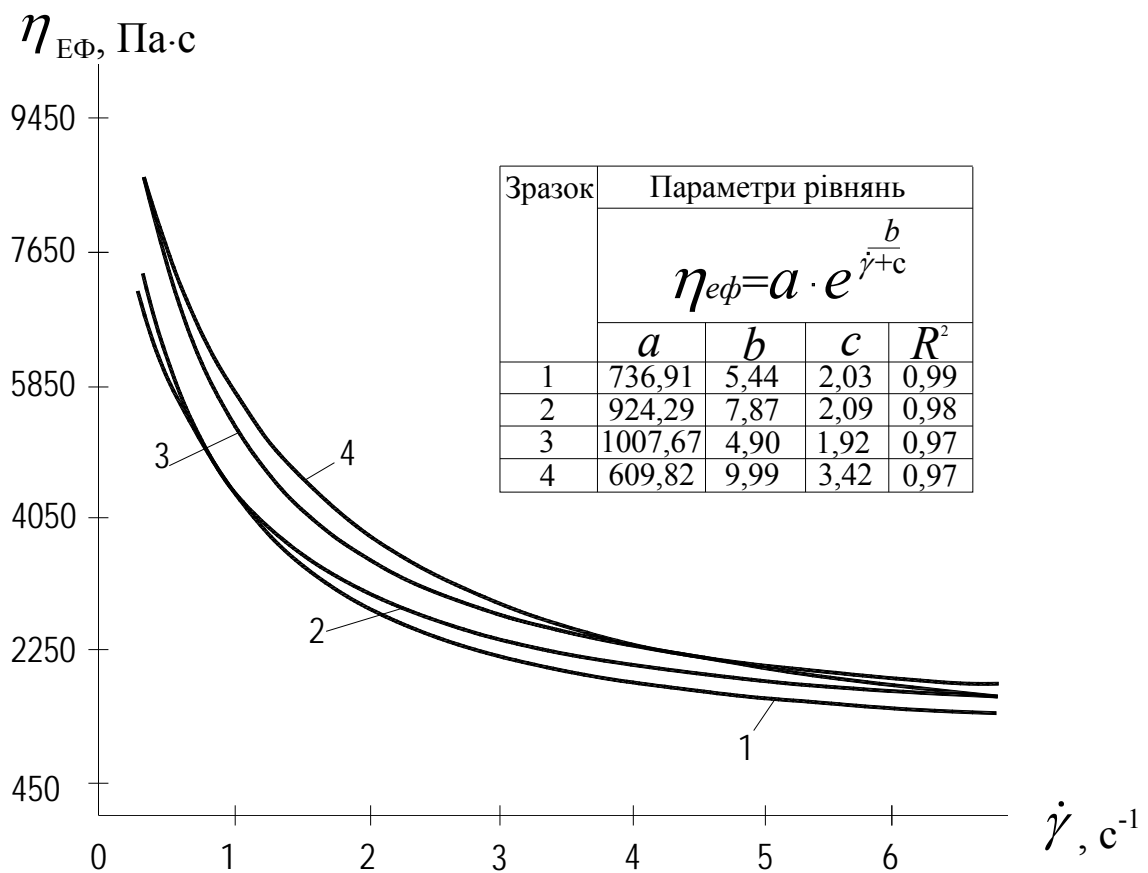


Рисунок 6.1 – Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву:

1 – контрольний зразок; 2, 3, 4 - зразки з додаванням рослинної добавки 3%, 1%, 6% до маси борошна відповідно

Закономірність змінення ефективної в'язкості та напруження зсуву однакова як для тіста, виготовленого за класичною рецептурою так і з додаванням СКД у різному співвідношенні до маси борошна.

Додавання у тісто сухої картопляної добавки незначно впливає

на значення ефективної в'язкості, а значення напружень зсуву у залежності від співвідношення добавки при одній і тій же швидкості зростають. Тобто, зі збільшенням процентного вмісту добавки покращується здатність утримувати форму та міцність структури тіста.

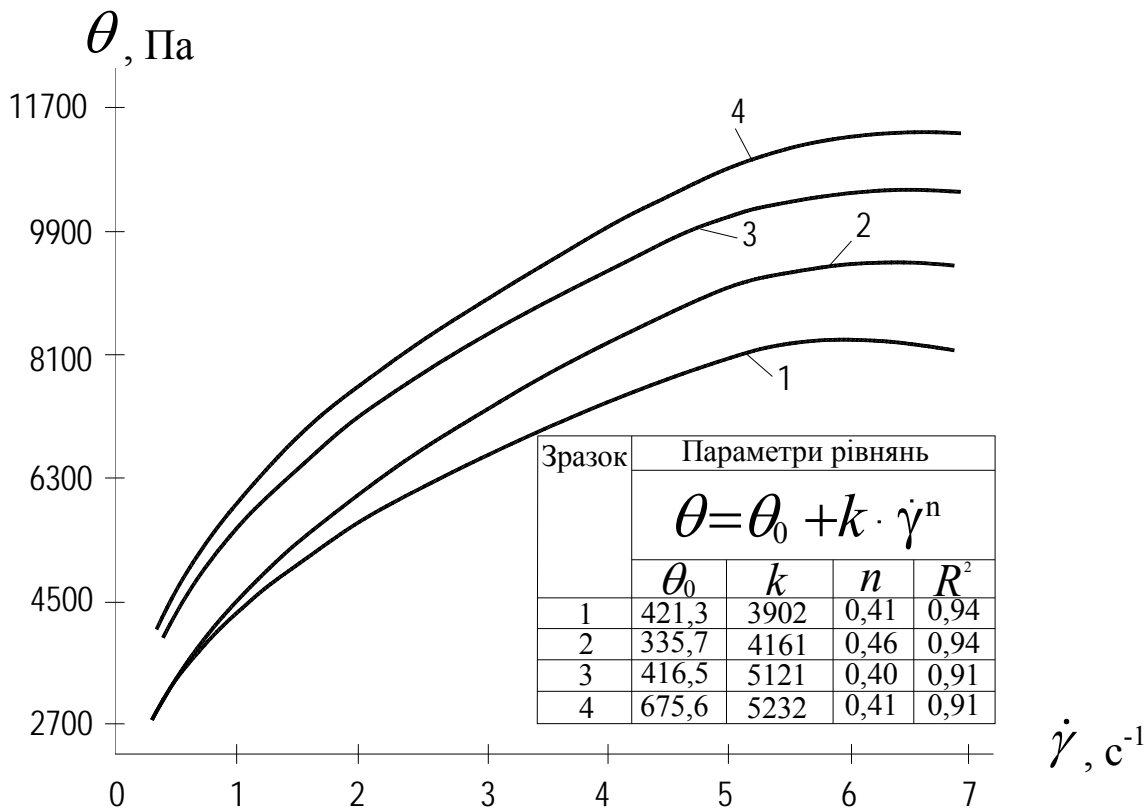


Рисунок 6.2 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву:

1 – контрольний зразок; 2, 3, 4 - зразки з додаванням рослинної добавки 3%, 1%, 6% до маси борошна відповідно

Зі зростанням швидкості зсуву в'язкість падає для всіх зразків. При збільшенні швидкості зсуву до 3 с^{-1} в'язкість зменшується приблизно на 65-70 %, а у діапазоні швидкостей $3 - 6,5 \text{ с}^{-1}$ – на 15 – 20%, досягаючи найменшого значення при швидкості порядку $6,5-7 \text{ с}^{-1}$.

Швидкість змінення значень напруження зсуву найбільша на ділянці змінення швидкостей зсуву також до 3 с^{-1} . При підвищенні швидкості зсуву змінення значень напружень зсуву стають майже постійними. При напруженнях нижче граничного, яке характеризує міцність просторової структури, спостерігається повільна течія типу повзучості. При такій повільній течії структура руйнується, але встигає знову відновлюватися. Ця течія обумовлена практично постійною найбільшою в'язкістю в області малих напружень зсуву.

При підвищенні процентного вмісту СКД збільшуються абсолютні значення величин ефективної в'язкості та напруження зсуву тіста у порівнянні з контрольним зразком.

Отримані результати реологічних досліджень свідчать, що додавання СКД до рецептури дріжджового тіста поліпшує його структурно - механічні показники якості.

Органолептичні показники не змінювалися у залежності від процентного вмісту СКД. Тому вважали оптимальним внесення СКД до рецептури тіста 6%, оскільки це співвідношення покращує газоутворювальну здатність тіста та скорочує тривалість бродіння.

Були проведенні експериментальні дослідження по встановленню зміни напруження зсуву та в'язкості зразків тіста з додаванням СКД у концентрації 6% до маси борошна вищого та I сортів у залежності від тривалості розстоювання.

На рисунках 6.3 – 6.6 наведені криві зміни напруження зсуву у залежності від швидкості зсуву та тривалості розстоювання.

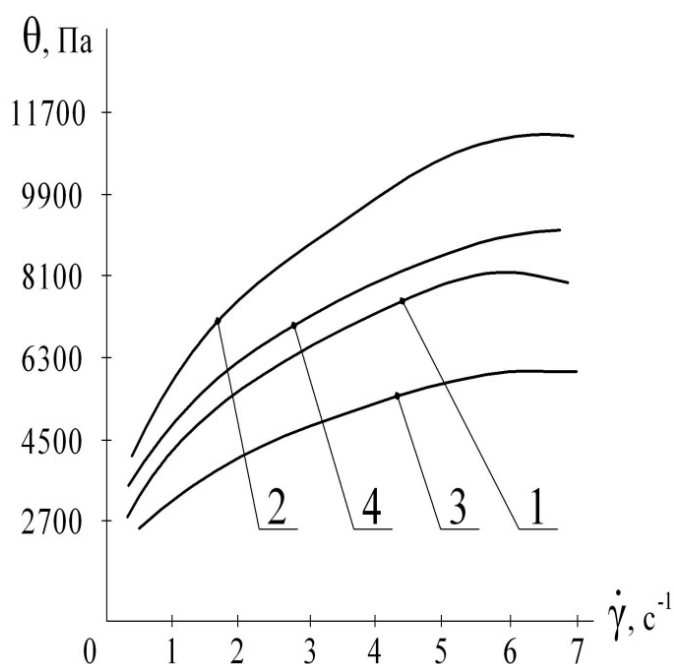


Рисунок 6.3 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву після замісу тіста:

- 1 – контрольний зразок з борошна вищого сорту;
- 2 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна вищого сорту;
- 3 - контрольний зразок з борошна I сорту;
- 4 – зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна I сорту

Характер змінення напруження зсуву для всіх дослідів залишається незмінним, зі збільшенням швидкості зсуву напруження зсуву зростає. Сорт борошна впливає на кількісні значення напруження зсуву, оскільки воно зменшується для тіста з борошна I сорту у порівнянні зі зразками тіста з борошна вищого сорту при будь-якої тривалості розстоювання. Зі збільшенням тривалості розстоювання напруження зсуву також зменшується. При швидкості зсуву $6,5 \text{ c}^{-1}$ значен-

ня напруження зсуву при тривалості розстоювання від 0 до 135 хв зменшуються на 18 %. Вплив тривалості розстоювання та сорту борошна зменшується зі збільшенням швидкості зсуву.

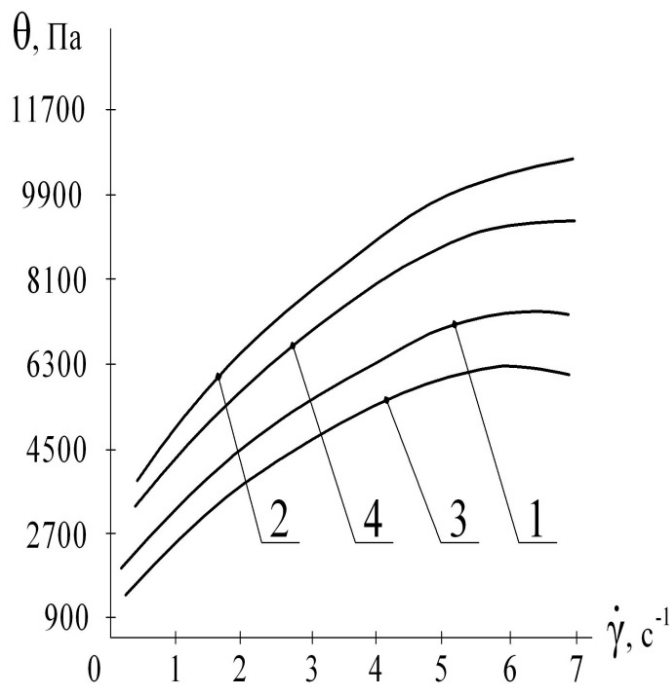


Рисунок 6.4 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву після 45 хв розстоювання тіста:

1 – контрольний зразок з борошна вищого сорту; 2 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна вищого сорту; 3 - контрольний зразок з борошна I сорту; 4 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна I сорту

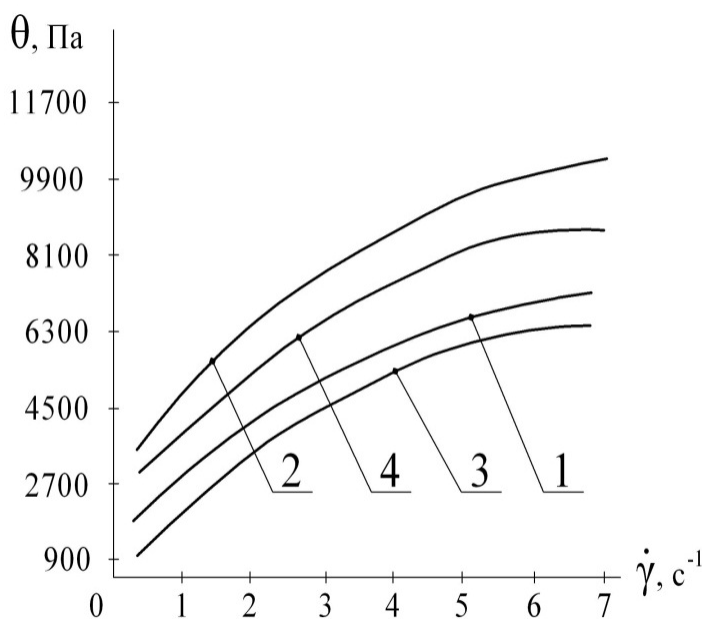


Рисунок 6.5 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву після 90 хв розстоювання тіста:

1 – контрольний зразок з борошна вищого сорту; 2 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна вищого сорту; 3 - контрольний зразок з борошна I сорту; 4 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна I сорту

На рисунках 6.7 – 6.10 наведені криві зміни ефективної в'язкості у залежності від швидкості зсуву та тривалості розстоювання. З графіків видно, що зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість тіста при будь-якої тривалості розстоювання зменшується для всіх зразків. По мірі збільшення часу розстоювання в'язкість також зменшується.

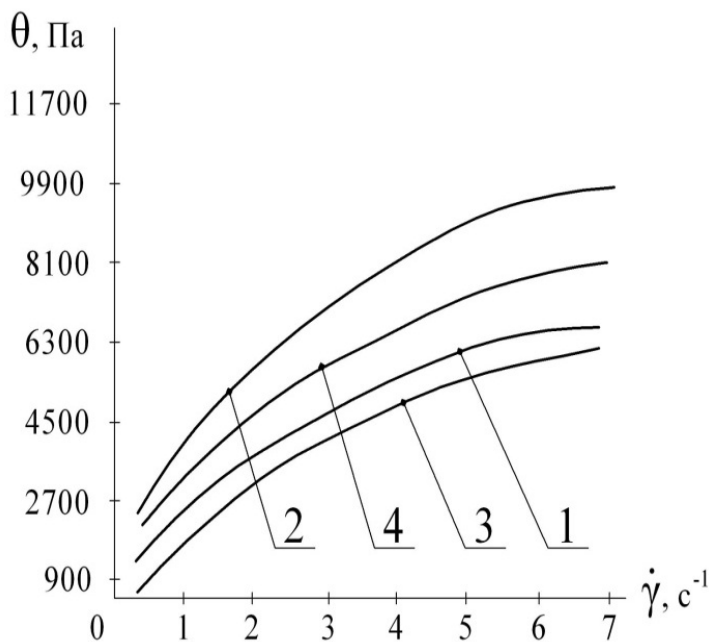


Рисунок 6.6 – Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву після 135 хв розстоювання тіста:

1 – контрольний зразок з борошна вищого сорту; 2 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна вищого сорту; 3 - контрольний зразок з борошна I сорту; 4 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна I сорту

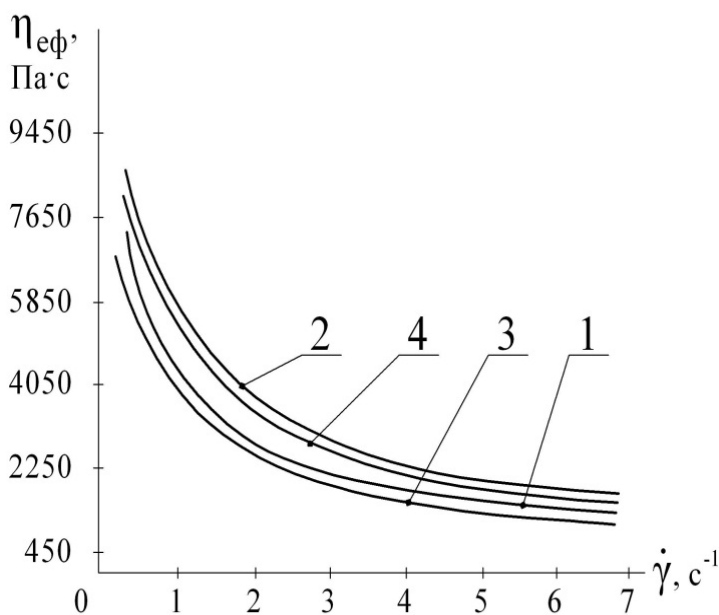


Рисунок 6.7 – Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву після замісу тіста:

1 – контрольний зразок з борошна вищого сорту; 2 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна вищого сорту; 3 - контрольний зразок з борошна I сорту; 4 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна I сорту

Закономірність змінення в'язкості однакова як для контрольних зразків тіста з борошну вищого та I сортів, так і з додаванням СКД.

На віскозиметрі РВ-8 при швидкостях зсуву $0,01-0,1 \text{ c}^{-1}$ визначали характеристики тіста з пшеничного борошна [30].

Обробка результатів експерименту дозволила отримати залежність пластичної в'язкості від вологості:

$$\eta = a_1 \dot{\gamma}^{a_2 W - a_3}, \quad (6.7)$$

де W - вологість (діапазон змінення знаходиться у границях, які ви-

значаються рецептурою відповідних сортів);

a_1, a_2, a_3 - коефіцієнти рівняння, які наведені у таблиці 6.11.

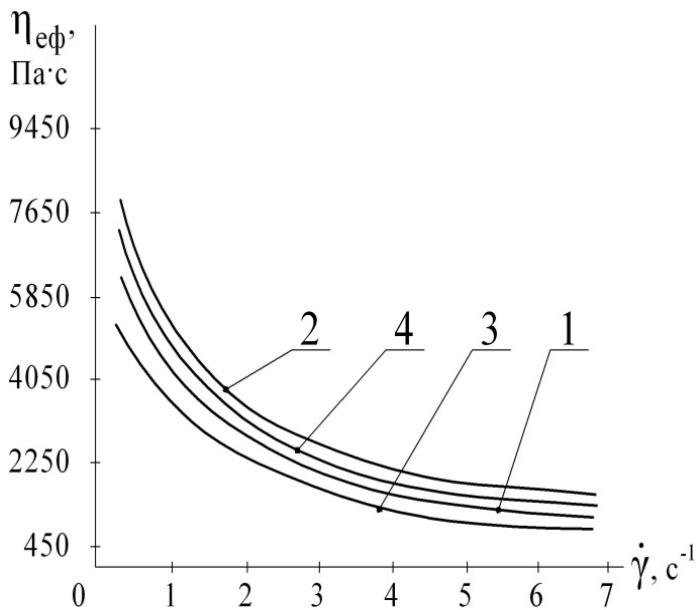


Рисунок 6.8 – Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву після 45 хв розстоювання тіста:

1 – контрольний зразок з борошна вищого сорту; 2 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна вищого сорту; 3 - контрольний зразок з борошна I сорту; 4 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна I сорту

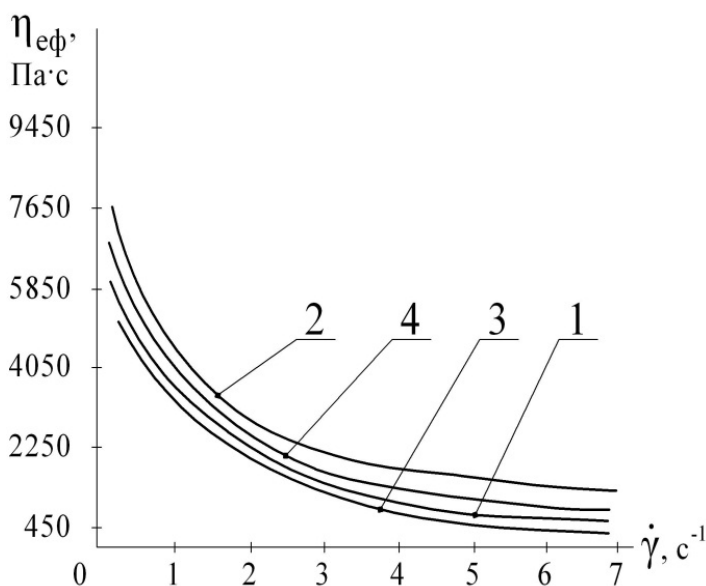


Рисунок 6.9 – Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву після 90 хв розстоювання тіста:

1 – контрольний зразок з борошна вищого сорту; 2 – зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна вищого сорту; 3 - контрольний зразок з борошна I сорту; 4 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна I сорту

Вивчали вплив тиску на ефективну в'язкість хлібопекарного тіста з пшеничного борошна I та II сортів при температурі 30⁰С, використовували ротаційний віскозиметр РМ-1. [30].

Граничне напруження зсуву тіста також залежить від його вологості (таблиця 6.12). Тісто з борошна I сорту мало вологість 0,444 - 0,446 кг/кг, з борошна II сорту – 0,456 - 0,458 кг/кг.

Залежність значень ефективної в'язкості тіста від швидкості зсуву та тиску наведені у таблиці 6.13.

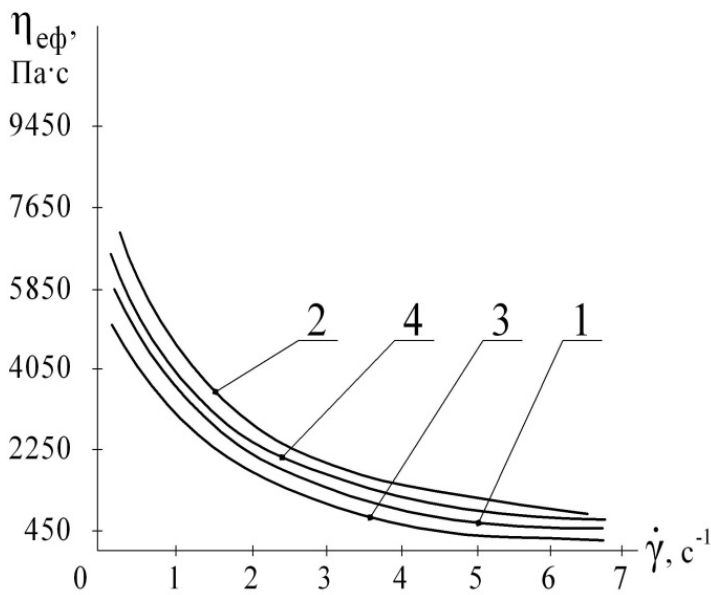


Рисунок 6.10 – Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву після 135 хв розстоювання тіста:

1 – контрольний зразок з борошна вищого сорту; 2 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна вищого сорту; 3 - контрольний зразок з борошна I сорту; 4 - зразок з додаванням СКД 6% до маси борошна I сорту

Таблиця 6.11 – Значення коефіцієнтів до рівняння 6.7

Тісто з борошна	a_1	a_2	a_3
Вищого сорту	8000	2,76	1,83
I сорту	10500	2,90	1,78
II сорту	5800	1,80	1,38

Таблиця 6.12 – Залежність граничного напруження зсуву (Па) від вологості

Вологість тіста кг води на 1 кг тіста	Тісто з борошна		
	Вищого сорту	I сорту	II сорту
0,40	948	458	213
0,44	347	233	92
0,48	139	126	43

Таблиця 6.13 – Залежність ефективної в'язкості $\eta_{EF} \cdot 10^{-2}$ (Па·с) тіста від швидкості зсуву та тиску

Тісто з борошна	Тиск $p \cdot 10^{-5}$, Па	Швидкість зсуву, s^{-1}					
		2	5	10	20	30	40
I сорту	0	10,0	6,2	4,8	3,6	2,8	2,7
	0,98	19,8	12,2	8,8	6,7	5,8	5,2
	1,96	20,2	13,5	10,0	7,5	6,3	6,9
	2,94	24,2	16,0	11,5	8,2	7,0	6,6
II сорту	0	10,0	5,2	4,0	3,0	2,5	2,3
	0,98	16,3	10,5	7,9	5,5	4,8	4,4
	1,96	19,2	12,1	9,5	7,0	5,9	5,4
	2,94	24,1	13,9	10,5	8,0	6,3	6,0

Отримані залежності (рисунки 6.11, 6.12) описуються степенною функцією:

$$\eta_{EF} = \beta \dot{\gamma}^{-b} p^{\alpha}, \quad (6.8)$$

де $\eta_{\text{ЕФ}}$ - ефективна в'язкість, Па·с; P - тиск, Па; b , β , α - емпіричні коефіцієнти.

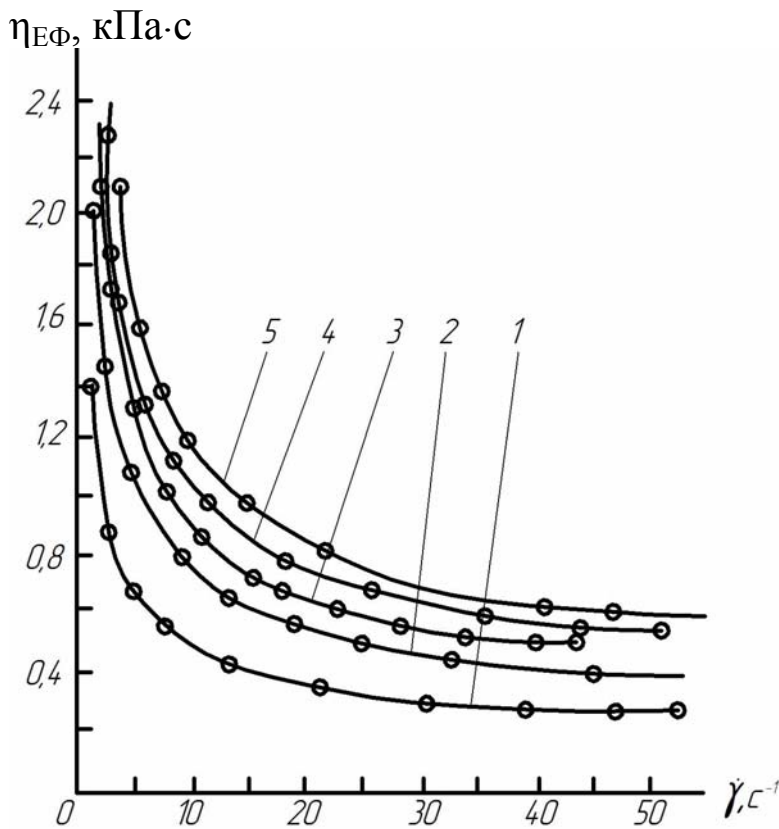


Рисунок 6.11 – Залежність в'язкості хлібопекарного тіста з борошна I сорту від швидкості зсуву при тиску (кПа):

1 – 0; 2 – 49; 3 – 98; 4 – 196; 5 – 294

при швидкості зсуву більш ніж 40 с^{-1} в'язкість тіста змінюється незначно та для практичних цілей може бути прийнята постійною. Надлишковий тиск у тестовій камері не повинен бути нижче 50 кПа, оскільки у протилежному випадку не забезпечується постійність властивостей тіста.

При виробництві хлібобулочних виробів протягом технологічного процесу тісто з боку робочих органів машин піддається механічному діянню. З ціллю з'ясування впливу окремих машин (тістомісильної, машини для ділення тіста, машини для розкочування тіста та інших) на фізико – механічні властивості тіста були проведені експерименти на шарометрі КП – 3. Експерименти здійснювали з тістом, отриманим у виробничих умовах, з борошна II, I та вищого сортів.

Для тіста з борошну I сорту $\beta=178 \text{ с}^2$, $\alpha=0,224$; для тіста з борошну II сорту $\beta=82 \text{ с}^2$, $\alpha=0,28$. Рівняння (6.8) справедливе для тиску від 20 до 300 кПа та швидкості зсуву $1-40 \text{ с}^{-1}$.

З розгляду залежностей слідує, що у даному діапазоні швидкостей за характером змінення в'язкості можна виділити три інтервали.

Перший (до 20 с^{-1}) характеризується різким зменшенням в'язкості зі збільшенням швидкості зсуву, другий інтервал (від 20 до 40 с^{-1}) відрізняється значно меншими зміненнями в'язкості, у третьому інтервалі

Вологість тіста з борошна II сорту складала 45,3%, з борошна I сорту – 41,5%, з борошна вищого сорту – 41,7%.

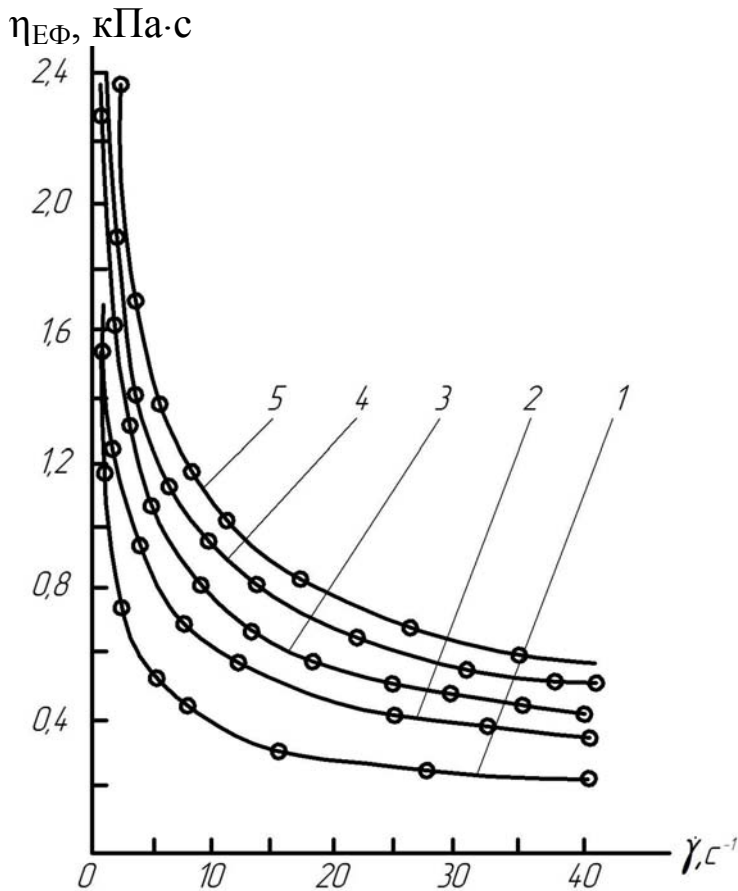


Рисунок 6.12 – Залежність в'язкості хлібопекарного тіста з борошна II сорту від швидкості зсуву при тиску (кПа):

1 – 0; 2 – 49; 3 – 98; 4 – 196; 5 - 294

до 0,148 МПа. Зі збільшенням кількості розкаток θ_0 спочатку підвищується (до трьохкратної розкатки), а потім знижується.

Визначали граничне напруження зсуву для тіста булочок столичної та кунцевської на пенетрометрі 35П [30]. Кінетику занурення конуса в тісто записували на приборі ДС1 – 03 в координатах «глибина утискування – час». Як видно з таблиці 6.14, граничне напруження зсуву тіста для булочки «Столичної» вище, ніж для «Кунцевської», оскільки це залежить від способу виготовлення та його рецептури.

Досліджували змінення граничного напруження зсуву тіста з різним вмістом цукру та жиру в процесі бродіння.

Результати випробувань показали, що машинна обробка тіста впливає на його граничне напруження зсуву. Тісто після замісу мало граничне напруження від 0,19 до 0,23 МПа, після машини для ділення – від 0,17 до 0,21 МПа. Максимального значення θ_0 досягає після машини для розкочування тіста (від 0,198 до 0,26 МПа). Після кінцевого розстоювання θ_0 зменшується до границь від 0,133 до 0,156 МПа. Зі збільшенням тривалості розстоювання відбувається зниження θ_0 .

Якщо для тіста після однократної розкатки θ_0 дорівнює 0,214 МПа, то після розстоювання протягом 90 хвилин воно падає

Таблиця 6.14 – Змінення граничного напруження зсуву тіста (θ_0) в процесі його обробки

Стадія технологічного процесу	Булочки	
	Столична	Кунцевська
Заміс	995	415
Бродіння	773	377
Розділка	1177	768
Розстойка	449	380

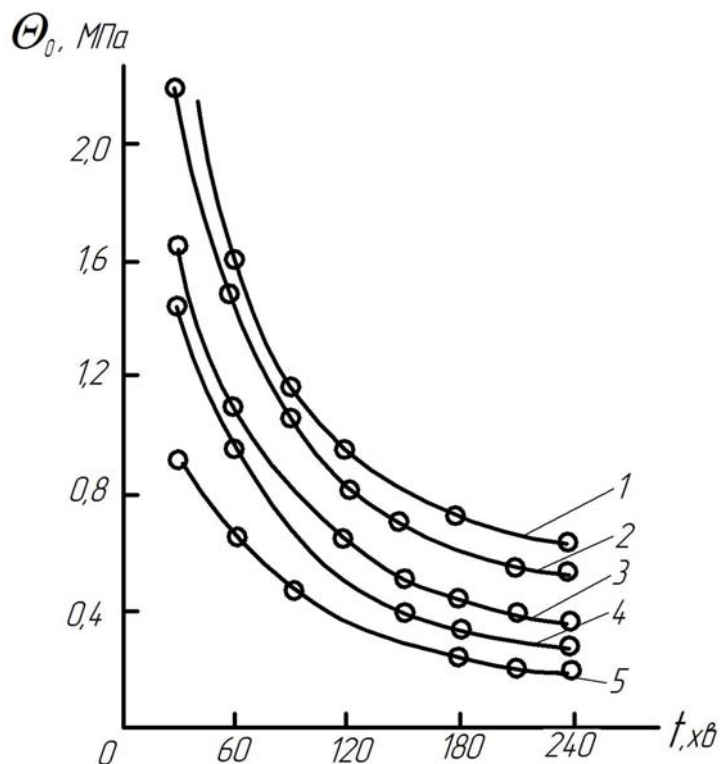


Рисунок 6.13 – Змінення граничного напруження зсуву тіста в процесі бродіння при вмісті (в %) цукру :

1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20

ження зсуву тіста, яке містить від 0 до 20% цукру та жиру, при тривалості бродіння від 0,5 до 4 годин. Коефіцієнти рівняння наведені у таблиці 6.15.

На пенетрометрі AP 4/1 вивчений вплив тривалості розстоювання на граничне напруження зсуву при вологості тіста 39,5; 40,5; 41% та температурі 27, 30, 33⁰С.

Готували тісто з борошна вищого сорту з постійною вологістю 39% та вмістом цукру та жиру 0, 5, 10, 15 і 20% по відношенню до маси борошна. З рисунків 6.13, 6.14 видно, що підвищення кількості цукру та жиру в тісті значно знижує граничне напруження зсуву.

В процесі бродіння при будь – якому вмісті цукру та жиру значення θ_0 знижуються. Найбільше зниження відбувається за перші 2 години.

Наприклад, при 10% жиру після 2 годин бродіння θ_0 зменшується у 3 рази в порівнянні з тістом без доданків, а при 20% жиру – майже у 5 разів.

Обробка експериментальних даних дозволила запропонувати рівняння:

$$\theta_0 = At^{-B}, \quad (6.9)$$

Воно дає змогу визначити граничне напру-

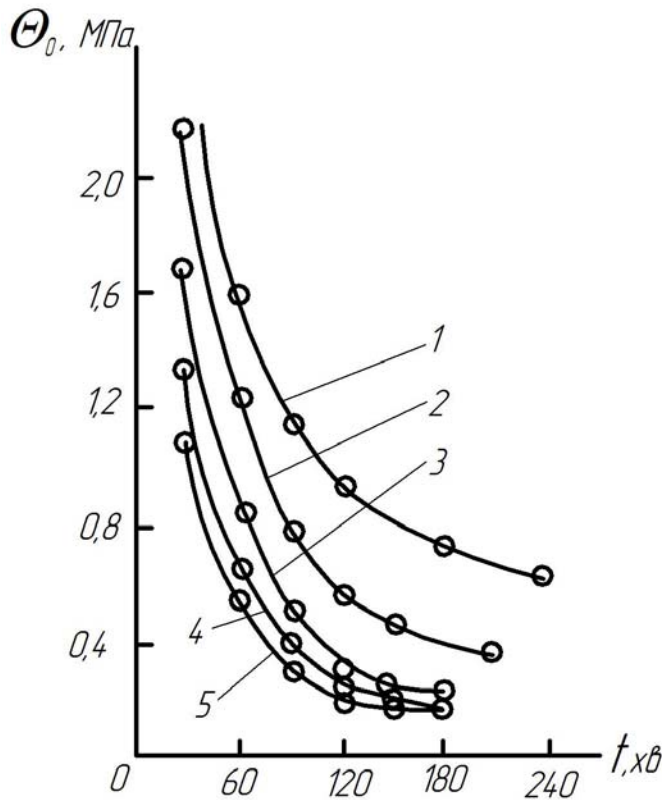


Рисунок 6.14 – Змінення граничного напруження зсуву тїста в процесі бродіння при вмісті (в %) жиру

1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20

Таблиця 6.15 – Коефіцієнти рівняння (6.9)

Коефіцієнт	Вміст цукру або жиру, %				
	0	5	10	15	20
Тїсто з цукром					
$A \cdot 10^{-4}$	3,6	2,8	2,0	1,6	1,1
B	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70
Тїсто з жиром					
$A \cdot 10^{-4}$	3,6	6,3	7,4	5,0	4,7
B	0,74	1	1,1	1,1	1,1

Експерименти проводилися на ротаційному віскозиметрі РМ-1. Криві залежності $\eta_{E\Phi} = \eta_{E\Phi}(\dot{\gamma})$ мають вигляд, характерний для більшості сортів тїста з борошна.

Встановлено, що оптимальна тривалість розстоювання, яка забезпечує найліпшу якість готової продукції, для тїста вологістю 39,5, 40,5 та 41% відповідно складає 80, 60 та 50 хв. При цьому граничне напруження зсуву - 144, 148 та 150 Па. Для тїста різної температури оптимальна тривалість розстоювання 40, 60 і 80 хв. При 33, 30 і 27⁰С відповідно граничне напруження зсуву - 142, 148 і 140Па.

Досліджувалась в'язкість хлібопекарного тїста з житнього борошна вологістю 0,45-0,51 кг/кг та 0,48-0,53 кг/кг [30]. Змінення реологічних показників для цих продуктів наведені у таблицях 6.16 та 6.17.

Реологічні властивості тїста у значної мірі залежать як від його рецептурного складу, так і точності дозування сировини.

Вивчали вплив погрішності дозування окремих компонентів (борошно, цукрово-сольовий розчин, дріжджовий розчин та розтопленний жир) на тїсто для хрустких хлібців [30].

Таблиця 6.16 – Значення реологічних показників житньої головки при бродінні

Пластична в'язкість (Па·с) при тривалості бродіння, хв.						Граничне напруження зсуву (Па) при тривалості бродіння, хв					
0	30	75	110	175	240	0	30	75	110	175	240
-	955	945	840	510	382	-	114	97	90	82	78
-	889	781	564	374	350	-	104	89	80	67	56
-	747	554	468	562	336	-	97	82	72	56	52
688	640	519	430	315	282	62	59	51	46	45	45
536	513	416	352	291	256	26	22	16	15	15	15

Таблиця 6.17 – Значення реологічних показників житнього тіста при бродінні

Вологість, кг/кг	Пластична в'язкість (Па·с) при тривалості бродіння, хв				Граничне напруження зсуву (Па) при тривалості бродіння, хв			
	0	25	55	90	0	25	55	90
0,48	-	586	562	541	-	74,5	59,5	45,0
0,49	575	538	423	364	65,0	59,5	45,0	30,0
0,50	457	404	274	234	47,5	45,0	35,0	15,0
0,51	-	300	185	136	-	30,0	15,0	7,5
0,52	386	287	167	118	27,0	22,0	15,0	7,5
0,53	-	152	119	92	-	10,5	7,5	7,5

Як показали результати досліджень, зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість тіста зменшується, аналогічний результат отримували при збільшенні кількості жиру, цукрово-сольового та дріжджового розчинів і зменшенні кількості борошна (підвищенні вологості тіста).

Обробка даних

Таблиця 6.18 – Коефіцієнти рівняння (6.10)

Компонент тіста	Вміст компоненту, %	Вологість, %	Коефіцієнти	
			<i>a</i>	<i>b</i>
Жир	-25,0	-	0,030	0,097
	Норма	-	0,039	0,117
	+25	-	0,049	0,131
Мука	+25,0	34,0	0,018	0,062
	Норма	38,0	0,037	0,119
	-25,0	41,7	0,080	0,636
Дріжджовий розчин	-25,0	36,5	0,023	0,084
	Норма	38,0	0,039	0,017
	+25,0	39,4	0,052	0,215
Цукрово-сольовий	-25,0	37,0	0,053	0,097
	Норма	38,0	0,036	0,125

показала, що отримані залежності можуть бути описані рівнянням:

$$\eta_{E\Phi} = 1/(a + b\dot{\gamma}), \quad (6.10)$$

де *a* та *b* - емпіричні коефіцієнти, які залежать від процентного вмісту компонентів та вологості тіста (таблиця 6.18).

Для з'ясування впливу точності дозировки компонентів на консистенцію тіста для хрустких хлібців були зроблені опити на конічному шарометрі КП-3 [30]. Результати наведені на рисунку 6.15, де пряма 3 - номінальна дозировка цукрово – сольового розчину, прямі 1 і 2 – на 25 та 12,5% більше, а прямі 4 і 5 – на 25 та 12,5% менше.

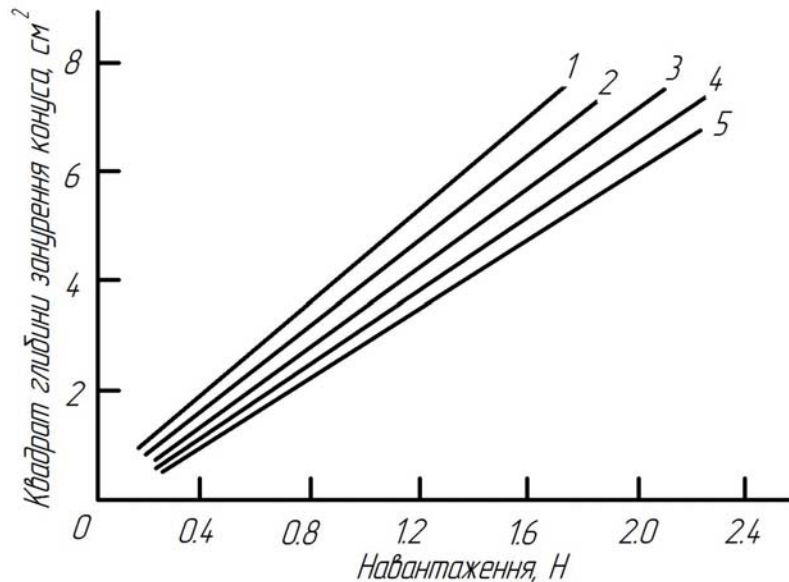


Рисунок 6.15 – Залежність глибини занурення конуса від навантаження при зміні кількості цукрово – сольового розчину

Як видно з графіку, при збільшенні кількості розчину в умовах постійного навантаження зростає глибина занурення конусу, що пояснюється зменшенням граничного напруження зсуву. При цьому відбувається зміння вологості тіста: для прямої 3 - 37,7%, 1 – 38,4; 5 – 36,8. Прямі проходять або через початок координат, або поблизу, що свідчить про інваріантність питомого опору P/h^2 .

Залежність граничного напруження зсуву тіста від дозировки цукрово – сольового розчину має лінійний характер. Зі збільшенням кількості розчину θ_0 зменшується. Це пояснюється не тільки підвищенням вологості тіста, але і збільшенням вмісту цукру. Додавання цукру та жиру, які є пластифікаторами тіста, знижує його в'язкість та пружність. Ця залежність описується рівнянням:

$$\theta_0 = 1050 - 5,77V, \quad (6.11)$$

де θ_0 - граничне напруження зсуву, Па; V - об'єм цукрово – сольового розчину, см^3 .

Величина θ_0 зменшується також зі збільшенням кількості дріжджової суспензії. Ця залежність описується рівнянням:

$$\theta_0 = 2000 - 6,54V_D, \quad (6.12)$$

де V_D - об'єм дріжджової суспензії, см³.

Рівняння (6.11) та (6.12) справедливі для тіста хрустких хлібців при температурі 28⁰С.

Для багатьох матеріалів між в'язкістю та температурою спостерігається експоненціальна залежність. Залежність $\eta_{E\Phi}(\dot{\gamma}, T)$ бубликового, ванільного та цукрового тіста може бути описана виразом:

$$\eta_{E\Phi} = \exp(a_1/T^{a_2}), \quad (6.13)$$

де T - температура, ⁰С, a_1 і a_2 - коефіцієнти, які залежать від швидкості зсуву (таблиця 6.19).

Таблиця 6.19 – Значення коефіцієнтів до рівняння (6.13) при тиску $14,7 \cdot 10^5$ Па

Тісто для бубликів	Швидкість зсуву с ⁻¹	a_1	a_2
Ванільних (вологість 0,31 кг/кг)	0,1	0,967	0,106
	0,2	1,020	0,149
	0,3	1,054	0,175
	0,35	1,062	0,182
Цукрових (вологість 0,304 кг/кг)	0,1	1,118	0,198
	0,3	1,140	0,225
	0,6	1,166	0,257
	0,8	1,061	0,198
	1,0	1,000	0,194

Дослідження реологічних властивостей бубликового тіста показало, що величини всіх характеристик (в'язкості, граничного напруження зсуву, модулів пружності зсуву та еластичності) з підвищенням температури знижуються, особливо в інтервалі від 30 до 40⁰С. Змінення в'язкості у цьому діапазоні при всіх швидкостях майже у 2 рази більш, ніж при підвищенні температури від 40 до 60⁰С. Це суттєво, оскільки формування виробів ведеться при температурі 30-35⁰С.

Вплив температури суттєво зростає зі збільшенням швидкості зсуву. При швидкості 0,1 с⁻¹ в'язкість при підвищенні температури від 30 до 60⁰С падає в 2,8 рази, а при швидкості 0,35 с⁻¹ при тому же інтервалі температур в'язкість зменшується в 5,5 разів.

При збільшенні температури зменшуються і інші реологічні характеристики: модулі пружності G_1 та еластичності G_2 , граничне напруження зсуву θ_0 (таблиця 6.20).

Таблиця 6.20 - Залежність G_1 , G_2 та θ_0 від температури при тиску $14,7 \cdot 10^5$ Па

Вид тіста	T, °C	$G_1 \cdot 10^{-3}$ Па	$G_2 \cdot 10^{-3}$ Па	θ_0 , Па
Бубликове цукрове з борошна вищого сорту (вологість 0,304 кг/кг)	30	455	302	4400
	40	245	112	3000
	60	141	76	1450
Бубликове ванільне (вологість 0,32 кг/кг)	30	257	248	2900
	40	216	129	2050
	60	124	104	1450
Бубликове з борошна I сорту (вологість 0,34 кг/кг)	30	209	97	2800
	40	125	60	-
	60	119	45	1010

Таблиця 6.21 – Значення G_1 , G_2 та θ_0 у залежності від виду тіста та його вологості

Вид тіста	W, кг/кг	$G_1 \cdot 10^{-3}$ Па	$G_2 \cdot 10^{-3}$ Па	θ_0 , Па
Бубликове	0,284	532	457	2640
Цукрове з борошна вищого сорту	0,304	435	455	2920
	0,320	352	302	2390
Бубликове з борошна I сорту	0,291	772	735	3800
	0,308	293	283	1070
	0,320	173	189	660

Як показали дослідження, найбільш сильно на реологічні характеристики впливає змінення температури у діапазоні 30-40 °C. В'язкість тіста при всіх значеннях вологості зменшується з підвищенням швидкості зсуву, при тому більш інтенсивно у зразків з меншим вмістом вологи. При збільшенні вологості тіста величини η_{EF} , G_1 , G_2 та θ_0 знижуються, що наведено у таблиці 6.21.

Для бубликового тіста особливо помітне змінення модулів спостерігається при зміненні вологості від 29,1%

до 30,8%. При цьому модуль пружності зменшується у 1,93 рази, а модуль еластичності – у 3,55 разів. Тобто, при технологічній обробці тіста недоцільно зменшувати його вологість нижче 30,5%

Граничне напруження зсуву також зменшується при збільшенні вологості тіста: при зміненні вологості бубликового цукрового тіста з 28,4 до 32% воно зменшується в 1,5 разів. Був досліджений також вплив рецептури тіста на його реологічні властивості (рисунок 6.16).

Вміст цукру та жиру впливає на в'язкість тіста. У бубликового тіста граничне напруження зсуву дорівнює 1,73 кПа, у ванільного тіста - 2,93 кПа, а у цукрового – 3,52 кПа.

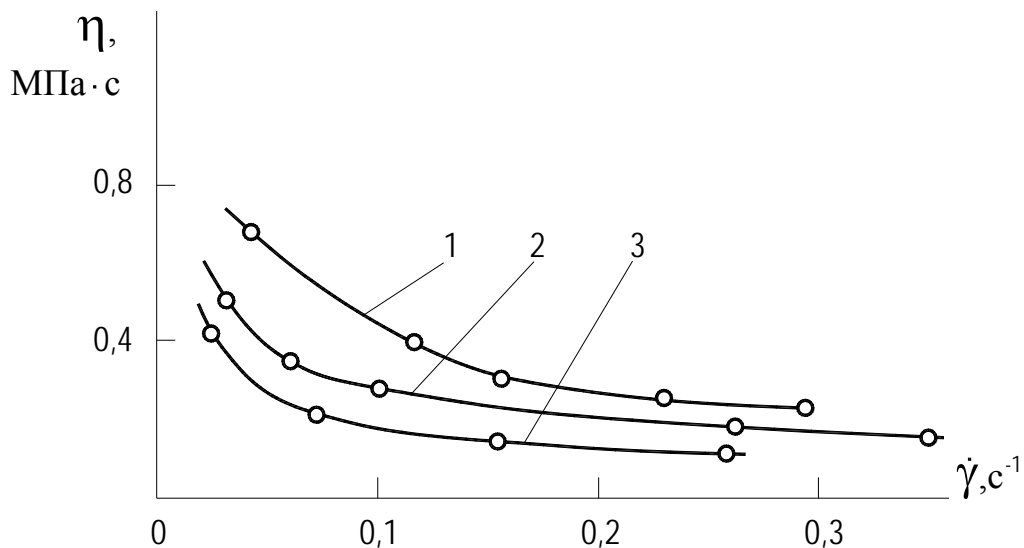


Рисунок 6.16 – Вплив рецептури на в'язкість бубликового тіста (температура 30⁰С, вологість 32%, тиск 1,5 МПа):

1 – для цукрових бубликів; 2 – для ванільних бубликів;
3 – для українських бубликів

Коливання величини граничного напруження зсуву в залежності від рецептури тіста значні; у бубликового тіста воно більш у 2 рази ніж у цукрового при однакової вологості, температурі, тиску, часу відлежи.

На реологічні властивості тіста впливає тривалість відлежи, яка обмежується моментом, коли тісто після замісу знаходиться в спокої до початку розділки. Під час відлежи завдяки бродінню в'язкість, модулі пружності та еластичності бубликового тіста зменшуються (таблиці 6.22 та 6.23).

Залежність граничного напруження зсуву від вологості цукрового тіста та тривалості його витримки після замісу визначали з використанням конічного шарометру КП – 3. В дослідях вологість тіста змінювали від 15,9 до 21,6%, випробування проводили після замісу. Отриманні дані наведені у таблиці 6.24. На значення θ_0 оказує вплив тривалість витримки цукрового тіста після замісу: зі збільшенням витримки до 25 хв θ_0 підвищується, а потім залишається постійним.

Були дослідженні характеристики бубликового тіста різних сортів при тисках від атмосферного до 2,5 МПа, тобто в межах тисків, які діють на масу при формуванні бубликових виробів [30].

Таблиця 6.22 – В'язкість бубликового тіста (температура 30 °С, вологість 0,32 кг/кг, тиск 14,7·10⁵ Па)

Ванільне бубликове тісто			Цукрове бубликове тісто		
Тривалість відлежи, хв.	Швидкість зсуву, с ⁻¹	В'язкість $\eta_{EF} \cdot 10^{-6}$, Па·с	Тривалість відлежи, хв	Швидкість зсуву, с ⁻¹	В'язкість $\eta_{EF} \cdot 10^{-6}$, Па·с
15	0,0158	1,320	15	0,0189	1,330
	0,1720	0,261		0,1330	0,540
	0,2470	0,232		0,2690	0,325
50	0,0465	0,570	30	0,0042	0,670
	0,1980	0,250		0,1550	0,315
	0,2850	0,208		0,2250	0,268
70	0,0840	0,386	50	0,0315	0,835
	0,3400	0,148		0,1470	0,314
	0,4290	0,142		0,2500	0,243

Таблиця 6.23 – Залежність модулів пружності та еластичності від тривалості відлежи та виду тіста

Вид тіста	Тривалість відлежи, хв..	Модуль пружності зсуву, кПа	Модуль еластичності зсуву, кПа
Бубликове цукрове з борошна вищого сорту	15	440	243
	30	302	239
	50	392	182
Бубликове ванільне	15	404	270
	50	388	189

Таблиця 6.24 – Залежність граничного напруження зсуву від температури та вологості цукрового тіста

Температура тіста, °С	Вологість тіста, %	Граничне напруження зсуву, кПа
25	15,9	19,24
	18,3	9,41
24	17,2	11,58
	17,8	10,87
	21,6	7,93

Отриманні результати показали, що в'язкість з підвищенням тиску зростає неоднаково для різних сортів. Якщо порівняти змінення в'язкості при одній швидкості зсуву, наприклад 0,2 с⁻¹, то відмічаються наступні закономірності: у бубликовому тісті при збільшенні тиску від 0 до 2,45 МПа, в'язкість збільшилася на 20 кПа·с, у ванільному бубликовому при тому же самому перепаді тисків – на 100 кПа·с, у бубликовому цукровому – на 130 кПа·с.

Залежність в'язкості від тиску при різних швидкостях зсуву для

бубликового тіста має лінійний характер, та описується рівнянням:

$$\eta_{E\Phi} = ap + b, \quad (6.14)$$

де $\eta_{E\Phi}$ - в'язкість, МПа·с; p - тиск, Па; a та b - коефіцієнти, які залежать від швидкості зсуву.

Рівняння (6.14) справедливе для бубликового тіста вологістю 33,5% при температурі 30⁰С у інтервалі тисків від 0 до 2,45 МПа та швидкостей зсуву від 0,05 до 0,5 с⁻¹.

Тиск впливає не тільки на в'язкість, але і на інші реологічні характеристики бубликового тіста, що наведено у таблиці 6.25.

Таблиця 6.25 – Значення G_1 , G_2 , θ_0 у залежності від виду тіста та його вологості

Вид тіста	Тиск $p \cdot 10^{-5}$, Па	Модуль пружності зсуву $G_1 \cdot 10^{-3}$, Па	Модуль еластичності $G_2 \cdot 10^{-3}$, Па	Граничне напруження зсуву θ_0 , Па
Бубликове цукрове з борошна вищого сорту	4,9	308	210	2060
	14,7	302	239	3520
	24,5	405	324	5230
Бубликове ванільне	0	354	158	1790
	24,5	436	179	2930
Бубликове з борошна I сорту	0	124	66	300
	14,7	209	97	1140
	24,5	268	110	2800

З таблиці видно, що зі збільшенням тиску граничне напруження зсуву збільшується для всіх сортів тіста. При всіх інших параметрах (температура, вологість, тривалість відлежи), які залишаються постійними для даних досліджень, граничне напруження зсуву при збільшенні тиску від 0 до 2,45 МПа для бубликового цукрового тіста збільшується приблизно у 3 рази, а для бубликового тіста з борошна I сорту при аналогічних умовах – майже у 9 разів.

Величини модулів пружності зсуву та еластичності зі збільшенням тиску зростають, але неоднаково для різних сортів тіста.

При зростанні тривалості відлежи бубликового тіста величини всіх фізико - механічних характеристик зменшуються.

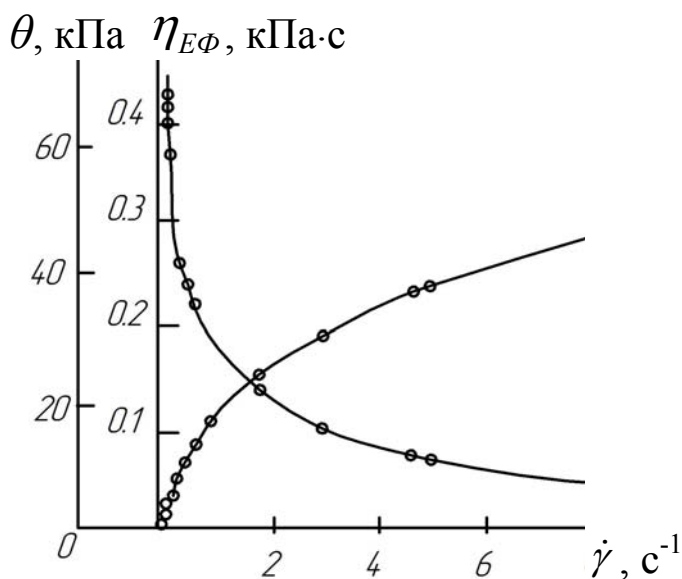


Рисунок 6.17 - Залежність напруження зсуву (крива 1) та в'язкості (крива 2) тіста для пряників від швидкості зсуву

ні тиску від 0 до 300 кПа; подальше збільшення тиску впливає незначно. Змінення вологості від 15,2 до 17,8% не впливає на характер залежностей напруження зсуву та в'язкості від швидкості зсуву.

Вивчення впливу температури у діапазоні від 22 до 35⁰С показало, що її збільшення не тільки знижує в'язкість тіста, але і змінює характер течії тіста. Характер отриманих залежностей дозволяє віднести тісто для пряників до псевдопластичних рідин.

Таблиця 6.26 – Залежність коефіцієнта консистенції від тиску та температури при вологості тіста 16,7%

Тиск, МПа	Температура, ⁰ С				
	15	20	25	30	35
0,05	6,7	5,8	4,8	3,6	3,0
0,1	7,2	6,3	5,3	4,1	3,4
0,2	7,6	6,7	5,8	4,6	4,0
0,3	7,9	7,0	5,9	4,8	4,2
0,4	8,0	7,1	6,0	5,0	4,3
0,5	8,1	7,1	6,2	5,0	4,4
0,6	8,1	7,1	6,2	5,0	4,4

Реологічні характеристики тіста для пряників проводили на ротаційному віскозиметрі РМ-1 [30]. На рисунку 6.17 зображені криві течії тіста вологістю 17% при атмосферному тиску та температурі 28⁰С. При швидкості зсуву 0,08 с⁻¹ починається руйнування структури тіста, при зменшенні швидкості структура повністю відновлюється.

Збільшення в'язкості з підвищенням тиску відбувається нерівномірно. Найбільш інтенсивно в'язкість збільшується при підвищенні

Дані, наведені у таблиці 6.26, показують, що коефіцієнт консистенції збільшується з підвищенням тиску, при тиску більш, ніж 0,4 МПа коефіцієнт стає практично постійним; з підвищенням вологості тіста його значення зменшується.

Як видно з таблиці 6.27, при збільшенні тиску та температури індекс течії зростає; температура впливає більш суттєво; а воло-

гість не впливає. Дослідження дозволяють зробити висновок, що в'язкість тіста для пряників змінюється у границях від 20 до 500 кПа·с, збільшується при підвищенні тиску, зниженні вологості та температури. Напруження зсуву тіста змінюється від 150 до 6000 кПа, збільшується при підвищенні тиску та зменшенні температури та вологості.

Дослідження реологічних характеристик тіста для макаронних виробів проводили на ротаційному віскозиметрі у залежності від технологічних параметрів (t , W) та тиску (до $98 \cdot 10^5$ Па). Аналіз кривих течії макаронного тіста дозволяє віднести його до узагальненого тіла Шведова – Бінгама, зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість макаронного тіста знижується.

У таблиці 6.28 наведені залежності $\eta_{пл}(\dot{\gamma}, T)$ при вологості 30% та тиску $49 \cdot 10^5$ Па.

Таблиця 6.27 – Залежність коефіцієнта консистенції від вологості та температури тіста

Вологість, %	Температура, °C				
	15	20	25	30	35
15,2	10,0	8,7	7,0	5,5	4,8
15,5	9,3	8,0	6,5	5,0	4,3
16,0	8,0	6,8	5,5	4,1	3,5
16,6	6,5	5,4	4,2	3,2	2,6
17,0	5,4	4,4	3,5	2,5	2,0
17,6	3,9	3,1	2,2	1,5	1,0
17,8	3,4	2,7	1,8	1,0	0,6

Таблиця 6.28 – Залежність індексу течії від тиску та температури тіста

Тиск, МПа	Температура, °C				
	15	20	25	30	35
0,1	0,360	0,415	0,470	0,525	0,590
0,2	0,365	0,420	0,475	0,530	0,595
0,3	0,370	0,425	0,480	0,535	0,605
0,4	0,375	0,430	0,485	0,540	0,610
0,5	0,380	0,435	0,490	0,550	0,615
0,6	0,385	0,440	0,500	0,555	0,620

Підвищення температури тіста знижує його в'язкість. З підвищенням швидкості зсуву вплив температури слабшає. При збільшенні температури відбувається зменшення граничного напруження зсуву: при 18°C – 18300 Па, при 40°C – 5600 Па, при 56°C – 2100 Па.

Залежність пластичної в'язкості від швидкості зсуву та вологості тіста наведена у таблиці 6.29. Залежність граничного напруження зсуву при температурі 40°C та тиску $49 \cdot 10^5$ Па від вологості наведена у таблиці 6.30.

Залежність пластичної в'язкості макаронного тіста з борошна I сорту від швидкості зсуву та вологості при температурі 40°C та тиску

49·10⁵ Па наведена у таблиці 6.31.

Таблиця 6.29 – Залежність пластичної в'язкості $\eta_{ПЛ} \cdot 10^{-3}$ (Па·с) макаронного тіста від температури та швидкості зсуву

Температура, °С					
18		40		56	
Швидкість зсуву, с ⁻¹	В'язкість	Швидкість зсуву, с ⁻¹	В'язкість	Швидкість зсуву, с ⁻¹	В'язкість
0,069	1780	0,098	420	0,208	102
0,107	1360	0,280	232	0,552	55
0,189	893	0,530	165	0,860	47
0,365	528	0,890	125	1,230	36
0,607	355	1,440	94	1,720	29

Таблиця 6.30 – Залежність граничного напруження зсуву від вологості

Вологість кг/кг	$\theta_0 \cdot 10^{-3}$ Па
0,281	8,90
0,294	6,55
0,306	4,75
0,316	3,80
0,322	3,00
0,335	2,20

Таблиця 6.31 - Залежність пластичної в'язкості $\eta_{ПЛ} \cdot 10^{-3}$ (Па·с) макаронного тіста з борошна І сорту від швидкості зсуву (с⁻¹) та вологості

Вологість кг води на 1 кг тіста									
0,285		0,300		0,310		0,320		0,330	
$\dot{\gamma}$	$\eta_{ПЛ}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{ПЛ}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{ПЛ}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{ПЛ}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{ПЛ}$
0,033	1210	0,020	1140	0,018	870	0,014	750	0,005	930
0,204	423	0,098	420	0,090	302	0,094	216	0,02	394
0,57	233	0,28	232	0,33	144	0,28	121	0,088	190
0,85	185	0,53	165	0,61	108	0,77	63	0,36	70
1,18	153	0,89	125	1,06	75	1,32	47	0,89	40
1,51	134	1,44	94	1,68	59	1,89	38	1,67	27
1,94	117	2,35	70	2,33	48	2,43	31	2,39	21

Були дослідженні реологічні властивості макаронного тіста при змінненні тиску від 3,5 до 9 МПа. З рисунку 6.18 бачимо, що тиск оказує значний вплив на властивості тіста. Залежність $\eta_{ПЛ} = \eta_{ПЛ}(\rho)$ має лінійний характер у діапазоні змінення швидкості зсуву від 0,13 до 1,16 с⁻¹. При більш високих швидкостях зсуву вплив тиску на в'язкість зменшується. Обробка експериментальних даних дозволила отримати рівняння (6.15) для визначення пластичної в'язкості.

$$\eta_{ПЛ} = a + b\rho, \quad (6.15)$$

де p - тиск; a , b - коефіцієнти, які залежать від швидкості зсуву (таблиця 6.32).

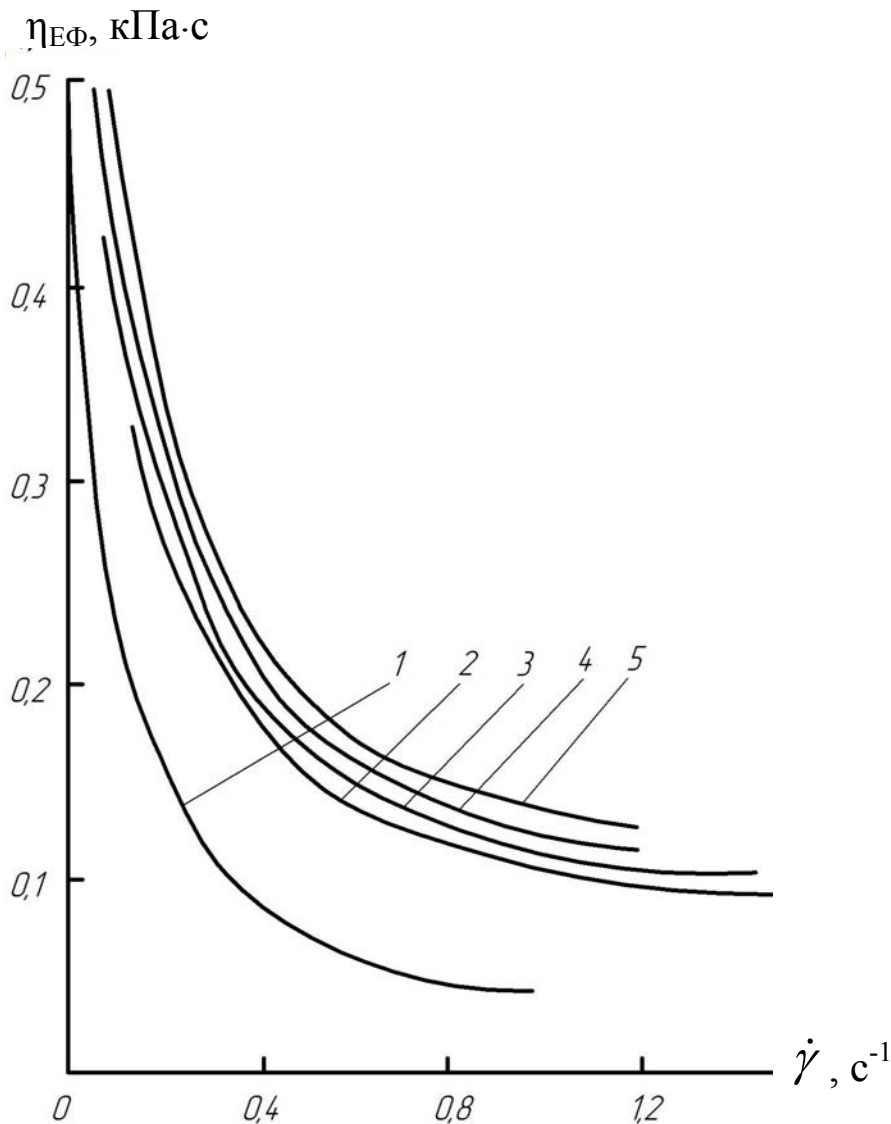


Рисунок 6.18 -
Залежність пластичної в'язкості макаронного тіста від швидкості зсуву при тиску (МПа):
1 – 0;
2 – 3,4;
3 – 4,9;
4 – 6,8;
5 – 8,8

Рівняння отримане для швидкостей зсуву $0,13 - 1,16 \text{ с}^{-1}$ та тисків $3,5 - 9,0 \text{ МПа}$ для тіста вологістю 30% , температурою 40°C .

Граничне напруження зсуву зі збільшенням тиску зростає. Для тіста з борошна I сорту при вологості $0,30 \text{ кг/кг}$ та температурі тіста 40°C θ_0 змінюється, як наведено у таблиці 6.33.

Для розрахунку обладнання макаронного виробництва необхідні відомості про реологічні властивості тіста в умовах вібрації.

Була досліджена поведінка макаронного тіста з пшеничного борошна вищого сорту при діянні вібрації в інтервалі змінення вологості тіста від 30 до 33% при температурі 24°C . Частота коливань $25,5 \text{ Гц}$, амплітуда деформації $0,22$.

Таблиця 6.32 - Значення коефіцієнтів до рівняння 6.15

Швидкість зсуву, с^{-1}	0,13	0,20	0,30	0,60	1,16
$a \cdot 10^{-5}$	2,64	2,11	1,65	1,08	0,72
b	0,021	0,017	0,014	0,008	0,009

Таблиця 6.33 – Залежність граничного напруження зсуву від тиску

$p \cdot 10^{-5}$ Па	34	49	68	88
θ_0 , Па	4300	5600	6050	6350

Опис течії макаронного тіста степеневим рівнянням Оствальда добре погоджується з експериментальними даними [30].

На рисунку 6.19 наведені залежності в'язкості від швидкості зсуву для зразків без вібрації та з вібрацією.

У таблиці 6.34 наведені коефіцієнти рівняння Оствальда у залежності від вологості макаронного тіста та режиму течії.

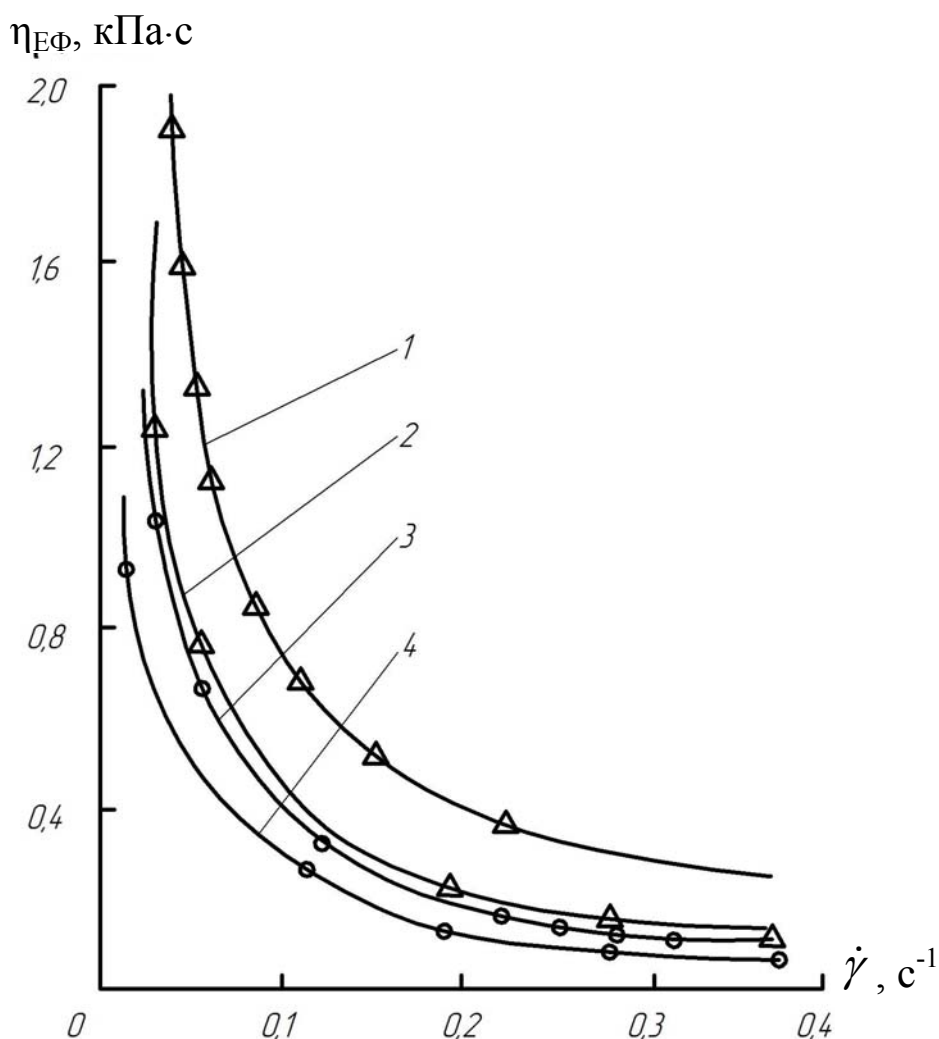


Рисунок 6.19 - Залежність в'язкості макаронного тіста від швидкості зсуву при вологості 30% (криві 1,3) та 33% (криві 2, 4) без вібрації (криві 1, 2) та з вібрацією (криві 3, 4)

Таблиця 6.34 – Коефіцієнти рівняння Оствальдаї

Вологість, %	Режим течії			
	Без вібрації		З вібрацією	
	$K \cdot 10^3$	n	$K \cdot 10^3$	n
30	104,5	0,13	51,6	0,16
31	76,0	0,09	49,8	0,17
32	73,4	0,13	46,1	0,18
33	57,5	0,12	45,7	0,23

Аналіз кривих течії дозволяє зробити висновок, що вібраційне діяння викликає значні зміни в реологічних властивостях макаронного тіста таким чином, що зменшується коефіцієнт консистенції K та збільшується індекс течії n .

При виробці напівфабрикатів з тіста вафель для мороженого використовують рідке тісто без дріжджів та з великою кількістю цукру та молока. Дослідження проводилися на ротаційному віскозиметрі РВ-8 при швидкості зсуву $0,9 \text{ c}^{-1}$, вологості $0,318\text{-}0,443 \text{ кг/кг}$, температурі тіста 40°C [30].

Підвищення вологості та температури веде до зниження в'язкості. Нелінійність отриманих залежностей дозволяє зробити висновок, що тісто володіє аномальною в'язкістю та є неньютонівською рідиною. При швидкостях зсуву до 6 c^{-1} ця залежність описується степеневим законом, вище указанного значення – лінійним.

Обробка експериментальних даних дозволила отримати рівняння, яке описує залежність в'язкості від швидкості зсуву, вологості та температури:

$$\eta_{E\Phi} = 108,8 - 3,985\dot{\gamma} + 0,25\dot{\gamma}^2 + 1,13T - 0,032T^2 - 4,043W + 0,0359W^2. \quad (6.16)$$

Рівняння (6.16) справедливе для наступних інтервалів змінення аргументів: $0,5\text{c}^{-1} \leq \dot{\gamma} \leq 7,0\text{c}^{-1}$, $0,318 \text{ кг/кг} \leq W \leq 0,40 \text{ кг/кг}$, $15^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$.

При розробці систем автоматичного контролю та регулювання технологічних процесів необхідно знати кореляційний зв'язок між окремими параметрами і структурно-механічними характеристиками продукту.

Досліджували в'язкість тіста різної вологості, яке виготовляли з пшеничного борошна вищого та першого сортів. Експерименти проводили з бездріжджовим тістом вологістю від $0,445$ до $0,65 \text{ кг/кг}$ при температурі 30°C . Вибір указанного діапазону пояснюється наступним:

верхня границя 0,445 кг/кг дорівнює прийнятому на хлібозаводі значенню вологості пшеничного тіста з борошна I сорту, нижня границя 0,65 кг/кг обрана у зв'язку з тим, що перспективність способу виготовлення пшеничного тіста на рідинних опарах має ряд переваг.

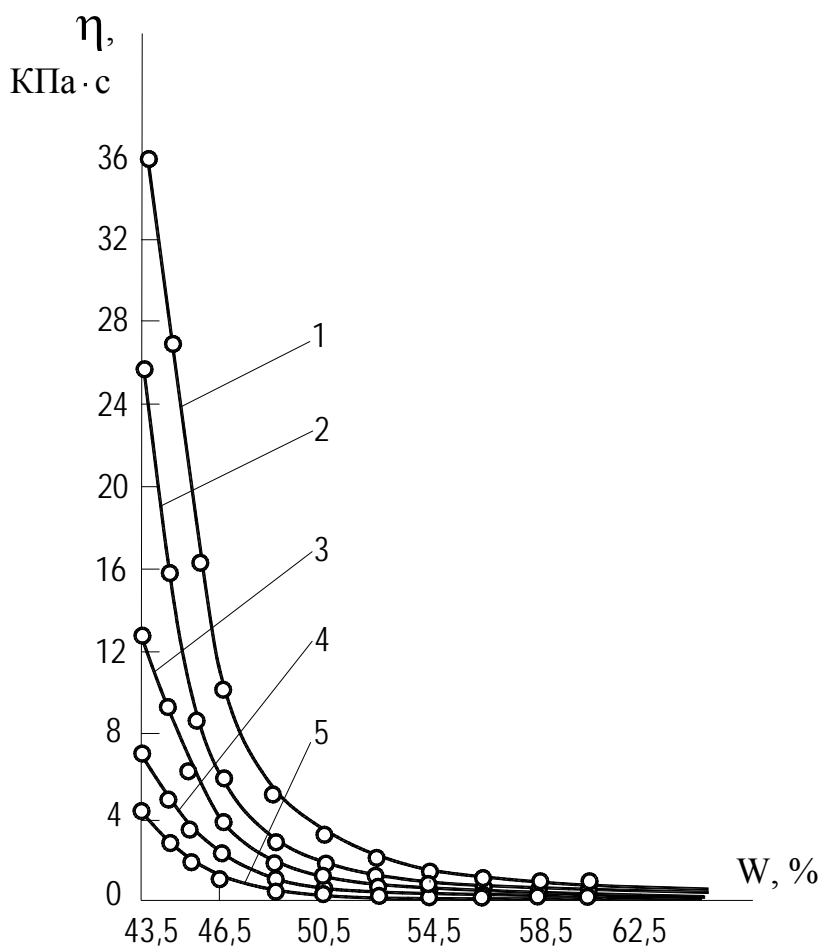


Рисунок 6.20 – Залежність в'язкості тіста з борошна I сорту від його вологості при різних швидкостях зсуву (с^{-1}): 1 – 0,167; 2 – 0,333; 3 – 0,6; 4 – 1,0; 5 – 1,8

Для визначення в'язкості використовували ротаційний віскозиметр «Реотест-RV». Швидкість деформації вимірювали у границях від 0,167 до 1,8 с^{-1} . Результати досліджень наведені на рисунку 6.20.

Графіки показують, що залежності мають експоненціальний характер. Зі збільшенням вологості напівфабрикатів значно знижується їх в'язкість. Для швидкості 0,167 с^{-1} при змінненні вологості від 46 до 50% в'язкість зменшилася приблизно у 3,5 рази. Зі збільшенням швидкості зсуву інтенсивність змінення в'язкості суттєво зменшилася.

Наприклад, при швидкості зсуву 0,167 с^{-1} та змінненні вологості від 46,0 до 65,0% в'язкість зменшилася з 1385 до 42 Па·с, а при 1,8 с^{-1} та такому же змінненні вологості в'язкість знизилася лише від 284 до 20 Па·с, тобто інтенсивність змінення в'язкості зменшилася у 5 разів. Значну роль в цьому грає аномалія в'язкості хлібопекарного тіста.

Обробка отриманих експериментальних даних дозволила запропонувати наступну формулу кореляційного зв'язку:

$$\eta_{E\Phi} = c + e^a W^b, \quad (6.17)$$

де a , b , c - емпіричні коефіцієнти, які мають наступні значення: для тіста з муки I сорту $a=50,26$, $b=-12,47$, $c=0,1$; для тіста з муки вищого сорту $a=52,77$, $b=-13,17$, $c=0,1$.

Це рівняння справедливе при швидкості зсуву від 0,167 до 1 с⁻¹ та вологості тіста від 0,44 до 0,62 кг/кг.

Проведені також дослідження змінення реологічних властивостей бездріжджового тіста вологістю 0,445-0,60 кг/кг при змінненні його температури від 25 до 53⁰С.

Таблиця 6.35 – Залежність напруження зсуву (Па) від температури, швидкості зсуву та вологості тіста

Температура, ⁰ С	Швидкість зсуву, с ⁻¹					
	0,167	0,333	0,6	0,333	0,6	1,0
	Вологість 0,46 кг/кг			Вологість 0,5 кг/кг		
25	2930	3880	4710	1780	2050	2412
30	2260	3210	3822	1283	1590	1953
35	1841	2595	2929	1144	1479	1789
40	1674	2232	2762	977	1228	1535
45	1367	1925	2344	893	1172	1423
50	1398	1889	2275	865	1172	1451
53	1492	2112	2316	1030	1250	1620

Отримані дані наведені у таблиці 6.35. На рисунку 6.21 наведена залежність в'язкості тіста (вологість 0,46 кг/кг) від температури при різних швидкостях зсуву; були побудовані також залежності для тіста, яке має інші значення вологості.

Отримані залежності мають екстремум. В'язкість та напруження зсуву тіста різної вологості при збільшенні температури в цьому діапазоні зменшуються. Наведені дані показують, що зі збільшенням швидкості зсуву змінення в'язкості в функції температури відбувається менш інтенсивно. Мінімальну в'язкість тісто вологістю 0,46 кг/кг має при температурі 48⁰С.

Зі зменшенням вологості екстремум функції зміщується у бік більших температур. Мінімальні значення в'язкості тіста різної вологості при одній і тій же швидкості зсуву при відповідних температурах наведені у таблиці 6.36.

Тісто хлібопекарного виробництва відрізняється великим різноманіттям технологічних характеристик та рецептур, що визначає широкий діапазон змінення в'язкості.

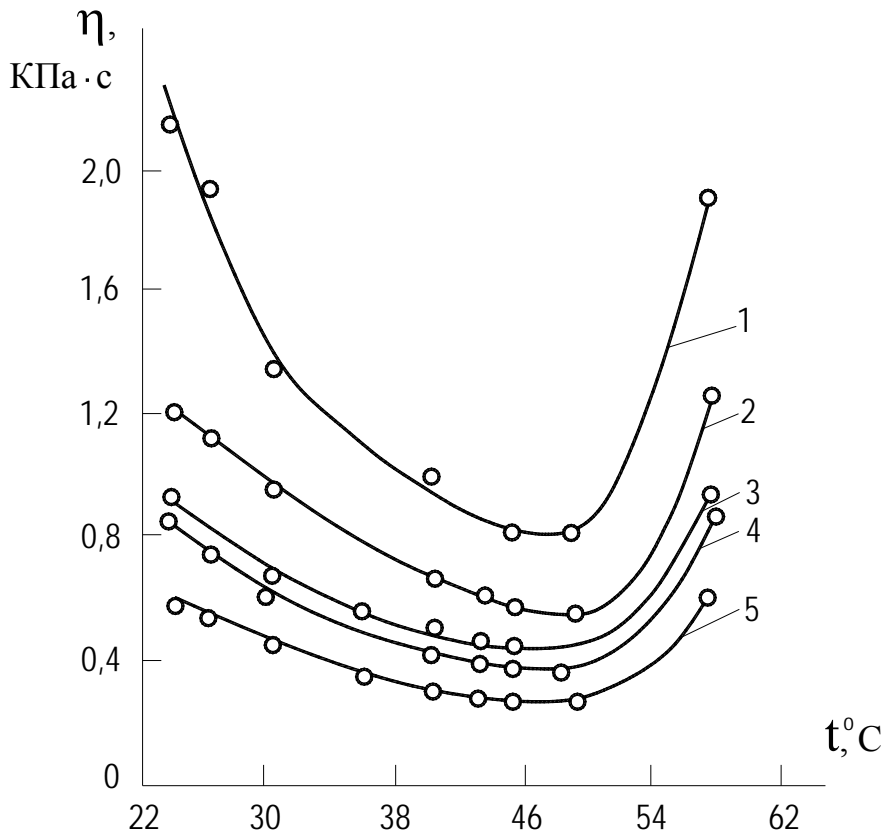


Рисунок 6.21 – Залежність в'язкості тіста від температури при швидкостях зсуву (с⁻¹):
 1 – 0,167; 2 – 0,333; 3 – 0,5; 4 – 0,6; 5 – 1,0

Середні значення в'язкості різних видів мучного тіста при температурі 30⁰С та атмосферному тиску наведені у таблиці 6.37.

Наведені дані показують, що в'язкість тіста знаходиться у діапазоні від 0,5 до 2000 кПа·с при вологості від 17,0 до 45,7%. Різні види тіста відносяться до різних класів реологічних тіл, що викликає необхідність обирати у кожному випадку

відповідне розрахункове рівняння при опису течії даного виду тіста в технологічних машинах.

Таблиця 6.36 – Мінімальні значення в'язкості тіста різної вологості при відповідних температурах

Вологість, кг/кг	Температура, °С	Вологість, кг/кг	Температура, °С
0,445	49	0,54	45,5
0,46	48	0,56	45
0,48	47	0,58	44
0,50	46	0,60	44
0,52	46	-	-

Широкий діапазон значень в'язкості змушує розраховувати переробні машини на конкретний сорт тіста, а при переході на інший сорт проводити перевірочні розрахунки.

Досліджувався вплив помелу та кондиціювання на структурно – механічні властивості тіста [30]. Вивчали залежність властивостей тіста від розміру часток товарного пшеничного борошна вищого, I та II сортів. Результати досліджень показали, що по всім трьом сортам борошна ступінь

змінення реологічних властивостей тіста після витримки знаходиться

в оборотній залежності від розмірів часток борошна. Кондиціонування зерен також впливає на властивості тіста, оскільки воно збільшує його в'язкість та модулі пружності зсуву.

Таблиця 6.37 - Середні значення в'язкості різних видів тіста при температурі 30⁰С та атмосферному тиску

Вид тіста	Реологічне тіло	Швидкість зсуву, с ⁻¹	Вологість, %	Ефективна в'язкість, Па·с
Опара	В'язко – пластичне	2,0	62	12
Хлібопекарне з борошна				
І сорту	-	5,0	44,5	6,5·10 ²
II сорту	-	5,0	45,7	5,5·10 ²
Для болгарського хліба	Шведова – Бінгама	2,0	42,6	8·10 ²
Для бубликів	Шведова – Бінгама	0,5	33,5	3·10 ²
Для бубликів цукрових	Шведова – Бінгама	0,3	31,6	2·10 ²
Для бубликів ванільних	Шведова - Бінгама	0,5	31,8	8·10 ²
Для хрустких хлібців	-	1,0	38,0	6·10 ²
Для пряників	Псевдо пластичне	2,0	17,0	1,3·10 ⁴
Для коржиків	Пружно – в'язко - пластичне	2,0	41,0	1·10 ⁴

Були проведені дослідження з листковим тістом на маргарині чотирихкратно розклатки вологістю 33,6% та температурі 18⁰С з ціллю дослідження впливу машинної обробки тіста на його фізико – механічні властивості. Результати обробки дослідних даних по вивченню впливу температури на граничне напруження зсуву показали, що з підвищенням температури від 14 до 22⁰С θ_0 зменшується для листкового тіста на маргарині в 3 рази, без маргарину – в 2,5 разів та тіста після замісу – в 3,2 рази (таблиця 6.38). Граничне напруження зсуву для листкового тіста на маргарині приблизно в 1,2 рази менш, ніж для тіста без маргарину. Додавання жиру, що є пластифікатором тіста з борошна, зменшує θ_0 . Зі збільшенням вологості тіста від 33,5 до 44,2% θ_0 зменшується на 45 – 50%, а зі зменшенням вологості від 33,5 до 27,7% підвищується на 20 – 25%.

Таблиця 6.38 – Залежність граничного напруження зсуву (кПа) від температури тіста

Температура тіста, °С	Тісто		
	Листкове без маргарину	Листкове на маргарині	Після замісу
14	7,2	5,8	3,5
16	6,6	5,2	3,1
18	5,8	4,6	2,6
20	4,7	3,6	1,9
22	3,1	2,0	0,9

При дослідженні впливу інтенсивності та тривалості замісу на структурно – механічні властивості макаронного тіста вологістю 30-31,5% встановлено, що границя міцності зі збільшенням тривалості від 10 до 20 хвилин спочатку досягає максимального значення потім знижується [30].

Пластичні властивості при цьому безперервно зростають. Зі збільшенням частоти обертання місильного органу від 90 до 180 об/хв пластичність тіста знижується. Наприклад, якщо відносно подовження тіста при 90 об/хв складає 248%, то при 180 об/хв – 194%. Границя міцності тіста зі збільшенням частоти обертання зростає: при 90 об/хв вона дорівнює 59,8 кПа, а при 180 об/хв – 68,5 кПа. Інтенсивний заміс сприяє більш компактної «упаковці» твердої фази у макрооб’ємі клейковинного гелю, що веде до зміцнення структури тіста.

При технологічній переробці на машинах бубликове тісто спочатку стискується у робочих циліндрах, а потім продавлюється під великим тиском крізь кільцеву щілину, утворюючи тестову заготовку. При цьому, знаходиться під тиском, тісто ущільнюється, змінюються його фізико - механічні властивості. З ціллю дослідження змінень, які відбуваються у тісті протягом формування, було проведено наступне випробування. Тестові заготовки, отриманні з тіста визначеної якості (сорт, вологість, температура), досліджувалися з використанням віскозиметру. Результати експериментів порівнювалися з даними, отриманими для аналогічного тіста до формування.

На рисунку 6.22 наведений графік залежності в’язкості бубликового тіста (вологість 32,2%, температура 30⁰С, тиск 1,47 МПа) від швидкості зсуву для тестових заготовок після обробці на машині (крива 1) та для тіста після замісу (крива 2). Як видно з графіків, у результаті ущільнення тіста в робочих циліндрах машини в’язкість підвищується. Різниця значна при малих швидкостях зсуву і зменшується при більш високих швидкостях: при швидкості зсуву 0,25 с⁻¹ в’язкість збільшилася на 50% від своєї первісної величини, а при менших швидкостях зсуву різниця ще більш зростає. У період пере-

робки збільшуються також граничне напруження зсуву та модулі пружності і еластичності.

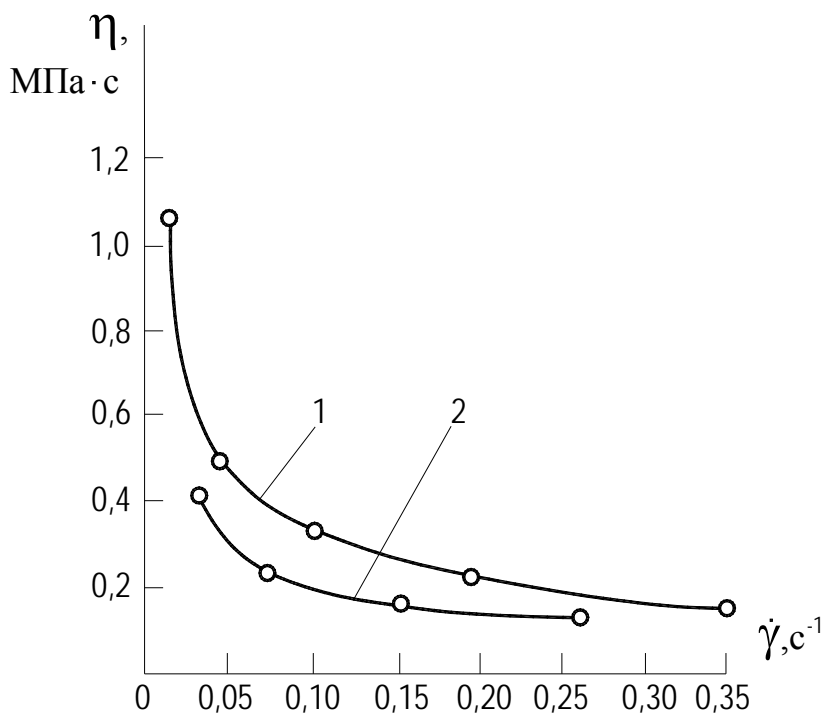


Рисунок 6.22 – Вплив механічної обробки на в'язкість тіста для українських бубликів

Таблиця 6.39 – Характеристики тіста у період переробки

Характеристики	Тісто після замісу	Тестові заготовки
Граничне напруження зсуву, кПа	1,43	1,79
Модуль пружності зсуву, кПа	189	244
Модуль еластичності, кПа	66	250

Значення цих характеристик наведені у таблиці 6.39. Як видно, граничне напруження зсуву збільшилося на 25%, модуль пружності при зсуві – на 29%, а модуль еластичності – більш ніж у 3 рази.

Результати дослідів показали, що в результаті технологічної переробки значення фізико – механічних характеристик бубликового тіста різко зростають.

При вивченні впливу вібрації на процеси замісу тіста для цукрового печива доведено, що вібраційні діяння сприяють руйнуванню просторових структур, зниженню границі пружності та в'язкості матеріалу, отриманню однорідної маси [11, 50]. Одним з технологічних процесів

є різання матеріалу віброуючим інструментом, що дозволяє інтенсифікувати процес розділення матеріалу на частки. Вібраційне різання дає добрі технологічні результати при обробці крихких, дуже в'язких, липких та складних (з наповнювачами) матеріалів. Це відбувається тому, що у мікроелементах матеріалу, який знаходиться поблизу віброуючого інструменту, у результаті вібрації відбувається значне зменшення значень характеристик міцності та в'язкості.

Для створення обладнання, яке здійснює переробку харчових мас з використанням вібрації, необхідно знати реологічну поведінку продукту в умовах деформації, яка реалізується у даному процесі.

Питання для самоконтролю

1. Як впливають на структурні змінення молочної закваски кислотність, вологість та температура?

2. Як змінюється в'язкість опари з борошну II сорту та з борошну I сорту протягом бродіння?

3. Яким чином акустична обробка впливає на реологічні властивості опари?

4. Як залежать в'язкість та граничне напруження зсуву хлібопекарного тіста від тривалості бродіння та швидкості зсуву; вмісту цукру та жиру, тиску?

5. Чи впливає додавання СКД до маси борошна на закономірність змінення ефективної в'язкості та напруження зсуву?

6. Як залежать в'язкість, граничне напруження зсуву, модулі пружності зсуву та еластичності бубликового тіста від температури, вмісту цукру та вмісту жиру, тривалості відлежи та тиску?

7. Який вплив на реологічні характеристики тіста для макаронних виробів оказують температура, швидкість зсуву та вологість тіста, змінення тиску, вібрації, інтенсивність та тривалість замісу?

8. Який вплив оказує вібрація на процеси замісу тіста для цукрового печива?

6.2 Компресійні характеристики та характеристики міцності, щільність сипучих продуктів та борошняних виробів

6.2.1 Осьовий стиск

Стиск харчових матеріалів та виробів при одноосної дії навантаження зустрічається у різноманітних технологічних машинах: при штампуванні заготовок тіста та карамельних корпусів; механічному загортанні цукерок, шоколаду та харчових концентратів.

До сипучих матеріалів віднесені зерно та крупи. Це розділення умовне, оскільки при одноосному стиску випробують не сипучу масу, а окремі зерна. Міцність характеризують границями міцності, текучості та повзучості, величиною руйнуючого зусилля або напруження

при визначеному виді деформації [23].

У таблиці 6.40 наведені характеристики деяких сортів пшениці.

Таблиця 6.40 – Змінення деформацій в пшениці

Сорт пшениці	Фракції зерна	Вологість, кг/кг	Температура, °С	Модуль пружності, Па·10 ⁻⁵	Залишкова деформація, %
Саратовська 29	Склоподібна	0,14	18-20	1590	1,10
		0,16	18-20	1475	1,46
		0,16	45	1375	1,85
Мільтурум 553	Склоподібна	0,14	18-20	1595	0,75
		0,16	18-20	1240	1,10
Мільтурум 553	Мучниста	0,14	18-20	1345	1,10
		0,16	18-20	660	1,15

Вологість є однією з характеристик зерна. За вологістю зерно поділили на три фракції: при вологості менш, ніж 0,11 кг/кг зерно – пружно – еластичне, у діапазоні 0,11-0,13 кг/кг – пружно – еластично – пластичне, вище 0,17 кг/кг – еластично – пластичне.

Визначали величини умовної границі міцності при стиску, відносної деформації, модуля пружності зерен при стиску. Результати наведені у таблиці 6.41.

Таблиця 6.41 – Характеристики зерна круп'яних культур

Культура	Вологість, кг/кг	Щільність, кг/кг	Границя міцності, $\sigma_{np} \cdot 10^{-6}$, Па	Відносна деформація, %	Умовно – миттєвий модуль пружності $E_1 \cdot 10^{-6}$, Па
Горіх	0,116	1470	10-10,3	9,0-9,2	67,1-67,5
	0,170	1330	2,6-2,7	21,0-21,4	12,3-12,8
Ячмінь	0,116	1330	4,80-4,92	13,3-13,8	24,6-24,9
	0,170	1274	3,36-3,44	18,3-18,9	12,5-12,9
Просо	0,116	1322	4,27-4,33	16,0-16,4	20,0-20,4
	0,170	1233	2,34-2,38	24,0-24,4	7,6-8,0
Гречка	0,116	1293	3,87-3,89	18,0-18,3	17,4-17,6
	0,170	1204	1,88-1,90	26,9-27,2	6,5-6,8
Овес	0,116	1233	3,60-3,61	24,0-24,4	14,2-14,4
	0,170	1124	1,25-1,27	47,0-48,0	3,4-3,5

Досліджені структурно – механічні властивості рису, значення еластичної в'язкості (таблиця 6.42) та швидкість пластичної, еластичної та загальної деформації рису у залежності від напруження та три-

валості дії на вантаження(таблиця 6.43).

Таблиця 6.42 – Еластична в'язкість $\eta_E \cdot 10^{-6}$ (Па·с)

Напруження $\sigma \cdot 10^{-6}$, Па	Тривалість дії навантаження, с			
	5	10	20	30
0,74	487	1040	2050	3050
1,27	460	1010	2040	2992
2,00	470	1000	2100	2915
2,32	481	1020	2070	2835
3,75	430	950	2050	3010

Отримані характеристики макаронного тіста при стиску. Зразки (зовнішній діаметр 7 мм, внутрішній 4,5 мм, довжина 50 мм) випробували після випресування з матриці та гіротермічної обробки протягом процесу сушіння, стискували у напрямку, перпендикулярному осі зразків.

Таблиця 6.43 – Швидкості деформації рису

Напруження $\sigma \cdot 10^{-5}$, Па	Швидкість пластичної деформації $(d\varepsilon_{пл}/d\tau)10^5$, с ⁻¹	Швидкість еластичної деформації $(d\varepsilon_E/d\tau)10^5$, с ⁻¹ , при τ , с				Швидкість загальної деформації $(d\varepsilon_{заг}/d\tau)10^5$, с ⁻¹ , при τ , с			
		5	10	20	30	5	10	20	30
7,4	0,00	134	39	13,6	5,5	134,0	39,0	13,6	5,5
12,7	0,16	150	35	11,6	4,2	150,2	35,2	11,8	6,1
20,0	0,60	226	63	24,3	13,0	226,6	63,6	24,9	13,6
23,2	0,80	270	94	34,0	16,2	270,8	94,8	34,8	17,0
37,5	1,00	360	100	25,6	10,2	361,6	101,6	27,2	11,8

Діаграми стиску макаронних виробів є типовими діаграмами для пружно – пластичних матеріалів: спочатку спостерігається лінійна залежність між напруженням та деформацією (зона пружної деформації), потім залежність стає нелінійною (зона пружно – пластичних деформацій), закінчується процес стиску пластичною деформацією при максимальному напруженні, в умовах вологості виробів вище 34% спостерігається явно виражена границя міцності. Отримані дані наведені у таблиці 6.44.

При вологості 33,2 % та нижче відбувається значне зменшення пластичних деформацій, вироби володіють в основному пружними властивостями.

Вивчали пружні та пластичні деформації при стиску різноманітних сортів хлібу в залежності від тривалості охолодження після випічки [186]. Визначали модуль пружно – пластичної деформації $E_{пр}$, відносну пружність, відносну пластичність, руйнуюче напруження σ_p . Отримані значення наведені у таблиці 6.45.

Таблиця 6.44 – Змінення фізико – механічних характеристик макаронних виробів у процесі сушіння

Вологість виробів	Максимальне напруження $\sigma_{ГР} \cdot 10^{-5}$, Па	Модуль пружності $E \cdot 10^{-5}$, Па
0,450	1,25	3,84
0,332	2,50	10,36
0,281	2,75	11,92
0,240	7,94	34,87
0,164	12,50	71,43

Дані таблиці показують, що фізико – механічні властивості макаронних виробів значно змінюються у процесі сушки.

Вивчена загальна та пружна деформація хлібного м'якішу в залежності від терміну зберігання хлібу, сорту, рецептури та інших факторів [203]. Розроблені методика та прибор для вимірювань пружно – пластичних деформацій м'якішу в умовах одноосного стиску. Встановлене, що

зниження загальної деформації м'якішу найбільш різко протікає у перші години після випічки.

Таблиця 6.45 – Пружно – пластичні характеристики та характеристики міцності хлібу

Вироби	Тривалість охолодження, хв	$E_{ПР} \cdot 10^{-3}$, Па	Пружність, %	Пластичність, %	$\sigma_P \cdot 10^{-3}$, Па
Хліб житній формовий	0	466	58	42	50
	7	422	33	33	50
	28	686	72	28	65
Хліб пшеничний формовий	0	738	69	31	65
	7	699	68	32	65
	28	598	76	24	60
Батони нарізні	0	224	22	78	30
	7	112	40	60	25
	25	106	25	75	40
Хліб круглий (з борошна II сорту)	0	147	83	17	140
	7	57	75	25	115
	28	54	81	19	90

У зв'язку з попитом на споживання різаного хлібу з'явилися роботи по вивченню фізико – механічних властивостей свіжого хліба, який значно відрізняється від охолодженого. Було запропоноване реологічний стан хлібного м'якішу визначати за діаграмами «напруження – подовження», які наведені на рисунку 6.22.

Криві отримані на приборі «Інстрон» при навантаженні зразків з постійною швидкістю деформації. З діаграм бачимо, що процес деформації умовно можна розбити на три зони: спочатку спостерігається

ся еластична, потім пружна запізнювання та, при кінці, пластична деформація. При порівнянні характеру кривих можна відмітити, що у свіжоспеченого хліба модуль пружності та рівень текучості менше.

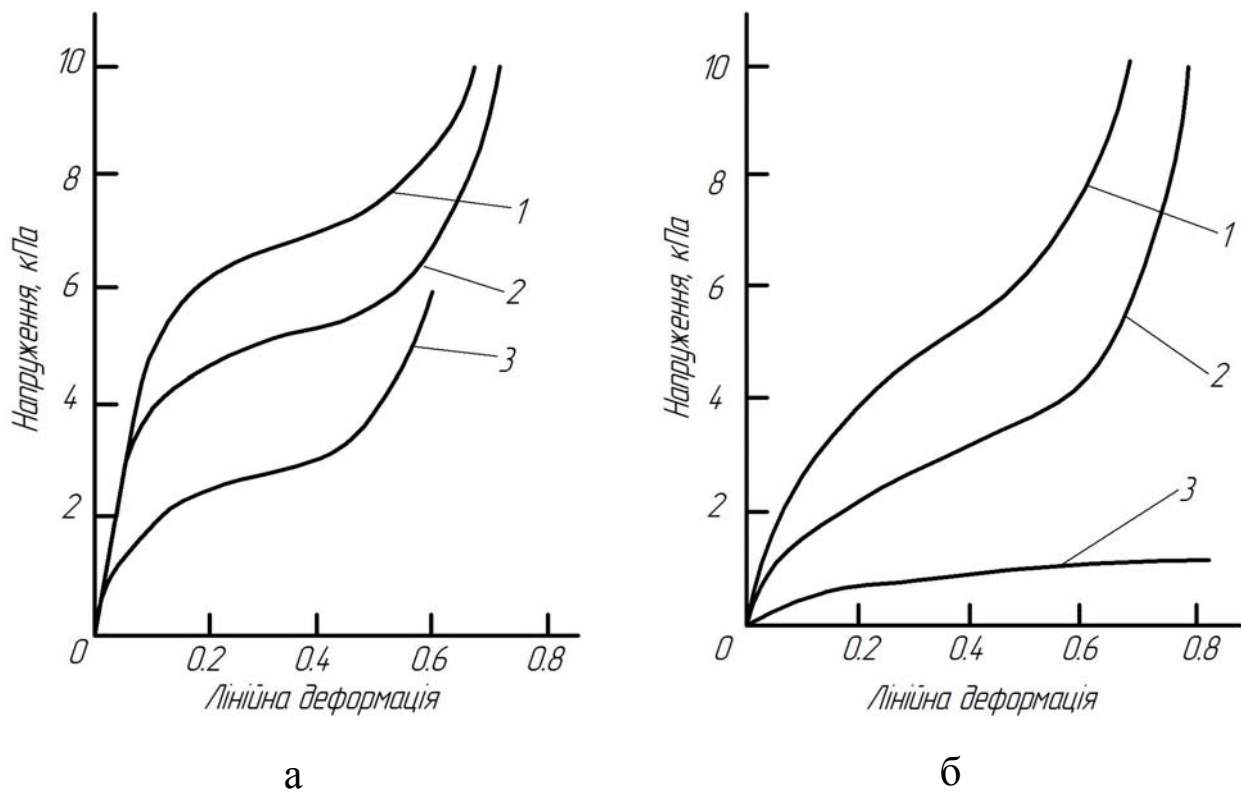


Рисунок 6.22 – Діаграма стиску хлібного м'якшу після охолодження (а) та безпосередньо після випічки (б) для різних сортів хліба:

1 – житнього; 2 – житньо – пшеничного; 3 – пшеничного

Визначення пружних та пластичних деформацій при стиску різних сортів хліба у залежності від тривалості їх охолодження після випічки проводили на спеціальному приборі [30]. У якості пружно – пластичних характеристик були прийняті: модуль пружно – пластичних деформацій $E_{\text{пр}}$, відносна пружність Pr та відносна пластичність Pl , які знаходили за формулами:

$$E_{\text{пр}} = Ph/Ff; \quad Pr = [(f - \Delta f)/f]100; \quad Pl = (\Delta f/f)100, \quad (6.18)$$

де P - навантаження стиску, Н; h - розмір зразку у напрямку дії зусилля, м; F - площа навантаження, м²; f - скорочення у напрямку дії зусилля, м; Δf - залишкове скорочення після зняття зусилля, м.

Характеристиками міцності та деформації при руйнуванні зразку хліба були напруження руйнування σ_p та абсолютна деформація f_p , яка йому відповідає. σ_p - це відношення граничного навантаження, яке діє протягом 1с та викликає руйнування, до площі руйнування. Пружно – пластичні характеристики та характеристики міцності хлібу наведені у таблиці 6.46. Ці дані можна використовувати при визначенні параметрів робочих органів машин та дозволених зусиль.

Таблиця 6.46 - Пружно – пластичні характеристики та характеристики міцності хлібу

Хліб	Тривалість охолодження, хв	$E_{пр}$, кПа	Pr , %	Pl , %	σ_p , кПа	f_p , мм
Житній формовий	0	466	58	42	50	11,6
	7	422	67	33	50	11,4
	28	686	72	28	65	9,5
Пшеничний формовий I сорту	0	738	69	31	65	10,7
	7	699	69	32	65	9,9
	28	598	76	24	60	11,5
Батони нарізні	0	224	22	78	30	11,0
	7	112	40	60	25	16,0
	28	106	25	75	40	19,0

Характеристики визначали при температурі виробів 93-95⁰С (відразу після випічки); 85-90⁰С (через 5-7 хв природного охолодження); 75-80⁰С (через 25-28 хв).

Отримані фізико – механічні властивості сухарних плит з пшеничного борошна вищого та I сортів стандартної рецептури та вологості муки при одноосному стиску [30]. Тривалість дії напруження стиску змінювали від 5 до 30 с, термін зберігання плит дорівнював 4, 8, 24 та 48 годин (рисунок 6.23).

Результати показали (рисунок 6.24) що інтенсивність деформації м'якшу хлібу у значної ступені залежать від напруження стиску. Якщо напруження нижче границі пружності, то деформація повністю оборотна (крива 1). При більш високих напруженнях поряд з високоеластичною спостерігається зріст пластичної деформації з переходом до течії з постійною швидкістю (криві 2-5). При подальшому збільшенні напруження пластична течія приводе до руйнування структури (крива 6).

Високоеластична деформація м'якшу сухарних плит повністю розвивається за перші 10-15 с.

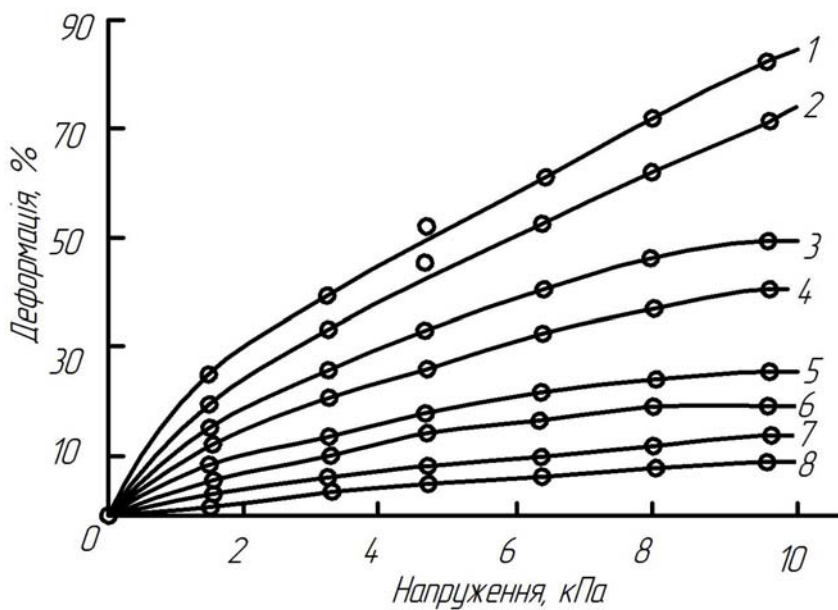


Рисунок 6.23 – Залежність деформації сухарних плит з борошна вищого (криві 1, 3, 5, 7) та I (криві 2, 4, 6, 8) сортів від напруження стиску при тривалості витримки хлібу (год):

1, 2 – 4; 3, 4 – 8;
5, 6 – 24; 7, 8 – 48.

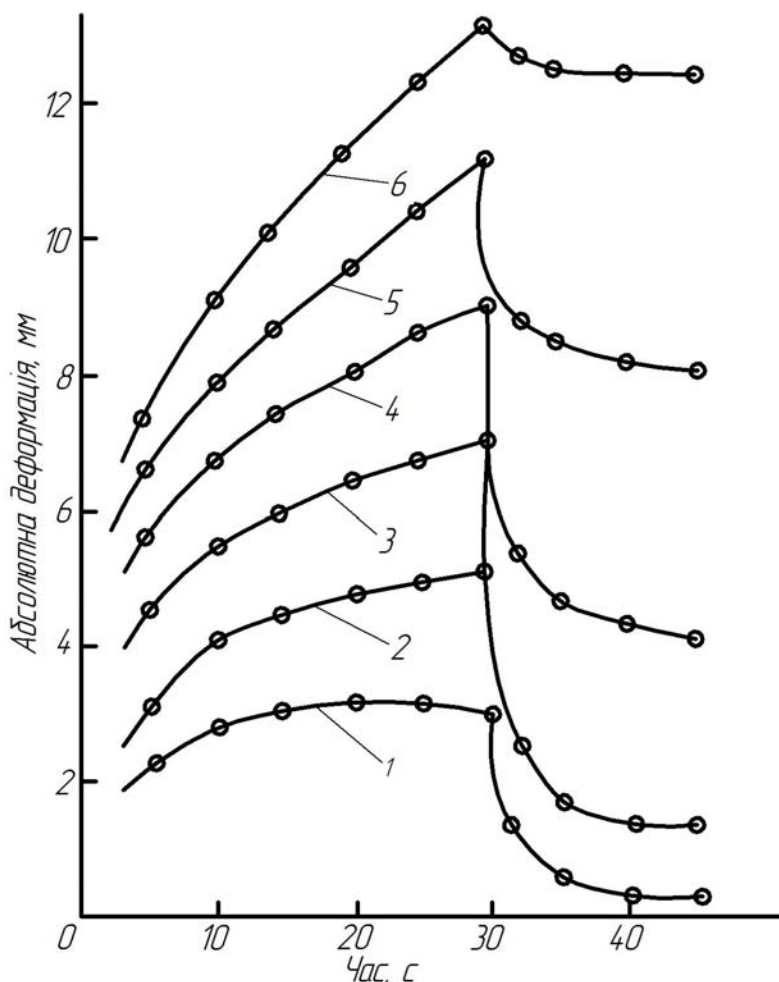


Рисунок 6.24 – Криві кінетики стиску м'якшу сухарних плит при постійному напруженні (кПа): 1 – 1,59; 2 – 3,18; 3 – 4,78; 4 – 6,36; 5 – 7,95; 6 – 3,55.

Реологічні характеристики (таблиця 6.47) дозволили віднести м'якушку сухарних плит до твердообразних тіл, які володіють пружно – еластично – пластичними властивостями.

При розрахунку процесу різання сухарних плит враховують загальний модуль пружності, який визначається як сума пружної та високоеластичної деформації м'якшу (таблиця 6.48). З таблиці бачимо, що загальний модуль пружності сухарних плит збільшується при підвищенні напруження стиску та тривалості витримки.

Таблиця 6.47 – Залежність реологічних характеристик м'якшу хліба від напруження стиску

Напруження $\sigma \cdot 10^{-3}$, Па	Модуль миттєвої пружності $E_{M.ПР} \cdot 10^{-3}$, Па	Модуль еластичної деформації $E_E \cdot 10^{-3}$, Па	Релаксаційна в'язкість $\eta_{рел} \cdot 10^{-6}$, Па·с	Період релаксації, с	Пластичність, %
1,59	9,6	7,1	-	-	0
3,18	15,0	8,4	0,68	81	16
4,78	15,2	9,2	0,72	78	31
6,36	16,8	10,3	0,68	66	45
9,55	19,4	12,6	0,57	45	93

Таблиця 6.48 – Загальний модуль пружності $E \cdot 10^{-3}$ (Па) м'якшу

Сухарні плітки з борошна	Тривалість витримки, г	Напруження стиску $\sigma \cdot 10^{-3}$, Па					
		1,59	3,18	4,78	6,30	7,95	9,55
Вищого сорту	4	6,8	8,2	9,3	10,4	11,1	11,7
	8	10,4	11,9	14,3	15,9	18,0	20,0
	24	18,3	21,8	26,9	30,0	34,0	40,0
	48	24,0	28,0	30,0	34,0	38,4	45,0
I сорту	4	8,5	9,4	10,9	11,7	12,5	12,8
	8	13,2	14,9	17,1	19,1	21,2	23,2
	24	47,5	48,0	51,0	56,0	59,0	65,0
	48	80,0	80,0	72,0	73,0	79,0	90,0

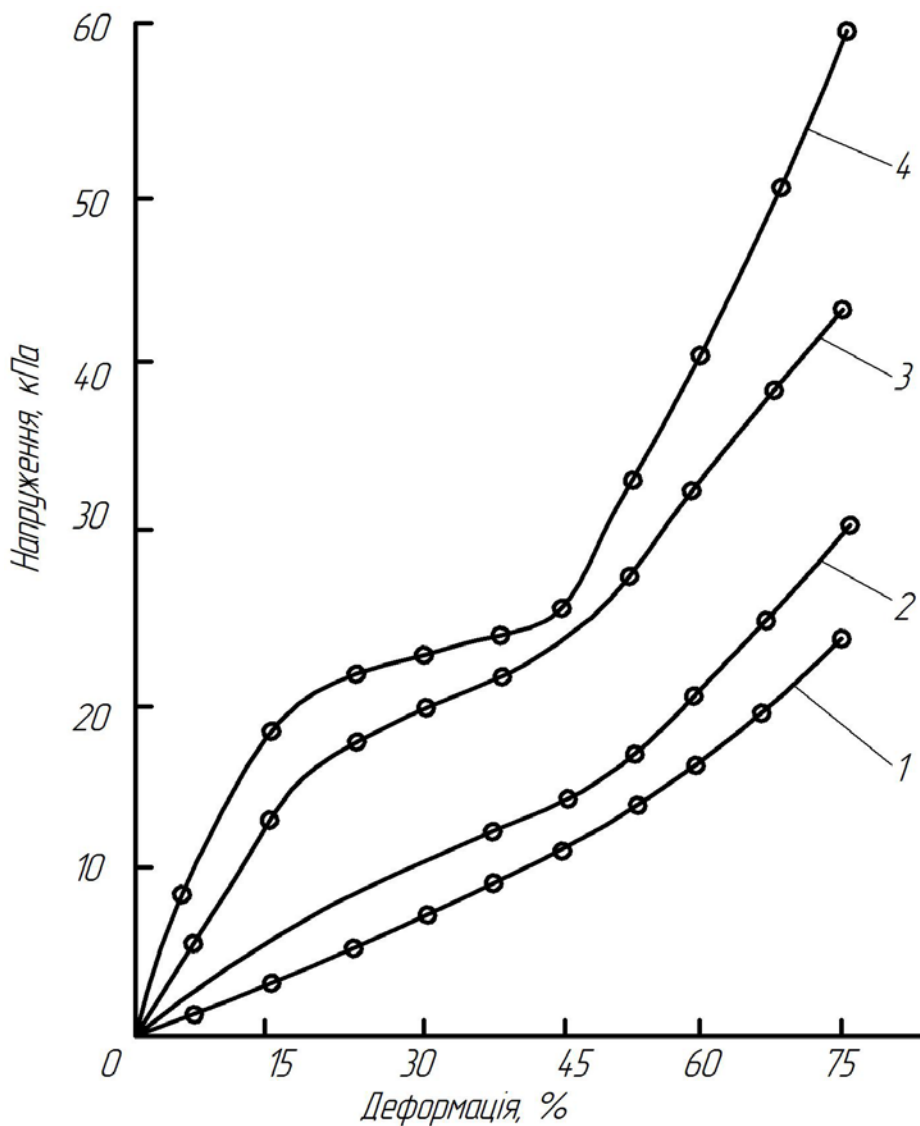
М'якушка житнього хлібу була досліджена при змінненні напруження стиску від 4800 до 19000 Па, що наведено на рисунку 6.25 [30].

Були визначенні реологічні характеристики хлібу (таблиця 6.49). Для випробувань брали житній хліб стандартної рецептури, вирізали циліндричні зразки діаметром 40 мм та висотою 15 мм. За дослідними даними були побудовані діаграми стиску м'якшу хлібу (рисунок 6.25).

Всі криві мають точки перегину, наявність яких пояснюється втратою стійкості коміркового каркасу м'якшу та початком утворення мікротріщин на циліндричній поверхні зразку. Такий характер кривих типовий для маломіцних матеріалів, а ділянки перегину указують на перехід матеріалу з одного стану в інший.

Спочатку матеріал містить велику кількість повітря, потім відбувається інтенсивне руйнування оболонок пор при незначному зростанні напруження, остання ділянка відповідає стиску хлібу з невеликим вмістом повітряної фази

Рисунок 6.25 –



Діаграми стиску м'якшу житнього хліба при тривалості витримки (год):

1 – 4; 2 – 24;
3 – 48; 4 – 120.

Таблиця 6.49 – Середні значення реологічних характеристик м'якшу житнього хліба у залежності від тривалості його витримки

Тривалість витримки, г	Модуль пружності, Па	Релаксаційна в'язкість $\eta_{rel} \cdot 10^{-3}$, Па·с	Період релаксації, с
4	260-340	6,0-8,6	20-29
24	600-650	7,2-9,7	12-15
28	810-890	10,0-20,0	12-23

За діаграмами були знайдені границі пропорційності та модулі пружності м'якшу житнього хлібу (таблиця 6.50).

У таблиці 6.51 наведені значення пружності та пластичності (в %) м'якшу житнього хлібу в залежності від напруження стиску та тривалості витримки.

Таблиця 6.50 – Характеристики житнього хліба

Тривалість витримки, г	Границя пропорційності	Модуль пружності, Па
4	11	270
24	11,2	430
28	18	900
120	18,5	1400

Таблиця 6.51 – Залежність пружності і пластичності (%) м'якшущу житнього хліба від напруження стиску та тривалості витримки

Напруження	Тривалість витримки, г					
	4		24		48	
	Пружність	Пластичність	Пружність	Пластичність	Пружність	Пластичність
4800	81,2	18,8	75,0	25,0	68,0	32,0
9200	92,0	8,0	81,3	18,7	74,2	25,8
12700	95,0	5,0	89,1	10,9	76,0	24,0
19000	98,0	2,0	95,2	4,8	90,0	10,0

Питання для самоконтролю

1. Які величини описують міцність продукту при осьовому стиску?
2. Як змінюються швидкість пластичної, еластичної та загальної деформації рису у залежності від напруження та тривалості дії навантаження?
3. На які зони поділяються діаграми стиску макаронних виробів?
4. Як залежить загальна та пружна деформація хлібного м'якшущу в залежності від терміну зберігання хлібу, сорту, рецептури?
5. Якими характеристиками оцінювали міцність та деформації при руйнуванні зразку хлібу? Як змінюються ці характеристики у залежності від напруження стиску та тривалості витримки?
6. Які характеристики використовують для розрахунку процесу різання сухарних пліт?

6.2.2 Осьовий розтяг та згин

У процесі формування заготовок з тіста в деяких технологічних машинах тісто піддається розтягу. Від ступеню механічної обробки заготовки залежить якість готової продукції. Для визначення оптимальних режимів механічного діяння тих або інших органів формуючої машини необхідно знати фізико – механічні властивості тіста при розтягу.

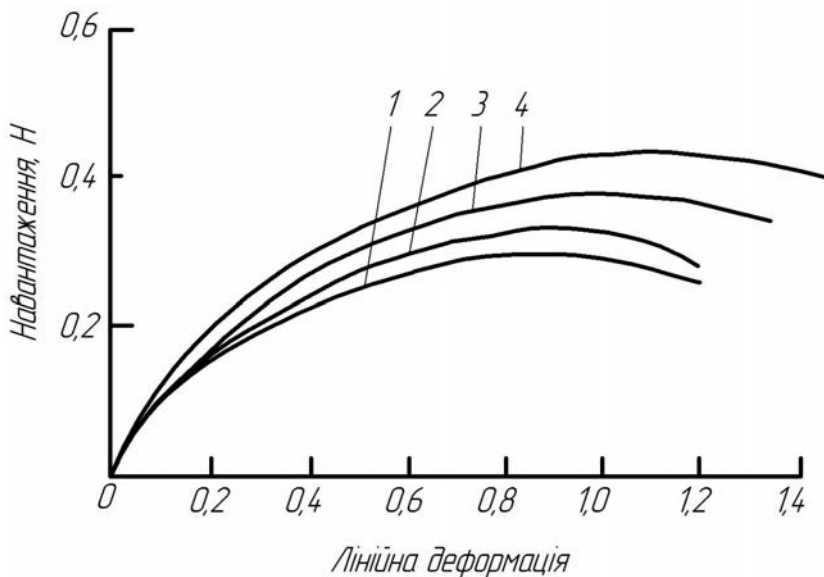
Експерименти проводили з тістом з пшеничного борошна I сорту для батонів нарізних (вологість 41-42,2%), з тістом з борошна I сорту (вологість 44,4-44,6%) та II сорту (вологість 45,3-45,6%) для батонів масою 1 кг при температурі 29-30⁰С. Для того, щоб виявити вплив механічної обробки, розкатку тіста проводили при різних зазорах між валками, частоті обертання валків та кратності розкатки [30]. За діаграмою розтягу визначали навантаження, яке відповідає тимчасовому опору (границя міцності). Поділивши це навантаження на первісну площу поперечного перерізу зразку, знаходили умовний тимчасовий опір. Граничну деформацію знаходили з діаграми як відношення максимального подовження незруйнованого зразку до його початкової довжини.

З рисунку 6.26 видно, що зазор, а тобто тиск між валками оказує вплив на властивості міцності тіста. Так, при прокатці куска тіста між валками при зазорі 5 мм тимчасовий опір та відповідне йому відносне подовження (лінійна деформація) для I сорту були 3 кПа та 0,9, а для II сорту – 2,9 кПа та 0,85. При максимальному зазорі між валками (19мм), коли тиск на тісто був мінімальним, ці величини для I сорту досягали 5,6 кПа та 1,16, а для II сорту – 4 кПа та 1,05. Таким чином, зі зменшенням зазору при збільшенні тиску між валками тимчасовий опір, відносне подовження та питома робота зменшуються.

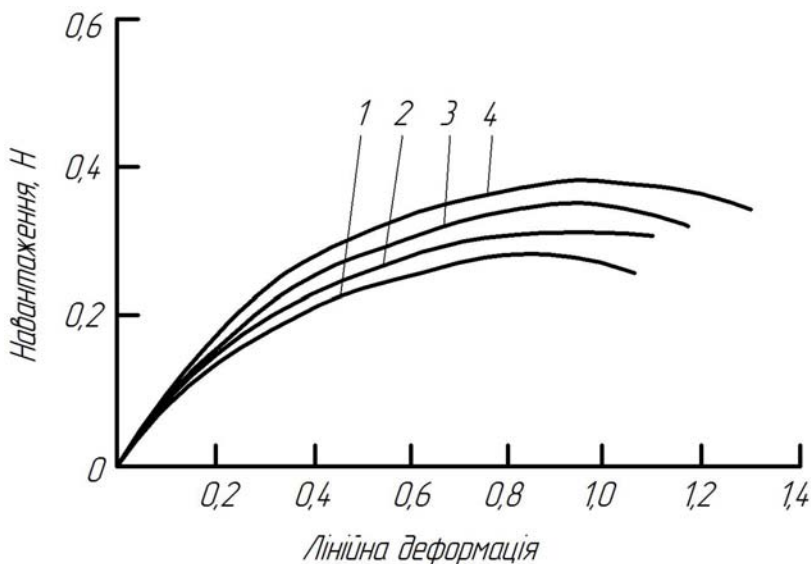
За діаграмами розтягу, які наведені на рисунку 6.27, можна визначити умови, при яких починається руйнування тіста.

Для того, щоб не відбулося розриву тіста, нормальне напруження, відносне подовження та питома робота розтягу не повинні перевищувати відповідно наступних значень: тісто для нарізних батонів – 5,6 кПа, 1,4 та 58,5 кДж/м³; тісто з борошна I сорту – 4,6 кПа, 1,19 та 40,5 кДж/м³; тісто з борошна II сорту – 4,1 кПа, 1,08 та 32,5 кДж/м³.

Досліджувалися фізико – механічні властивості макаронного тіста вологістю від 29 до 32%, виготовленого з макаронної крупки вищого сорту.



а



б

Рисунок 6.26 – Діаграми розтягу тіста з борошна I (а) та II (б) сортів після прокатки між валками з проміжком (мм):

1 – 5; 2 – 7; 3 – 11; 4 – 19

ментів твердої дисперсної фази».

Були досліджені властивості макаронного тіста з борошна вищого сорту різних видів пшениці: твердої, м'якої (вміст сирової клейковини однакової якості 31-31%). Властивості тіста характеризували границею міцності $\sigma_{ГР}$ та відносним подовженням ε . Всі зразки мали

Температура тіста не перевищувала 45°C . Тиск пресування змінювали від 4 до 12 МПа.

З дослідних даних було встановлено, що зі збільшенням вологості тіста зменшується тиск пресування, його характеристики міцності та пружності знижуються, а пластичні – зростають (рисунок 6.28).

Підвищення тиску пресування від 4 до 12 МПа майже не впливає на відносне подовження, модуль пружності декілька зростає, а тимчасовий опір збільшується на 13...15% при тиску пресування вище 7 МПа. Збільшення міцності макаронного тіста при підвищенні тиску автори пояснюють ступеню диспергування білку, щільністю «упаковки» структурованих еле-

однакову крупність часток. Результати наведені у таблиці 6.52.

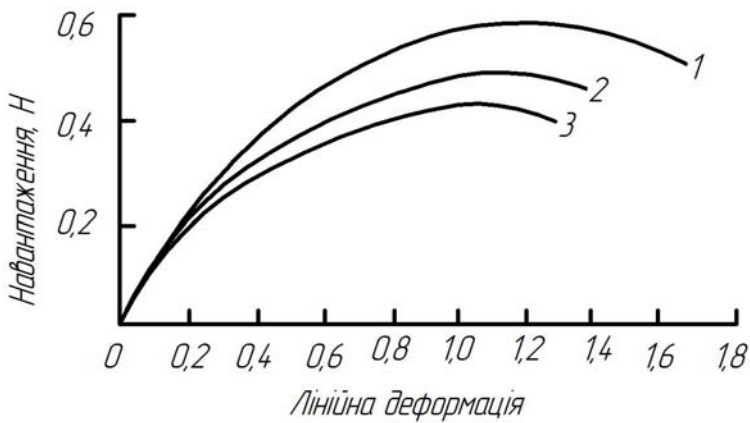


Рисунок 6.27 – Діаграми розтягу після трьохкратної прокатки між валками тіста з муки:

- 1 – I сорту ($W=42,2\%$);
- 2 – I сорту ($W=44,4\%$);
- 3 – II сорту ($W=45,6\%$)

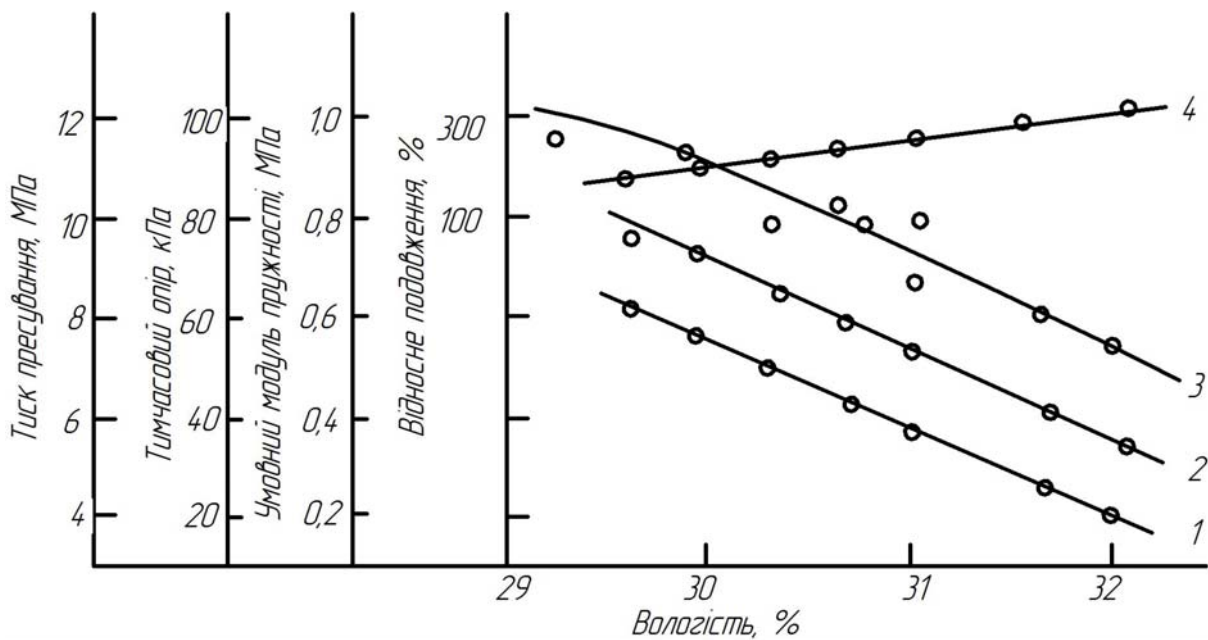


Рисунок 6.28 – Залежності характеристик міцності макаронного тіста від вологості: 1 - тимчасового опору; 2 - уявного модулю пружності; 3 - тиску пресування; 4 - відносного подовження

Властивості сухих макаронних виробів при згині визначали при постійній швидкості деформації 25 мм/хв та температурі 20⁰С у залежності від сорту борошна [14]. Вимірюючи навантаження та деформацію зразку, визначали уявний модуль пружності, руйнуюче напруження та граничну деформацію, які наведені у таблиці 6.53.

Були також отримані залежності фізико – механічних властивостей макаронного тіста від виду борошна та крупності помелу, які наведені у таблиці 6.54.

Результати випробувань показали, що зі зменшенням розміру часток борошна міцність тіста зростає, а пластичність знижується. Це

пояснюється збільшенням часткової концентрації твердої фази в дисперсійному середовищі.

Таблиця 6.52 – Вплив виду борошна на характеристики макаронного тіста

Тісто	Реологічні властивості макаронного тіста	
	$\sigma_{ГР}$, Па	ε , %
З борошна твердої пшениці тонкого помелу	76700	10,5
З борошна м'якої скловидної пшениці тонкого помелу	77000	9,9
З хлібопекарного борошна м'якої пшениці	77200	9,5

Таблиця 6.53 – Залежність фізико – механічних характеристик сухих макаронних виробів від сорту борошна

Макарони з борошна	Уявний модуль пружності $E \cdot 10^{-5}$, Па	Руйнуюче напруження $\sigma_{ГР} \cdot 10^{-5}$, Па	Гранична деформація
Крупки вищого сорту	30,2	76,0	1,68
Напівкрупки	26,4	54,3	1,46
М'якої з скловидних пшениць	24,5	51,2	1,35
«Сильної» хлібопекарної	20,2	41,7	1,29
«Слабкої» хлібопекарної	18,5	30,0	1,14

Таблиця 6.54 – Залежність фізико – механічних властивостей макаронного тіста від сорту борошна та крупності помелу

Вид борошна з пшениці	Фрикційний склад борошна (%) при розмірі часток, мкм				Фізико – механічні властивості	
	Більш 500	Від 250 до 500	Від 250 до 140	Менш 140	$\sigma_{ГР}$, кПа	ε , %
Твердої	1,5	88,5	10	-	47,3	34,4
М'якої скловидної	2	86	12	-	52,1	28,8
М'якої	-	-	-	100	77,2	9,5

Макаронне тісто, виготовлене з борошна різноманітних пшениць визначеної крупності помелу, володіє практично однаковими характеристиками міцності та пластичними властивостями.

6.2.3 Зсув та згин

Методи визначення структурно – механічних властивостей дисперсних систем, розроблені акад. П. А. Ребіндером та його школою, дозволяють, користуючись кривими повзучості та відновлення пружної деформації, отримати основні константи матеріалу.

Для тіста листового на маргарині отримані пружно – кінетичні характеристики: модуль пружності G_1 , модуль еластичності G_2 , пластична в'язкість η_{nl} , тривалість релаксації t_p та відносна пластичність $Пл$. Встановлено, що при підвищенні температури тіста від 14 до 22⁰С знижуються пластична в'язкість у 8,5 разів, модуль пружності у 2,9 разів. Найбільш різке зміння спостерігається в інтервалі температур від 18 до 22⁰С.

Для визначення залежності пластичної в'язкості (Па·с) та модуля еластичності (Па) від температури (T^0 С) отримані рівняння:

$$\eta_{nl} = 13,3 - 0,58T ; \quad (6.19)$$

$$G_2 = -1,1 + 0,41T - 0,01T^2 . \quad (6.20)$$

При збільшенні вологості від 27,7 до 44,5 % значення η_{nl} та G_2 знижуються відповідно в 1,2 та 2,3 разів.

Залежність пластичної в'язкості (Па·с) та модуля еластичності (Па) від вологості тіста W (%) описується рівняннями:

$$\eta_{nl} = 59,65 - 2,63W + 0,03W^2 ; \quad (6.21)$$

$$G_2 = 5,48 - 0,12W . \quad (6.22)$$

Реологічні характеристики тіста змінюються при розвальцьовуванні його на машині. Тісто після замісу має наступні характеристики: $G_1=1,08$ кПа, $G_2=0,85$ кПа, $\eta_{nl}=0,15$ МПа·с. Після закладки маргарину ці характеристики збільшуються з кожним розвальцьовуванням, досягаючи максимального значення після четвертого розвальцьовування: $G_1=2,65$ кПа, $G_2=1,4$ кПа, $\eta_{nl}=0,34$ МПа·с.

Тривалість відлежи тіста також впливає на реологічні характе-

ристики, особливо у перші 20 хв.

Таблиця 6.55 – Залежність фізико – механічних властивостей сухих макаронних виробів від сорту борошна

Мука	Умовний модуль пружності, МПа	Напруження, що руйнує, МПа	Гранична деформація, %
Крупка вищого сорту	3,02	7,60	1,68
Напів-крупка	2,64	5,43	1,46
«Сильна» хлібопекарна	2,02	4,17	1,29
«Слаба» хлібопекарна	1,85	3,00	1,14

Наприклад, якщо пластична в'язкість після 20 – хвилинної відлежи знизилася на 17,5%, то за наступні 40 хвилин – тільки на 1,4%.

Фізико – механічні властивості харчових матеріалів (особливо крихких) іноді визначаються при згині. Наприклад, властивості сухих макаронних виробів знаходили при згині зразку довжиною 12,5 мм [30]. Випробування проводили при швидкості 25 мм/хв та температурі 20⁰С. За результатами вимірювань навантаження та деформації зразку були визначені умовний модуль пружності, напруження, що руйнує, та гранична деформація (таблиця 6.55). З таблиці видно, що для високоякісних сухих макаронних виробів характерні підвищені значення фізико – механічних властивостей. Значення модулю пружності таких виробів знаходяться в межах від 2,5 до 3,5 МПа.

Ударну в'язкість печива при згині знаходили як відношення роботи, яка витрачена на його руйнування, до площі поперечного перерізу в місті удару. Результати випробувань наведені у таблиці 6.56.

Таблиця 6.56 – Ударна в'язкість печива

Сорт печива	Ударна в'язкість, Н/см	Сорт печива	Ударна в'язкість, Н/см	Сорт печива	Ударна в'язкість, Н/см
«Шахове»	1,68	«Вершкове»	1,68	«Далекосхідне»	5,46
«До чаю»	1,75	«Привіт»	1,76	«Крокет»	5,18
«Цукрове»	1,71	«Лимонне»	1,70	«Спорт»	6,10

Експерименти довели, що для цукрових сортів печива динамічне навантаження, яке руйнує, складало 25 – 30 Н, а для зтяжних сортів – 65 – 70 Н. При цьому енергія руйнування для цукрових сортів у середньому дорівнює 0,07 Дж, для зтяжних – 0,26 Дж.

Питання для самоконтролю

1. Які умови треба виконувати для того, щоб не відбулося розриву при розтягу тіста?
2. Як змінюються характеристики міцності, пружності та пластичності зі збільшенням вологості тіста?
3. Чи залежать фізико – механічні характеристики макаронних виробів від виду та сорту борошна, крупності помелу?
4. З використанням яких методів можна отримати основні константи матеріалу при зсуві та згині?
5. За якими співвідношеннями визначають пластичну в'язкість і модуль еластичності у залежності від температури та вологості тіста?
6. Як змінюються реологічні характеристики тіста при розвальцюванні його на машині та тривалості відлежи?

6.2.4 Об'ємний стиск та щільність

В ділильних машинах для хлібопекарного тіста, макаронних пресах, машинах для формування цукерних мас та інших харчові маси знаходяться в умовах всебічного стиску. Ущільнення харчових мас відбувається спочатку в результаті вилучання повітря, а потім переорієнтації та більш щільної упаковки часток маси.

Процес стиску харчових матеріалів у замкнутому циліндрі має два етапи: перший супроводжується інтенсивним виділенням повітря та значним стиском маси при невеликих тисках, у другому стиск відбувається в основному за рахунок пластичної деформації маси [30].

Деформаційні властивості матеріалів є достатньо складними сполученнями різних видів деформації. Такі фактори, як біохімічні процеси, тиксотропія та інші, також затрудняють точне визначення важливих властивостей матеріалів на основі реологічних уявлень.

При машинній обробці та формуванні харчових мас завжди одночасно відбуваються деформації зсуву та стиску. Вивчення «поведінки» мас при об'ємній деформації дає можливість пов'язати конструкцію, міцність робочих органів та кінематику машин з фізико – механічними властивостями мас, які переробляються.

При вивченні об'ємної деформації матеріалу в умовах всебічного стиску розглядаються наступні питання: розподілення тиску в об'ємі маси; стисливість матеріалу під тиском; залежність щільності маси від тиску; процеси релаксації напруження та повзучості.

До утворення суцільної однорідної структури з максимальним ущільненням маси спочатку відбувається різке зміння щільності у залежності від тиску, а потім спостерігається незначне підвищення щільності при різкому збільшенні тиску.

Розрізняють матеріали, які важко або легко ущільнюються. Матеріали, які важко ущільнюються, після тривалої зони попереднього ущільнення (без великої витрати енергії) до максимального ущільнення випробують різке зростання навантаження, утворення зв'язків відбувається швидко. Інші матеріали, які важко ущільнюються, володіють великою пружною післядією. Матеріали, які легко ущільнюються, мають коротку зону попереднього ущільнення, навантаження повільно зростає протягом часу пресування.

Від фізико – механічних властивостей матеріалу, його дисперсності та температури, об'єму кінцевого продукту залежать зони попереднього ущільнення, пружність маси, робота, яка витрачується на зміння форми, та швидкість навантаження матеріалу.

Суттєвий вплив на умови об'ємної деформації та течії харчових мас при їх пресуванні, формуванні та транспортуванні по трубах okazують процеси релаксації тиску та повзучості. Особливий інтерес релаксація має для циклічних процесів формування, оскільки тривалість релаксації декілька більше різності між тривалістю кінематичного циклу та тривалістю видавлювання маси у реальних відсаджувальних машинах. Це веде до того, що при відсадці з великою частотою у масі не встигають розсмоктуватися внутрішні напруження між відсадками, і вона зберігає можливість пружної післядії. Тобто, при зупинці нагнітальних органів впресовування маси буде продовжуватися, що порушує формування корпусу виробу.

Однією з фізико – механічних характеристик, які враховують властивості мас при об'ємному навантаженні є уявний об'ємний модуль E_V :

$$E_V = - p / (\Delta V / V_0), \quad (6.23)$$

де p - тиск, Па; ΔV - приріст об'єму, м³; V_0 - початковий об'єм, м³.

Для тістообразних матеріалів отримана залежність E_V від тиску пресування:

$$E_V = A + Bp, \quad (6.24)$$

де A та B - емпіричні коефіцієнти (таблиця 6.57).

Рівняння (6.24) справедливе у наступних границях тисків: для пшеничного хлібопекарного тіста 0,015 – 0,27 МПа; житнього хлібопекарного – 0,02 – 0,26 МПа; макаронного – 1 – 11 МПа; бубликового – 0,3 – 2,7 МПа.

Таблиця 6.57 – Коефіцієнти рівняння (6.24)

Тісто	A , МПа	B
Хлібопекарне	0,3	6,08
Пшеничне	0,5	6,10
Житяне	0	4,85
Бубликове	10,0	23,80

Наведені дані можуть бути використанні для визначення змінення об'єму маси, яка переробляється, у залежності від робочого тиску, що необхідно знати при конструюванні технологічних машин.

Дослідження властивостей хлібопекарного тіста при стиску в замкнутому об'ємі має велике значення для з'ясування сутності стабілізації тиску в камерах ділильних машин та вибору оптимальних режимів їх роботи.

Дослідження проводили на тісті для формового хлібу вологістю 46,4% з пшеничного борошна I сорту, тісті для українського хлібу вологістю 48,6%, а також на бездріжджовому тісті вологістю 42,2% з пшеничного борошна I сорту. Тиск на тісто змінювався від 0,1 до 0,25 МПа. Після навантаження тривалістю одна хвилина наступало розвантаження тієї же тривалості при зберіганні отриманої деформації.

Найбільший тиск відбувався в тісті для українського хлібу, менший – у тісті з борошна I сорту для формового хлібу, найменший – в тісті з борошна I сорту. Для тіста I сорту вологістю 42,2% і для українського хлібу середні тиски у нижній зоні склали від номінального відповідно 78 та 82% при тиску 0,15 МПа та 70-81% при 0,2 МПа, а у верхній – 59-77% при 0,15 МПа та 55-74% при 0,2 МПа.

При багатократних навантаженнях тиск у зоні декілька зростає, що слід враховувати при проектуванні тістоділильних машин.

Встановлене, що тиск у масі тіста при стиску розподіляється нерівномірно та залежить від тривалості прикладення сили на нагнітачі.

Перевищення тиску пресування над заданим робочим значенням визначається розмірами тестової камери технологічної машини та фізико – механічними властивостями тіста. При багатократному навантаженні хлібопекарного тіста найбільше збільшення щільності відбувається після першого навантаження, при подальших навантаженнях змінення щільності незначне. Основні змінення щільності спостерігали при тисках до 0,15-0,2 МПа. Після п'ятикратного навантаження

тиском 0,25 МПа щільність тіста з борошна I сорту вологістю 46,4% збільшилася на 27,5%, тіста вологістю 42,2% - на 21%, тіста для українського хлібу – на 18%. Після розвантаження системи (при зберіганні отриманої деформації) тиск повільно зменшується за часом.

З особливістю тіста змінювати об'єм під дією всебічного стиску пов'язані важливі практичні проблеми: точність поділення, транспортування по трубопроводах, дозування густих опар. При розв'язанні задач, пов'язаних з течією тіста, вважають, що воно є середовищем, яке не стискується. Але це припущення не знаходить експериментального підтвердження. Для виявлення закономірності стискування тіста, зразок стискували в циліндрі. Максимальний тиск дорівнював 0,1 МПа, що відповідає тиску в тістодільних машинах. При досягненні граничного тиску розвантажували тісто (рисунок 6.29).

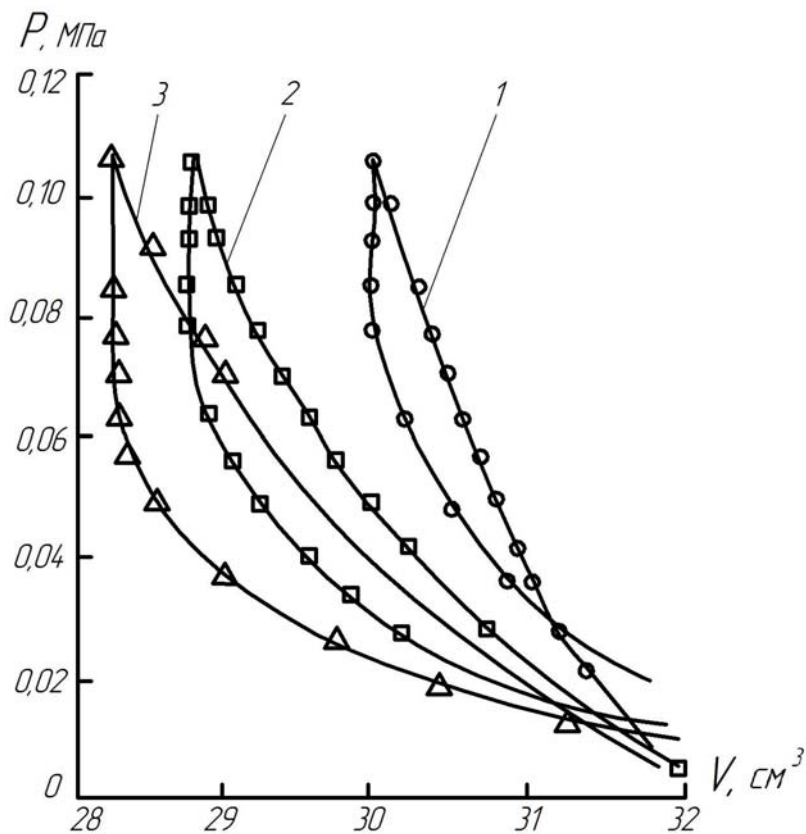


Рисунок 6.29 – Криві стиску (пунктирна лінія) та розвантаження (суцільна лінія) тіста для бубликів з різним вмістом газової фази (%):

1 – 6,65; 2 – 11,8;
3 – 15

Вміст газу (%) визначали за формулою:

$$Q_G = [V_{II} - V_K / V_{II}] 100, \quad (6.25)$$

де V_{II} – початковий об'єм; V_K – кінцевий об'єм.

Отримані експериментальні дані показали, що підвищення тиску в тісті викликає помітне зменшення його об'єму. Зв'язок між тиском та об'ємом має нелінійний характер, кривина графіків пресування тим більше, чим вище вміст газової фази в тісті. Найбільше змінення об'єму відбувається на початку навантаження, а потім поступово зменшується при переході до максимального тиску.

У результаті математичної обробки експериментальних даних стиску тіста для бубликів отримане емпіричне рівняння:

$$pV^a = b \cdot 10^c, \quad (6.26)$$

де p - тиск, МПа; V - об'єм тіста, см³; a , b , c - емпіричні коефіцієнти, наведені у таблиці 6.58.

Таблиця 6.58 – Залежність коефіцієнтів рівняння (6.26) від вмісту газової фази в тісті

Коефіцієнт	Вміст газової фази, %		
	6,65	11,8	15
a	37,2	18,0	17,89
b	0,83	0,18	0,98
c	54	26	25

З рівняння (6.26) слідує, що показник ступені об'єму тим більше, чим менше вміст газової фази.

Вважають, що стисливість тіста можна пояснити стисливістю газових пухирчиків та деформацією структурної сітки, яка викликана зменшенням відстаней між молекулами біополімерів, що входять до складу тіста. Обидва процеси відбуваються одночасно,

але в окремі відрізки часу один з них може переважати.

На кривих розвантаження (рисунок 6.30) спостерігається особливість: кожна з них на початку розвантаження має ділянку, паралельну осі ординат, на якій матеріал інертний до змінення навантаження, тобто на змінення тиску тісто не відповідає збільшенням об'єму.

Наведені дані свідчать, що на початку процесу стиску газові пухирчики, розташовані у всьому тісті, стискаються, а при подальшому підвищенні тиску газ дифундує у тестову масу. При повному розчиненні газу змінення об'єму можливе тільки у результаті деформації структурної сітки. При зниженні навантаження на визначену величину розчинений газ починає виділятися з тестової маси, що приводить до його збільшення. З подальшим зниженням навантаження швидкість виділення газу зростає. Для однакового тиску кількість виділеного газу менше, ніж було в тісті протягом стиску. Тому крива розвантаження на великій ділянці знаходиться під кривою стиску, і тільки на

останньої ділянки картина змінюється. Приріст об'єму газу після зняття навантаження стає поясненим, оскільки протягом досліду відбувається процес бродіння та утворення нових порцій газу.

Криві стиску хлібопекарного тіста відражають сучасні уявлення теорії пресування дисперсних матеріалів та дозволяють глибше з'ясувати фізичні явища, які відбуваються в тістоділильних машинах.

Таблиця 6.59 – Характеристики пшеничного борошна різних сортів

Сорт	Насипна щільність, кг/м ³	Щільність, кг/м ³	Питома поверхня, см ² /г
Вищий	550-600	1410-1600	2950
Перший	550-580	1350-1510	2600
Другий	520-550	1200-1360	2260

Були досліджені фізичні характеристики пшеничного борошну (таблиця 6.59) [30]. Визначали: E_M - модуль деформації, що відповідає деформації матеріалу за 5хв прикладення

навантаження, E_D - при тривалості більш ніж 5 хв.

Зразок знаходився під дією вертикального p та бокового p_r тиску. Коефіцієнт бокового тиску ζ визначали як відношення p_r до p . Отримані результати наведені у таблицях 6.60 та 6.61.

Таблиця 6.60 – Залежність модуля $E_M \cdot 10^{-5}$ (Па) від напруження та коефіцієнту бокового тиску

ζ	Вертикальне напруження $p \cdot 10^{-5}$, Па				
	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
0,5	25	38	51	63	75
0,7	56	74	93	-	-
0,9	78	99	-	-	-
1,0	84	103	-	-	-

Таблиця 6.61 – Залежність модуля $E_D \cdot 10^{-5}$ (Па) від тиску та тривалості зберігання ($\zeta=0,44$)

Напруження $p \cdot 10^{-5}$, Па	Тривалість зберігання, г					
	0	1	3	6	12	24
0,43	18	16	15	15	15	14
0,77	24	20	20	19	19	18
1,00	30	24	23	22	22	21

Проводили дослідження релаксації напружень у бубликовому тісті ($W=0,30-0,33$ кг/кг, $t=28^{\circ}\text{C}$), яку характеризували тривалістю процесу релаксації та кінцевим напруженням. У таблиці 6.62 наведені значення тривалості процесу релаксації та кінцевого напруження у залежності від початкового напруження, сорту та вологості тіста.

Релаксація напружень у хлібопекарному пшеничному тісті має ті ж самі закономірності, що і в бубликовому (таблиця 6.63).

Таблиця 6.62 – Значення кінцевого напруження та тривалості процесу релаксації у бубликовому тісті

Тісто	Вологість, кг/кг	Початкове напруження $\sigma_{II} \cdot 10^{-5}$, Па	Тривалість релаксації, с	Кінцеве напруження $\sigma_{II} \cdot 10^{-5}$, Па
Для бубликів	0,332	9,81	2160	7,15
	0,322	17,15	2560	12,05
	0,328	22,54	3060	15,48
	0,330	25,48	3240	16,17
	0,320	26,46	3360	17,44

Таблиця 6.63 – Значення кінцевого напруження та тривалості процесу релаксації від виду тіста та початкового напруження

Тісто з муки	Вологість, кг/кг	Кислотність, $^{\circ}\text{H}$	Початкове напруження $\sigma_{II} \cdot 10^{-5}$, Па	Кінцеве напруження $\sigma_K \cdot 10^{-5}$, Па	Тривалість релаксації, с
I сорту	0,441	3,2	6,0	2,7	652
	0,446	2,8	3,3	1,8	482
	0,448	3,4	2,0	1,3	241
	0,445	3,6	1,3	0,9	182
II сорту	0,454	5,0	7,0	2,6	660
	0,456	5,0	4,1	2,0	480
	0,452	5,2	2,9	1,5	300
	0,453	5,1	2,3	1,3	240

Процес релаксації напружень у макаронному тісті, може характеризуватися тривалістю процесу релаксації τ_p та кінцевим напруженням σ_K [30].

Величину кінцевого напруження для макаронного тіста ($W=32\text{кг/кг}$, $t=40^{\circ}\text{C}$) можна розраховувати за формулою:

$$\sigma_K = 0,71\sigma_{II}. \quad (6.27)$$

Однією з фізико – механічних характеристик, яка враховує властивості тіста при об'ємному навантаженні, є об'ємний модуль K , залежність якого від тиску визначається рівнянням:

$$K = a_1 + a_2 p. \quad (6.28)$$

де a_1 та a_2 - емпіричні коефіцієнти, наведені у таблиці 6.64.

Дослідження макаронного тіста проводили при всебічному сти-

ску в замкнутому циліндрі, тобто в умовах, які найбільш наближені до виробничої переробки.

Таблиця 6.64 – Значення коефіцієнтів до рівняння (6.28)

Вид тіста	$a_1 \cdot 10^{-5}$, Па	a_2
Хлібопекарне пшеничне	3	6,08
Житяне	5	6,10
Макаронне	0	4,85
Бубликове	100	23,80

Процес релаксації визначається рівнем початкового напруження, температурою та вологістю макаронного тіста, швидкістю пресування, вмістом клейковини в тісті та попередньою технологічною обробкою. Початкове напруження – один з основних та вирішальних факторів релаксації напружень.

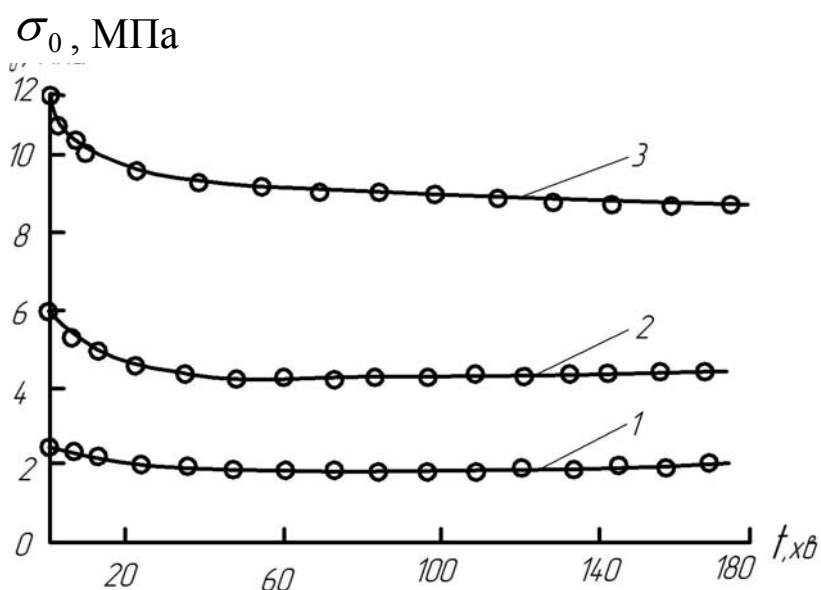


Рисунок 6.30 – Криві релаксації напружень макаронного тіста при σ_0 (МПа):

1 – 2,5; 2 – 6; 3 – 12

сації, які отримані при початкових напруженнях 12, 6 та 2,5 МПа. Напруження 12 та 6 МПа - найбільш характерні для технологічного процесу пресування макаронних виробів.

Отриманні криві релаксації напружень показують, що в мака-

Постійність температури тіста протягом експерименту забезпечували за допомогою термостату [30].

Найбільш важливі показники процесу релаксації: тривалість процесу релаксації, швидкість релаксації та кінцеве напруження.

Експериментальні дослідження проводили з макаронним тістом вологістю 32% з пшеничного борошна вищого сорту при температурі 40⁰С. Для встановлення основних закономірностей релаксації напружень в макаронному тісті були обрані наступні величини початкових напружень: 0,87; 0,94; 1,46; 1,98; 2,5 6,0 та 12 МПа. На рисунку 6.30 зображені первісні криві релак-

ронному тісті релаксація відбувається при одному і тому же початковому напруженні протягом визначеного часу до свого кінцевого напруження. Градієнт падіння напруження в процесі релаксації досягає найбільшого значення у початковий момент часу та посилюється зі збільшенням початкового напруження. Наприклад, при початковому напруженні 12 МПа падіння напруження протягом 12 хвилин склало 2,2 МПа, а за наступні 156 хвилин – лише 1,2 МПа.

При початковому напруженні 6 МПа за перші 12 хвилин напруження зменшилося на 1,1 МПа, а за наступні 132 хвилини – на 0,65 МПа. Така закономірність спостерігається і при інших початкових напруженнях.

Для оцінки інтенсивності процесу релаксації у часі було знайдене змінення фактичної швидкості релаксації за формулою:

$$v_p = (\sigma_1 - \sigma_2) / (t_2 - t_1), \quad (6.29)$$

де $(\sigma_1 - \sigma_2)$ - падіння напруження протягом часу $(t_2 - t_1)$.

Тобто, різке падіння напруження спостерігається спочатку, коли процес проходить з великою швидкістю, у наступний же час відбувається поступове затухання швидкості релаксації. Наприклад, при $\sigma_0 = 12$ МПа за перші 24 хвилини швидкість релаксації падає з 7,2 до 0,555 кПа/с, а при $\sigma_0 = 6$ МПа протягом того ж часу - з 1,67 до 0,14 кПа/с, тобто у першому випадку швидкість зменшується приблизно у 13 разів, а у другому – у 12 разів. Таке сильне падіння швидкості релаксації пояснюється більш високим напруженням, яке прикладене в початковому періоді, у порівнянні з напруженням у наступний час випробування. По мірі зменшення напруження швидкість релаксації напружень, тобто швидкість зменшення пружної складової загальної деформації, знижується при всіх заданих початкових напруженнях.

Аналіз експериментальних релаксаційних кривих показав, що процес релаксації напружень у макаронному тісті можна характеризувати двома показниками – тривалістю процесу релаксації t_p та кінцевим напруженням σ_k . Під тривалістю процесу релаксації уявляється проміжок часу, протягом якого матеріал з нерівноважного напруженого стану переходить у рівноважне, встановлене. По досягненні цього часу крива падіння напруження переходить у пряму, що паралеле-

льна осі абсцис, при цьому швидкість релаксації дорівнює нулю.

У таблиці 6.65 наведені дані випробувань макаронного тіста при різних початкових напруженнях. Наведені дослідні величини дали можливість після обробки описати залежність тривалості процесу релаксації від початкового напруження у вигляді рівняння:

$$t_p = a\sigma_0^3 + b\sigma_0^2 + c\sigma_0 + q, \quad (6.30)$$

де t_p - тривалість процесу релаксації, хв.; σ_0 - початкове напруження, МПа; a, b, c, q - емпіричні коефіцієнти.

Для тіста вологістю 32% при температурі 40°C: $a=11,8 \cdot 10^{-7}$ хв/МПа³; $b=-25,34 \cdot 10^{-4}$ хв/МПа²; $c=1,64$ хв/МПа; $q=-177$ хв.

Таблиця 6.65 – Залежність тривалості релаксації та кінцевого напруження від початкового напруження

Показники	Початкове напруження, МПа						
	0,87	0,94	1,46	1,98	2,50	6,00	12,0
Тривалість релаксації, хв	1,5	1,7	16,0	41,0	102	144	168
Кінцеве напруження, МПа	0,79	0,82	1,32	1,52	1,82	4,25	8,60

Експериментальне дослідження релаксації напружень у макаронному тісті показує, що між кінцевим та початковим напруженнями існує лінійна залежність. Оскільки у кожний момент часу напруження в тісті визначається тільки долею пружної деформації, яка залишилася до цього часу, то стає ясною причина зростання σ_k з підвищенням σ_0 . Криві релаксації мають дві виражених ділянки, перша з котрих характеризується різким падінням напружень в умовах швидко затухаючої швидкості деформації, а друга визначається уповільненим падінням напружень з малою швидкістю релаксації. На другій ділянці крива релаксації асимптотично наближається до деякої прямої, що паралельна осі абсцис та відстає від неї на величину напруження, при якому практично не відбувається релаксації.

При обробці кривих релаксації отримали рівняння для двох періодів релаксації напружень. Рівняння першої ділянки:

$$\sigma_1 = (\sigma_0 - \sigma_k) / (1 + bt/a)^{1/b} + \sigma_k; \quad (6.31)$$

Рівняння другої ділянки кривої релаксації

$$\sigma_2 = (\sigma_0 - \sigma_k) e^{-t/n} + \sigma_k, \quad (6.32)$$

де a , b , n - коефіцієнти рівнянь (6.31) та (6.32), таблиця 6.66.

Таблиця 6.66 – Коефіцієнти до рівнянь (6.31) та (6.32)

Коефіцієнти рівняння (6.31)			Коефіцієнти рівняння (6.32)					
σ_0 , МПа	a , хв	b	σ_0 , МПа					
6	12,40	0,66	σ_0 , МПа	0,87	0,94	1,46	1,98	2,5
12	6,25	1,61	n , хв	1,02	2,47	7,20	8,10	22,8

Було визначено, що криві релаксації чітко поділяються на дві ділянки тільки при початкових напруженнях вище 2,45 МПа, при яких практично здійснюється пресування макаронного тіста. Якщо початкове напруження нижче 2,45 МПа, то криві релаксації з достатньою точністю можуть бути описані одним рівнянням (6.32).

У рівняння релаксації входить значення σ_k , величину якого можна визначити у залежності від σ_0 за рівнянням:

$$\sigma_k = c\sigma_0, \quad (6.33)$$

де c - емпіричний коефіцієнт, який для тіста вологістю 32% та температурі 40⁰С дорівнює 0,71.

Температура відноситься до факторів, які найбільш сильно впливають на релаксацію напружень у тісті. З підвищенням температури збільшується рухомість атомів, зростає швидкість дифузії, знижується в'язкість тіста, у результаті чого збільшується швидкість релаксації. Одночасно з підвищенням температури знижуються пружні властивості макаронного тіста, воно стає більш пластичним.

Дослідження впливу температури на релаксацію напружень проводили з макаронним тістом вологістю 32% з борошна вищого сорту при наступних температурах: 22, 30, 40, 45, 50 та 55⁰С. Експерименти здійснювали при $\sigma_0 = 6$ МПа та швидкості робочого поршню 4 мм/хв. Результати досліджень показали, що релаксація напружень в макаронному тісті відбувається при всіх температурах, але з різною

інтенсивністю. До того ж у тісті відбувається релаксація при постійній температурі визначений час до свого кінцевого напруження. Градієнт падіння напруження в процесі релаксації, як і у попередніх дослідках, досягає найбільшого значення у початковий момент часу. Наприклад, при температурі 40⁰С напруження протягом 12 хв зменшилося на 1,1 МПа, за 132 хв, що залишилися, лише на 0,65 МПа; при температурі 50⁰С за перші 12 хв напруження змінилося на 1,6 МПа, за 120 хв, що залишилися, - на 1,7 МПа. З підвищенням температури відбувається зменшення тривалості першої ділянки кривої релаксації: якщо при температурі 30⁰С тривалість початкової ділянки дорівнює 54 хв, то при 40⁰С – 42 хв, а при 50⁰С – 24 хв.

З підвищенням температури змінюються також величини коефіцієнтів рівнянь (6.31) та (6.32), як наведено у таблиці 6.67. Зі збільшенням температури тіста різко знижується тривалість релаксації.

Таблиця 6.67 – Значення коефіцієнтів рівнянь (6.31) та (6.32)

Температура тіста, ⁰ С	<i>a</i> , хв	<i>b</i>	<i>n</i> , хв
30	16,50	0,93	83,0
40	12,40	0,66	73,5
50	9,54	1,86	44,6

Таблиця 6.68 – Залежність кінцевого напруження від температури

Температура тіста, ⁰ С	30	40	45	50	55
Кінцеве напруження, МПа	4,8	4,25	2,7	2,7	2,5

Наприклад, якщо при температурі тіста 22⁰С вона дорівнює 186 хв, то при 55⁰С – 126 хв, тобто зменшується приблизно у 1,5 рази.

На тривалість процесу великий вплив оказує клейковина, яка володіє великою пружністю. При цьому найбільшу пружність вона має при низьких температурах. Кінцеве напруження також падає з підвищенням температури, що наведено у таблиці 6.68.

На основі експериментальних даних була знайдена

залежність тривалості процесу релаксації від температури у вигляді рівняння:

$$t_p = M/T + H, \quad (6.34)$$

де t_p - тривалість процесу релаксації, хв; T - температура тіста, ⁰С;

M, H - емпіричні коефіцієнти. При $\sigma_0 = 6$ МПа $M = 2234, H = 87$.

Таким чином, якщо вважати граничною температурою для ма-

каронного тіста за технологічними умовами 55 – 60⁰С, то тривалість релаксації дорівнює 127 – 124 хв.

Вологість тіста впливає на консистенцію макаронного тіста та його технологічні властивості. Різниця у вологості лише на 0,5% (при інших рівних умовах) помітно впливає на тиск пресування. З підвищенням вологості декілька знижується в'язкість тіста та значно знижується напруження зсуву. Одночасно з підвищенням вологості знижуються пружні та зростають пластичні характеристики тіста.

Для дослідження впливу вологості на процес релаксації брали тісто вологістю 28,2; 30,3 та 32% [30]. Експерименти проводили при температурі 40⁰С та початковому напруженні, яке дорівнювало 6 МПа. Встановлено, що кінцеве напруження зі зростанням вологості на 3,8% знижується на 17,5%, а тривалість релаксації – на 7,8%.

Таблиця 6.69 – Значення коефіцієнтів до рівнянь (6.31) та (6.32)

Вологість тіста, %	<i>a</i> , хв	<i>b</i>	<i>n</i> , хв
28,2	25,0	1,90	62,5
30,3	15,6	4,64	62,5
32,0	12,4	0,66	73,5

Це пов'язане з тим, що кінцеве напруження чутливе до змінення величини пружної складової деформації, яка падає зі збільшенням вологості.

Експериментальні дані дозволили визначити величини коефіцієнтів рівнянь (6.31) та (6.32) (таблиця 6.69).

З наведених даних можна зробити висновки, що при зміненні вологості макаронного тіста у границях 28 – 32%

тривалість процесу релаксації мало змінюється, хоч характер кривої релаксації (особливо її перша ділянка) не залишається постійним.

Пресування макаронних виробів полягає у пластичному формозмінненні тестової маси та супроводжується пластично – в'язкою течією тіста по каналам робочих органів макаронних пресів. Релаксація напружень та повзучість, яка при цьому процесі відбувається, є видами пластичної деформації. Течія процесів пластичної деформації в умовах релаксації напружень приводить до зниження пружних та підвищення пластичних властивостей макаронного тіста. У свою чергу зріст пластичності тіста веде до зменшення енергії, яка витрачається на формування виробів, при цьому якість виробів поліпшується.

Для практики пресування макаронного тіста найбільший інтерес представляє перший період релаксації, оскільки на долю цього періоду, який складає лише 8 – 10% від тривалості релаксації, приходить 2/3 тиску, що падає протягом всієї релаксації.

Процес деформування йде без накопичення напруженого стану

тільки у тому випадку, якщо швидкість деформації менш ніж оборотна величина тривалості процесу релаксації. Таким чином, значення оборотної величини тривалості процесу релаксації вказує найвищу величину тих швидкостей деформації, при яких найбільш вигідно вести процес пресування макаронного тіста, оскільки опір деформуванню маси тіста при цьому буде найменшим.

Формування заготовок тіста для бубликів полягає у пластичному змінненні форми та супроводжується пластично – в'язкою течією по робочим каналам ділильне – закаточної машини [30]. Раціональний вибір розмірів робочих органів машини, визначення навантажень, які виникають у приводі нагнітальних поршнів, та потужності на формування можливі на основі розрахунків, що пов'язані з реологічними властивостями бубликового тіста. Реологічна характеристика тіста не буде повною, якщо не враховувати процес релаксації напружень.

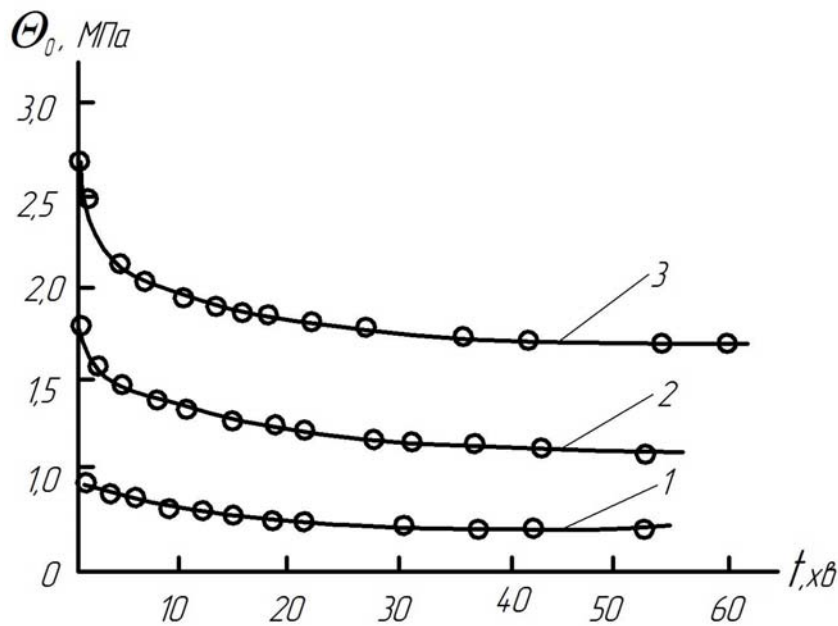


Рисунок 6.31 – Криві релаксації напружень бубликового тіста при σ_0 (МПа):

1 – 0,9; 2 – 1,8; 3 – 2,7

Випробували тісто для українських, ванільних, цукрових та гірчичних бубликів вологістю від 30 до 33% при температурі 28⁰С.

На релаксацію напружень суттєвий вплив оказує початковий тиск, величину якого в досліді змінювали від 1 до 2,7 МПа (рисунок 6.31). Такий тиск у тісті виникає у процесі формування заготовок на ділильно – закаточній машині.

Як свідчать дані таблиці 6.70 релаксація напружень у бубликовому тісті, яке знаходиться в умовах всебічного стиску та постійності загальної деформації, розвивається з різною інтенсивністю у залежності від початкового напруження. З підвищенням σ_0 збільшуються тривалість релаксації та кінцеве напруження. Змінення вологості від

30 до 33% не оказує суттєвого впливу на величини t_p та σ_k .

Результати експериментів дозволили встановити, що увесь процес релаксації напружень можна також поділити на два періоди.

Наприклад, при $\sigma_0=2,7$ МПа падіння напруження протягом 10 хв склало 0,62 МПа, а за 51 хв процесу – 0,3 МПа; таким же чином при $\sigma_0=1$ МПа початковому періоду, що триває 10 хв, відповідає падіння напруження на 0,17 МПа, а всьому наступному періоду часу в 26 хв – на 0,1 МПа.

Таблиця 6.70 – Залежність параметрів релаксації від виду та вологості тіста

Тісто	Вологість, %	Початкове напруження, МПа	Тривалість процесу релаксації, хв	Кінцеве напруження, МПа
Бубликове	32,2	1,0	36	0,73
	32,8	2,3	51	1,58
	33,0	2,6	54	1,65
	32,0	2,7	61	1,78
Гірчичне	31,2	2,6	60	2,00
Цукрове	33,0	2,4	57	1,54
Ванільне	31,4	2,7	72	1,90

Інтенсивність процесу релаксації напружень у бубликовому тісті може визначатися швидкістю релаксації ν_p . Для бубликового тіста вологістю 32% при початковому напруженні 2,7 МПа за перші 10 хв ν_p падає з 3,3 до 0,3 кПа/с, за наступні

50 хв ν_p падає з 0,3 до 0,056 кПа/с. Потім крива релаксації переходить у горизонтальну пряму і швидкість релаксації стає дорівнювати нулю. Таким чином, за перші 10 хв ν_p падає приблизно у 10 разів, а за наступні 50 хв – у 6 разів. Обробка експериментальних даних для першого періоду дозволила отримати рівняння:

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - (A_p + B_p \sigma_0) 10^{-3} \sqrt{t} \right], \quad (6.35)$$

де σ - напруження у момент часу t , Па; σ_0 - початкове напруження (тиск), Па; t - поточний час, с; A_p , B_p - емпіричні коефіцієнти.

Для тіста, яке досліджувалось, $A_p=4,9$; $B_p=0,193 \cdot 10^{-5}$.

Рівняння (6.35) справедливе для бубликового тіста вологістю від 30 до 35% при температурі 28⁰С та початковому напруженні (тиску), яке не перевищує 2,7 МПа.

Дослідження релаксації напружень хлібопекарного тіста проводили, стискаючи поршнем у циліндрі до різноманітних кінцевих тисків від 50 до 300 кПа. Експерименти проводили при різних швидкостях поршню: 3,56; 6,24 та 12,4 мм/с. Випробували тісто з борошна трьох сортів: житнього, пшеничного I та II сортів.

Результати дослідів дозволили знайти рівняння, яке відображає процес падіння тиску у хлібопекарному тісті при постійній деформації у часі:

$$\sigma = A_1 t^2 - B_1 t + C_1, \quad (6.36)$$

де σ - напруження (тиск) у тісті в момент часу t МПа; t - поточний час, с; A_1, B_1, C_1 - емпіричні коефіцієнти, наведені у таблиці 6.71.

Таблиця 6.71 – Коефіцієнти до рівняння (6.36)

Сорт тіста	$A_1 \cdot 10^6$	$B_1 \cdot 10^3$	$C_1 \cdot 10^3$
Пшеничне з борошна I сорту	299,37	922,57	269
Пшеничне з борошна II сорту	154,77	812,00	259
Житнє	126,94	678,91	222

Тиск у тісті різко падає протягом 10 – 12 с з моменту зупинки поршню. Потім відбувається уповільнене падіння тиску та після 40 с він практично вирівнюється.

Процес релаксації у хлібопекарному тісті також поділяється на два періоди.

Особливо чітко спостерігається перший період для житнього тіста. При початковому напруженні 240 кПа падіння напруження за перші 5 с склало 90 кПа, а за решту 35 с – лише 35 кПа.

При розрахунках формуючих та транспортувальних машин харчового виробництва необхідно знати щільність маси, яка переробляється. Оскільки в процесі переробки відбувається ущільнення продукту, необхідно враховувати не тільки значення щільності при атмосферному тиску, але також її змінення у залежності від тиску.

У теорії пресування є два основних напрямки: перший характеризується введенням ряду припущень, які дозволять розв'язувати задачу експериментально для будь – якого визначеного матеріалу; другий базується на фізичній сутті процесу з його математичним описом. Для отримання кусків тіста однакової маси при поділенні його машинами, які працюють за об'ємним принципом, необхідно забезпечити

постійний об'єм кусків при визначеній щільності тіста. Головним фактором, який визначає однакову щільність кусків є постійність тиску на тісто в процесі його стиску.

Досліджувалися три сорту тіста: житяне, пшеничне з муки II та I сортів [30]. Встановлене, що щільність тіста помітно збільшується до тиску 0,15 МПа, при подальшому підвищенні тиску до 0,3 МПа змінення щільності незначне. Отримані дані наведені у таблиці 6.72.

Таблиця 6.72 – Залежність щільності хлібопекарного тіста від тиску

Вид тіста	Тиск, кПа				
	0	14	58	142	261
Житнє ($W=0,528$ кг/кг, $t=28^{\circ}\text{C}$)	1030	1045	1103	1140	1175
Пшеничне з муки II сорту ($W=0,46$ кг/кг, $t=31^{\circ}\text{C}$)	1010	1050	1108	1148	1181
Пшеничне з муки I сорту ($W=0,43$ кг/кг, $t=30^{\circ}\text{C}$)	1042	1063	1110	1148	1180

Змінення щільності з підвищенням тиску практично не залежить від сорту тіста. Тобто, при роботі подільнику при малих тисках (нижче 0,15 МПа) необхідно пред'являти підвищенні вимоги до постійності тиску. При підвищених тисках змінення тиску в подільнику тіста незначно впливає на відхиленнях в масі кусків тіста.

Для визначення основних кінематичних та геометричних параметрів нагнітальних органів машин необхідно знати, як змінюється щільність бубликового тіста у залежності від тиску. Окрім того, щільність тестової заготовки характеризує якість готового виробу.

Для визначення залежності щільності бубликового тіста від тиску проведені експерименти з виробничим тістом для українських бубликів вологістю від 31,2 до 32,4 % та для ванільних, цукрових та гірчичних бубликів вологістю 31,2 – 33% при температурі 28°C [30].

Залежність щільності від тиску для цих видів тіста має однаковий характер, і для практичних цілей немає необхідності отримання залежностей для окремих сортів тіста. Спочатку відбувається стиск тіста, яке має велику кількість повітряних включень, при цьому залежність щільності від тиску має криволінійний характер.

Після ущільнення тіста при тиску вище 0,8 МПа ця залежність приймає лінійний характер. Оскільки у робочих циліндрах машини при формуванні тестових заготовок тиск перевищує 0,8 МПа, то для практичних розрахунків використовують залежність:

$$\rho = 1282 + 6,6 \cdot 10^{-5} p, \quad (6.37)$$

де p - тиск формування, Па.

Рівняння (6.37) дозволяє визначити щільність бубликового тіста в інтервалі тисків від 0,8 до 3 МПа.

Були вивчені закономірності змінення щільності житньої головки та тіста різної вологості в процесі бродіння, результати наведені у таблицях 6.73 та 6.74.

Таблиця 6.73 – Змінення щільності житньої головки (кг/м³) у процесі бродіння

Вологість, кг/кг	Тривалість бродіння, хв.					
	0	30	75	110	175	240
0,450	1175	1169	924	883	865	862
0,464	1150	1140	924	870	850	846
0,470	1150	1140	883	849	840	832
0,490	1150	1140	879	808	872	839
0,510	1150	1140	866	800	753	707

Таблиця 6.74 – Змінення щільності житнього тіста (кг/м³) у процесі бродіння

Вологість, кг/кг	Тривалість бродіння, хв.			
	0	25	55	90
0,48	1150	1100	977	870
0,49	1150	1088	965	870
0,50	1150	1073	936	860
0,51	1150	1072	934	850
0,52	1150	1063	925	840

Питання для самоконтролю

1. Який характер має деформація харчових мас в умовах всебічного стиску?
2. Які питання розглядаються при вивченні об'ємної деформації матеріалу під тиском в умовах всебічного стиску?
3. Які процеси оказують суттєвий вплив на умови об'ємної деформації та течії харчових мас при їх пресуванні, формуванні та транспортуванні по трубах?
4. Які практичні проблеми пов'язані з особливістю тіста змінювати об'єм під дією всебічного стиску?
5. Які фізичні явища відбуваються у тісті в процесі стиску?
6. Які показники процесу релаксації тіста є найбільш важливими? Охарактеризуйте криві релаксації.
7. Як впливають температура та вологість на релаксацію напружень у тісті?

6.3 Поверхневі характеристики сипучих продуктів та борошняних виробів

6.3.1 Адгезія тестових мас

У тістороздільних та транспортувальних обладнаннях адгезія тіста є надто не бажаною. Тому у великій кількості дослідницьких робіт наведені результати пошуку засобів, які сприяють зниженню прилипання тіста до поверхонь технологічного обладнання.

Були проведені дослідження по визначенню характеристик адгезії хлібопекарного тіста з пшеничного борошна I сорту. Експерименти показали, що на адгезійний тиск тіста впливають тривалість та напруження контакту, вологість та час замісу тіста, а також матеріал підкладки [31]. Наприклад, при збільшенні тривалості контакту тіста зі зразком, який випробується, з 1 до 5 хв адгезійний тиск підвищується з 7 до 9 кПа; при змінненні напруження контакту з 5 до 20 МПа він збільшується з 4 до до 9,2 кПа. Подібна картина спостерігається з підвищенням тривалості замісу та вологості тіста. Збільшення вологості з 40 до 50% веде до змінення адгезійного тиску з 6,2 до 12,8 кПа, тобто майже вдвічі.

При випробуваннях різних матеріалів було встановлено, що адгезійний тиск тіста до сталльної поверхні, обробленої по 10-му класу чистоти, у 2 рази перевищує тиск до зразку з фторопласту-4. Результати досліджень дозволили припустити справедливність гіпотези про дифузійний характер зв'язку пшеничного тіста з конструкційними матеріалами (металами, полімерами, тканиною).

Був досліджений вплив цукру та жиру на властивості адгезії тіста з використанням експериментальної установки, яка діяла за принципом відриву гладкого металічного диску площею 10 см^2 від шару тіста товщиною 0,25 мм, при напруженні контакту 10 кПа, тривалості контакту 1 хв, швидкості відриву 8 см/хв. Для експериментів готували тісто вологістю 39% з борошна вищого сорту безопарним способом при температурі бродіння 32°C . Вміст цукру та жиру в зразках тіста знаходився у границях від 5 до 20%.

Обробка результатів випробувань показала, що залежність адгезійного тиску від тривалості бродіння тіста з різним вмістом цукру та жиру близька до лінійної та може бути описана рівнянням:

$$\sigma_{ад} = A + Bt, \quad (6.38)$$

де $\sigma_{ад}$ - адгезійний тиск, кПа; t - тривалість бродіння, хв.; A, B – емпіричні коефіцієнти, які залежать від вмісту жиру та цукру (таблиця 6.75).

Таблиця 6.75 – Залежність коефіцієнтів рівняння (6.38) від вмісту жиру (чисельник) та цукру (знаменник) у тісті

Вміст у тісті жиру або цукру, %	A , кПа	$B \cdot 10^3$, кПа/хв
0	7,4/7,4	8,5/8,5
5	8,0/8,7	8,6/9,2
10	8,8/12,2	9,2/9,6
15	9,6/14,4	9,3/9,7
20	10,4/14,8	9,4/9,9

Підвищення вмісту цукру веде до більш швидкого росту адгезійного тиску. Так, для тіста з вмістом жиру 20% адгезійний тиск збільшується у 1,5 разів, а з 20% цукру – більш ніж у 2 рази. Це пов'язане зі зниженням в'язкості тіста, що веде до більш інтенсивного дифузійного процесу та збільшення адгезійного тиску.

Адгезійний тиск тістових заготовок для формових сортів хліба до поверхні зразків з антиадгезійним покриттям визначали у залежності від температури та вологості тіста [30].

Отримані залежності наведені на рисунку 6.32.

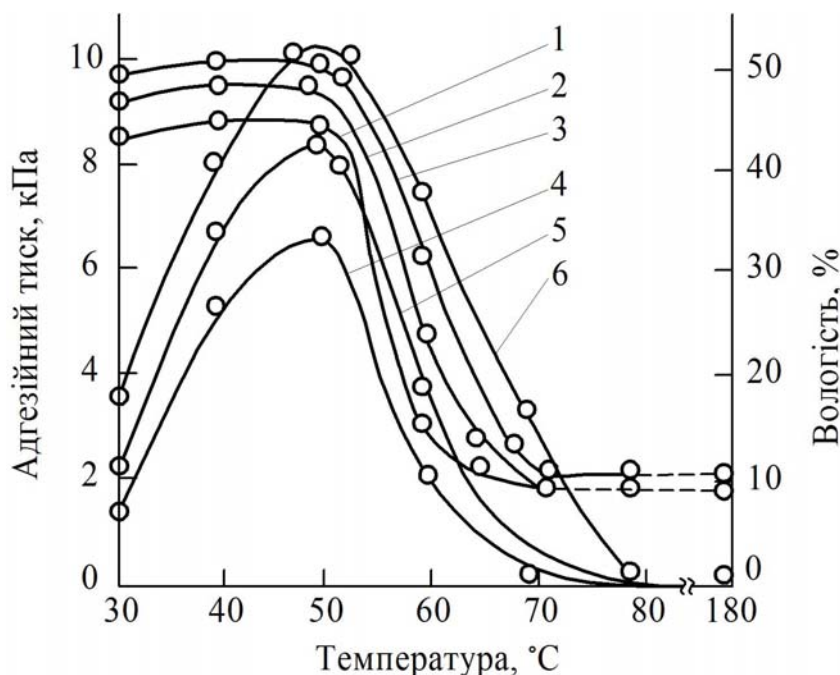


Рисунок 6.32 – Залежність адгезійного тиску тестових заготовок від вологості (криві 1 – 3) та температури (криві 4 – 6) тіста з борошна:

- 1 – житнього; 2 – житяне – пшеничного;
- 3 – пшеничного

Як видно, максимальним адгезійним тиском володіють тестові заготовки при 50⁰С, при температурі 88⁰С та тривалості 50-60 хв тиск знижується до нуля. Така закономірність пояснюється тим, що зі збільшенням температури до 50⁰С внаслідок активності амілаз тіста гідролізується крохмаль та накопичуються продукти

гідролітичного розпаду, які збільшують липкість тіста.

Подальше підвищення температури викликає інактивацію амілолітичних та протеолітичних ферментів, з 70⁰С починається денатурація білку, зменшується вологість корки хліба, яка утворюється (до 10%), що різко знижує адгезійну міцність.

Вплив борошняної заварки на адгезійні властивості тіста необхідно враховувати, оскільки відповідно технології заготовки перед формуванням змочують заваркою, для того, щоб надати поверхні хлібу характерний колір та глянсуватість.

Дослідження довели, що зі збільшенням тривалості контакту (з 4 до 10 с) у всіх випадках підвищується адгезійний тиск. Наприклад, для зразку з фторопласту воно зросло майже в 2 рази. При контактуванні протягом 4 с та напруженні 9,86 – 29,66 кПа спостерігається чистий адгезійний відрив зразку від тіста. При подальшому збільшенні контакту (до 6 с) та напруженні більш ніж 25,7 кПа відбувається змішаний адгезійно – когезійний відрив.

При 8 с контакту змішаний відрив настає, якщо його напруження перевищує 21,74 кПа. Для 10 с контакту та напруження, яке перевищує 17,78 кПа, характерний когезійний відрив.

Випробування з використанням сталюого зразку показали, що адгезійний тиск тіста до сталі більш, ніж до фторопласту. Так, при напруженні попереднього контакту 9,86 кПа та тривалості його 4 с адгезійний тиск складає 4,25 кПа, а при 8 с при тому же напруженні – 15,15 кПа, тобто збільшується майже у 3,5 разів. Окрім того, для 4 с контакту та напруження більш 25,7 кПа характерний змішаний адгезійно – когезійний відрив, а для 6 і 8 с та напруженні контакту більш 13,82 кПа – когезійний відрив.

Заварка оказує великий вплив на адгезійні властивості тіста: у зразків зі сталі та фторопласту, які змочені заваркою, спостерігається чистий адгезійний відрив. У сталюого зразку, змоченого заваркою, адгезійний тиск декілька нижче, ніж у чистого сталюого, в однакових умовах експерименту.

При напруженні контакту 9,86 кПа та змінненні тривалості від 4 до 8 с адгезійний тиск зростає з 3,54 до 8,5 кПа (у 2,4 рази), а для чистого сталюого зразку він у 3,5 разів більше.

Застосування фторопластового зразку, змоченого заваркою, при напруженні контакту 9,86 кПа та збільшенні його тривалості з 4 до 10 с зменшує адгезійний тиск незначно. З підвищенням напруження до 13,82 кПа при тієї же тривалості контакту різко зростає напруження

відриву: з 2,62 до 8,06 кПа при 4 с контактування, з 3,4 до 13,15 кПа при 6 с і так далі, тобто у 3 – 4 рази. Потім (від 13,82 до 25,7 кПа) напруження відриву збільшується менш інтенсивно. Так, для 4 с воно змінюється від 8,06 до 12 кПа. Наступне напруження попереднього контакту при тієї же тривалості (4 с) дає різкий стрибок адгезійного тиску – до 18,1 кПа. Робочий орган може бути сталевим, але у цьому випадку бажане змочування тістової заготовки борошняною заваркою до початку формування. При використанні фторопластового покриття поверхні робочого органу застосування заварки не є обов'язковим.

Тобто, зменшення адгезійних сил досягається використанням антиадгезійних матеріалів та покриттів або спеціальної обробки поверхні тістових заготовок. На хлібопекарних виробництвах часто для зменшення прилипання тіста використовується борошняна підсипка, змазка маслом або заваркою, обдув повітрям. Очевидно, що використання муки для цих цілей економічно недоцільно та, окрім того, погіршує санітарний стан цехів виробництва.

Представляє практичний та науковий інтерес дослідження залежності адгезії тестових заготовок від тривалості та інтенсивності обдування їх повітрям. Для розв'язання цієї задачі був обраний високоінтенсивний конвективний спосіб сушки матеріалів зі застосуванням соплового обдування. Для експериментів брали пшеничне тісто вологістю 45% при температурі 23 – 24⁰С.

Результати дослідів по визначенню адгезії тіста до сталі Ст.3 наведені на рисунках 6.33 - 6.34. Тобто, залежність адгезійного тиску від тривалості обдування має вигляд спадної експоненти. Найбільш інтенсивно адгезійний тиск зменшується у початковий момент часу. При цьому збільшення швидкості обдування інтенсифікує зменшення адгезійного тиску. Тобто, процес утворення підсушеного поверхневого шару зі збільшенням швидкості повітря, яке обдуває, відбувається більш інтенсивно, що пояснюється теорією тепломасообміну.

Дослідження показали, що при напруженні контакту 2,77 кПа обдування протягом 10 с зменшує адгезійний тиск від 5,18 до 1,3 кПа при швидкості повітря 9,03 м/с, до 0,82 кПа – при швидкості повітря 20,5 м/с та до 0,46 кПа – при швидкості 28,6 м/с, тобто адгезійний тиск зменшується відповідно у 4,0; 6,3 та 11,2 разів.

Дослідницькі дані дозволяють отримати значення швидкості зменшення адгезійного тиску для будь – якого моменту часу.

Зіставлення таких величин може бути прийняте за характеристику інтенсивності зменшення адгезії при різних діях на тісто.

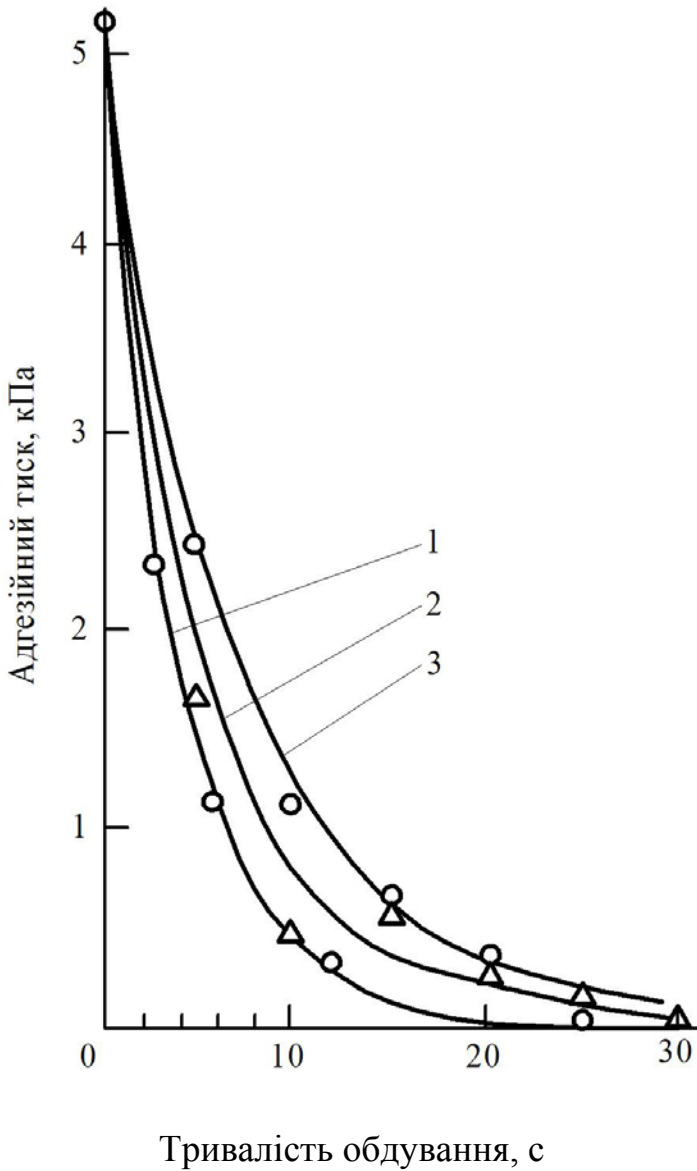


Рисунок 6.33 - Залежність адгезійного тиску від тривалості обдування при напруженні контакту 2,77 (м/с):

1 – 9,05; 2 – 20,2; 3 – 28,5

Використання обдування викликає інтенсивне підсушування поверхневого шару тіста та веде до порівняно швидкого зниження адгезійного тиску. Наприклад, тиск зменшується від 4,3 до 1,0 кПа при обдуванні повітрям зі швидкістю 9,05 м/с за 11 с, а таке саме зміння адгезійного тиску при підсушуванні завдяки природної конвенції відбувається за 470 с, тобто у 43 рази повільніше.

Другу серію експериментів провели з тістом вологістю 45% при температурі 23-24⁰С з конструкційними матеріалами: сталь Ст.3,

Максимальна швидкість зменшення адгезійного тиску спостерігається у початковий момент часу. По мірі збільшення тривалості обдування швидкість зменшення адгезійного тиску падає до мінімального значення, яке практично дорівнює нулю.

У таблиці 6.76 наведені швидкості зменшення адгезійного тиску для часу, який відповідає середньому напруженню, при різних тисках контакту та швидкостях повітря. Як слідує з таблиці 6.76, на швидкість зменшення адгезійного тиску оказують вплив як інтенсивність обдування, так і величина напруження контакту.

При цьому збільшення швидкості обдування для всіх напружень контакту веде до росту швидкості зменшення адгезійного тиску, а також до збільшення швидкості утрату адгезійного тиску зі збільшенням напруження контакту при даної швидкості повітря.

алюмінієвий сплав Д16, фторопласт-4 та оргскло.

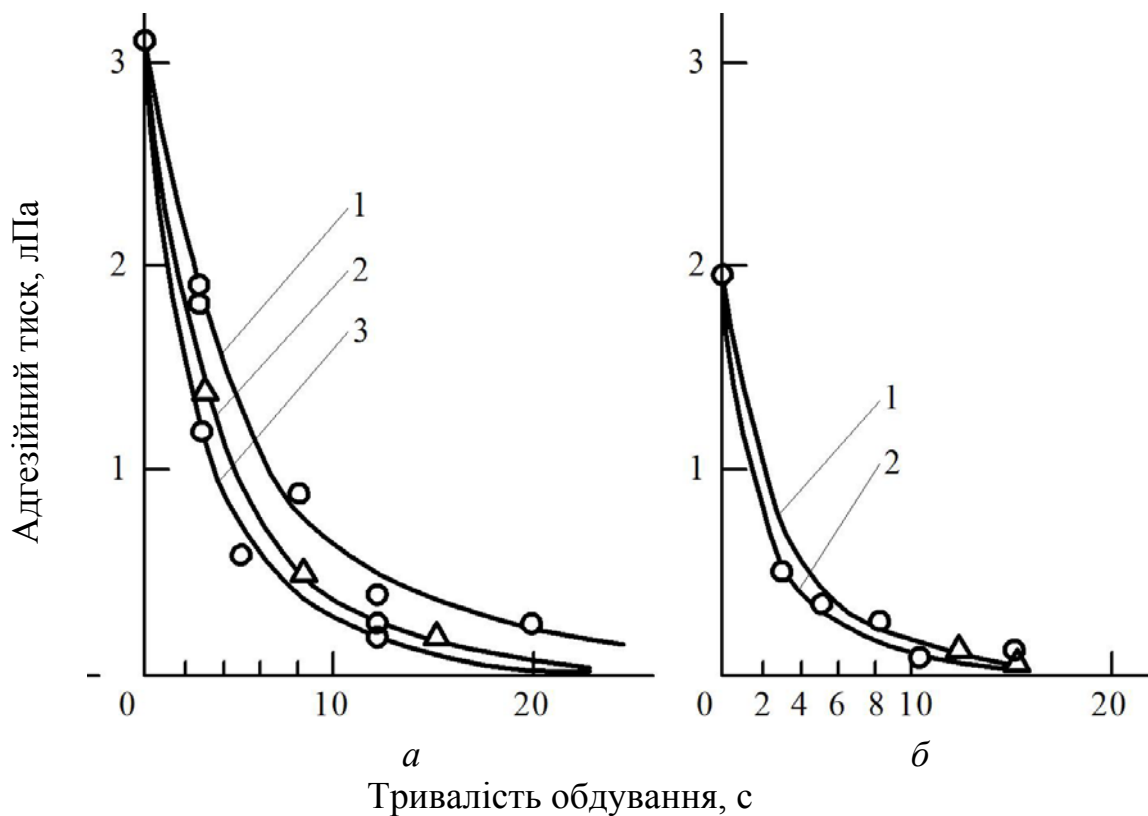


Рисунок 6.34 - Залежність адгезійного тиску від тривалості обдування при напруженні контакту 1,4 (а), 0,7 кПа (б) та швидкості повітря (м/с):
1 – 9,05; 2 – 20,2; 3 – 28,5

Таблиця 6.76 – Залежність швидкості зменшення адгезійного тиску (кПа) від швидкості повітря та напруження контакту

Швидкість повітря, м/с	Напруження контакту, кПа		
	0,7	1,4	2,77
9,03	308	405	516
20,05	440	585	692
28,6	597	718	913

Напруження попереднього контакту змінювали від 0,9 до 3,2 кПа, що відповідає напруженню, яке виникає в тісті при обробці на технологічному обладнанні. Тривалість контакту дорівнювала 4 с.

Розгляд дослідницьких залежностей, наведених на рисунку 6.35, дозволив зробити висновок, що обдування суттєво впливає на адгезію тіста до всіх матеріалів,

які досліджувалися. При цьому зі збільшенням напруження контакту зростає адгезійний тиск. Тобто, для досягнення певного адгезійного тиску при більш тривалому контакті та більшому напруженні контакту тіста з робочою поверхнею потрібне більш тривале обдування.

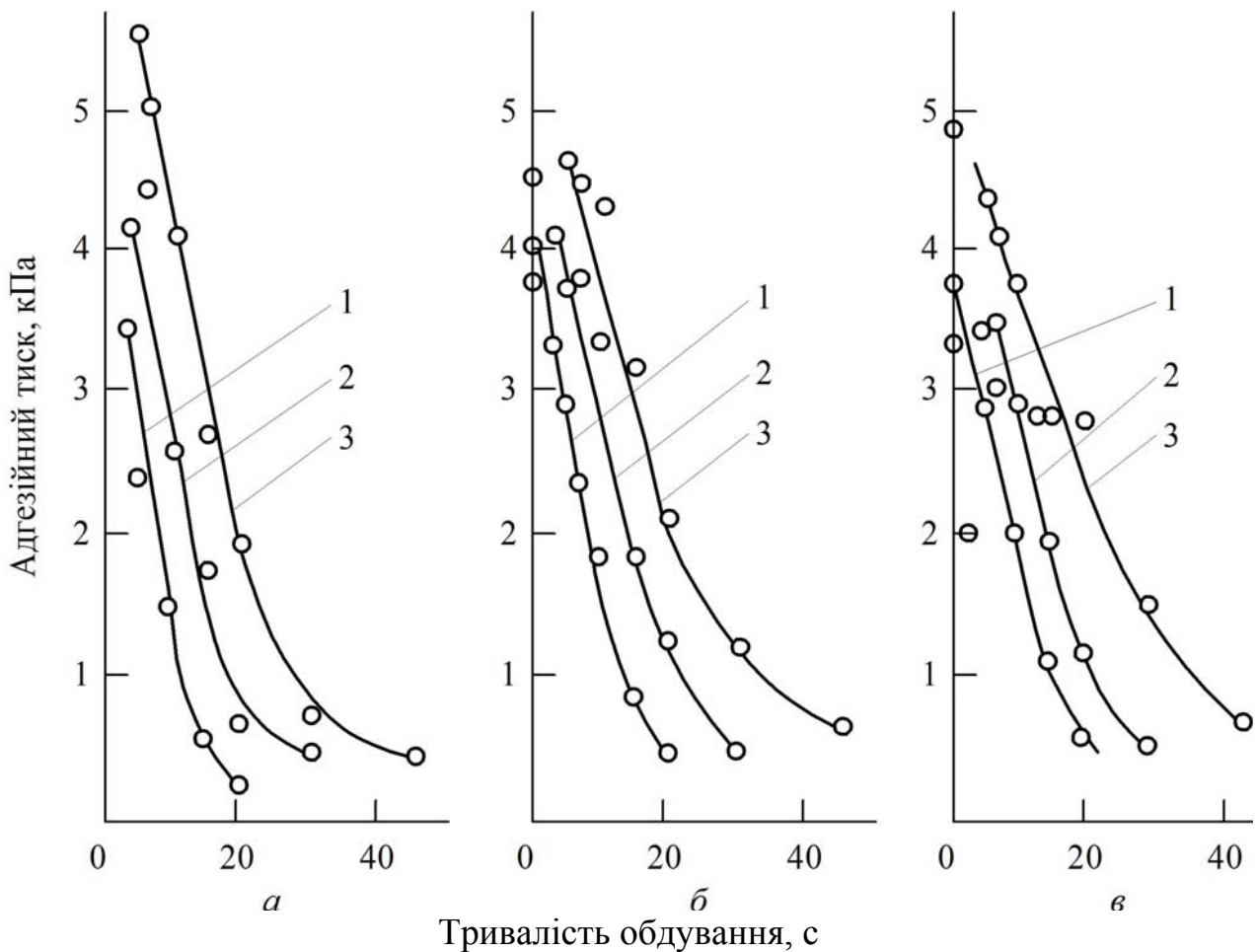


Рисунок 6.35 – Залежність адгезійного тиску тіста від тривалості обдування для сталі Ст. 3 (а), сплаву Д16 (б) та фторопласту-4 (в) при напруженні контакту (кПа):
1 – 1,06; 2 – 1,77; 3 – 3,17

Методом кореляційного аналізу знайшли рівняння множинної регресії, яке встановлює залежність адгезійного тиску від тривалості та інтенсивності обдування, а також від напруження попереднього контакту:

$$\sigma_{AD} = b_0 + b_1 t + b_2 \Delta p + b_3 \sigma_K, \quad (6.39)$$

де σ_{AD} - адгезійний тиск, кПа; t - тривалість обдування, с; Δp - напір повітря, кПа; σ_K - контактне напруження, кПа; b_0, b_1, b_2, b_3 - розрахункові коефіцієнти.

Рівняння (6.39) справедливе при змінненні тривалості обдування від 0 до 45 с, напору повітря – від 49 до 490 Па та контактного напруження – від 0,9 до 3,2 кПа.

Значення коефіцієнтів рівняння (6.39) наведені у таблиці 6.77.

Таблиця 6.77 - Значення коефіцієнтів рівняння (6.39)

Матеріал підкладки	b_0	b_1	b_2	b_3	Коефіцієнти кореляції		
					r_{01}	r_{02}	r_{03}
Сталь Ст.3	2,52	-0,109	-1,88	0,763	0,876	0,429	0,683
Сплав Д16	2,73	-0,127	-2,00	0,877	0,918	0,566	0,819
Фторопласт4	2,33	-0,122	-1,24	0,915	0,921	0,400	0,839
Оргскло	2,79	-0,119	-2,05	0,983	0,893	0,483	0,784

Для встановлення ступеню впливу кожного з обраних факторів – аргументів на результувну функцію (адгезійний тиск) були розраховані частинні коефіцієнти кореляції r_{01} , r_{02} та r_{03} , які враховують відповідно вплив тривалості обдування, напору повітря та контактного напруження. Найбільший вплив на адгезійний тиск оказує тривалість обдування, декілька менший – контактне напруження та порівняно невелике – напір повітря. Таким чином, експериментальне дослідження адгезії тіста показало, що, по-перше, немає конструкційних матеріалів, до яких тісто не прилипає; по-друге, використання обдування тестових заготовок з ціллю різкого зниження прилипання тіста доцільне та економічно виправдане.

При виробництві деяких виробів у якості напівфабрикату використовують стаканчики, випечені з борошняного тіста, які мають форму тіл обертання (циліндр, конус, зрізаний конус). Одним з найбільш прогресивних способів виготовлення таких заготовок є їх випічка на матрицях певної форми. При цьому готові стаканчики необхідно зняти з матриці. Величини зусиль та моментів, які необхідні для переміщення випеченої заготовки відносно матриці, залежать від адгезійних сил на поверхні розділу метал – заготовка, від температури випічки, матеріалу та чистоти обробки матриці [30].

У ряді випадків буває доцільно вивчати властивості адгезії не при відриві пластини від зразку мучного тіста, а при зсуві. Для визначення зусиль зняття випеченої заготовки з матриці використовували адгезіометр, який базується на методі зсуву харчового виробу відносно поверхні конічної матриці. При проведенні експериментів використовували чавунний (СЧ 15032), сталевий (Ст.5), алюмінієвий (Д 16) та чавунний з лаковим покриттям (К-58) конуси, а також з різними мастилами їх поверхні (таблиця 6.78).

Залежність адгезійного тиску від вологості тіста близька до лінійної:

$$\sigma_{ад} = p_0 + A(W - 32), \quad (6.40)$$

Таблиця 6.78 – Вплив матеріалу конусу та умов мастила на адгезійні зусилля та момент

Матеріал конусу	Мастило	Зусилля, Н	Момент Н·м
Чавун	Нормальне	8,5	7,0
Чавун, покритий лаком К-58	Без мастила	4,0	8,0
Чавун	Підвищений вміст масла	8,0	1,2
Сталь	Підвищений вміст масла	10,0	2,0

де $\sigma_{ад}$ - адгезійний тиск, Па; W - вологість тіста, %;

p_0, A – емпіричні коефіцієнти, які залежать від стану поверхні та властивостей тіста (таблиця 6.78).

В експериментах було встановлене, що зі збільшенням вологості тіста характер відриву

змінюється з адгезійного на когезійний.

Адгезійний тиск більш залежить від чистоти обробки поверхні: при обробці поверхні по 6-му класу адгезійний тиск у 4 рази вище у порівнянні з обробкою по 10-му класу.

Таблиця 6.78 – Значення коефіцієнтів рівняння (6.40)

Матеріал підкладки	Клас чистоти обробки	Мастило поверхні підкладки	Тривалість витримки тіста, год	Коефіцієнти	
				p_0 , Па	A , Па/%
Сталь Ст.5	10	Без мастила	0	866	1,81
	10	Без мастила	24	1388	2,92
	6	Без мастила	0	3932	2,00
	6	Нормальне	0	3476	0,72
	6	Інтенсивне	0	2529	0,55
Чавун СЧ15-32	10	Без мастила	0	789	1,71
	10	Без мастила	24	1292	2,76
	6	Без мастила	0	3860	1,72
	6	Нормальне	0	3303	0,42
	6	Інтенсивне	0	2604	0,24
Алюмінієвий сплав Д16	10	Без мастила	0	681	1,33
	10	Без мастила	24	1003	2,48
	6	Без мастила	0	3629	1,43
	6	Нормальне	0	3031	0,34
	6	Інтенсивне	0	2372	0,38

6.3.2 Фрикційні характеристики сипучих продуктів та борошняних виробів

У таблиці 6.81 наведені фрикційні властивості пшеничного борошна [14].

Таблиця 6.81 – Залежність фрикційних характеристик пшеничного борошна різних сортів від вологості

Мука	Вологість, кг/кг	Кут, град			Сила зчеплення продукту, Па			Кут зсуву, град			
		Внутрішнього тертя	Зовнішнього тертя		Природного укосу	По продукту	По сталі ($R_z=1,25$)	По бетону	Продукту вздовж продукту	Продукту вздовж сталі ($R_z=1,25$)	Продукту вздовж бетону
			По сталі ($R_z=1,25$)	По бетону							
Вищого сорту	0,13	28	12	22	45	4000	1300	3000	30	12	25
	0,14	29	13	23	46	5000	1500	4000	31	14	26
	0,16	32	15	26	47	10000	2000	9000	35	17	29
I сорту	0,13	27	11	21	43	3500	1000	2600	28	11	22
	0,14	28	12	22	44	4600	1300	3600	30	12	24
	0,16	30	13	25	45	8000	1600	7000	33	15	27
II сорту	0,13	29	13	26	52	6000	1500	6000	32	14	27
	0,14	31	14	27	53	8400	2000	7400	34	15	29
	0,16	34	17	29	57	11000	3500	10500	37	19	30

У таблиці 6.82 наведені кути ковзання пшеничного борошна I сорту ($W=0,128$ кг/кг) вздовж різних матеріалів. Були визначені кути тертя пшеничного та житнього борошна (таблиця 6.83).

Таблиця 6.82 – Кути ковзання (град) муки

Матеріал	У спокої	У русі
Сталь	44	42
Бетон	59	54
Дерево	52	48
Гума	46	45

Таблиця 6.83 – Кут тертя (град) для муки вологістю 0,12 – 0,14 кг/кг

Вид зсуву	Пшенична			Житня
	Вищий сорт	I сорт	II сорт	
Мука вздовж муки	29	28	27-35	27-35
Мука вздовж оргскла	10	10	10	10

Тензометричним методом були визначенні коефіцієнти тертя житнього формового хлібу по різних поверхнях: сталь 2,25-0,26; алюміній 0,33-0,37; форнір 0,35-0,36; бавовняна транспортерна тканина 0,37-0,31. Перша цифра коефіцієнту тертя указана для швидкості 0,1 м/с, друга – для 0,4 м/с.

На установці дискового типу було вивчене тертя житнього хлібу [30]. Дані, наведені на рисунку 6.36, отримані при швидкості ковзання диску 0,89 м/с, а на рисунку 6.37 – при контактному тиску 1,1 кПа. Досліди показали, що між питомим зусиллям тертя та контактним тиском є лінійна залежність, зі збільшенням тривалості витримки хлібу зусилля тертя знижується.

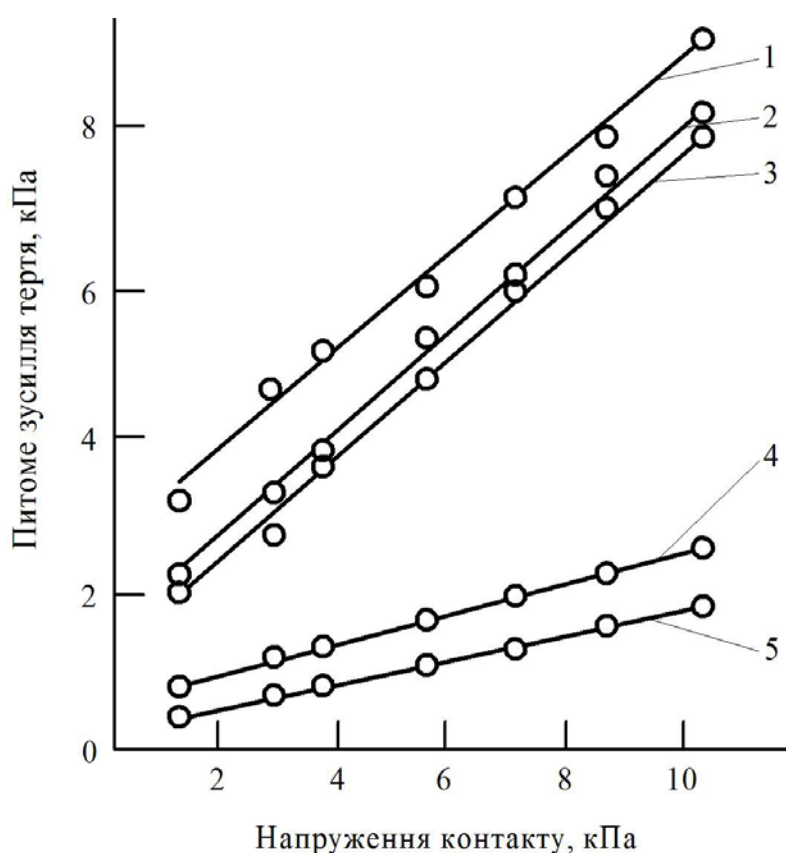


Рисунок 6.36 – Залежність питомого зусилля тертя м'якішу житнього хліба від напруження контакту при тривалості витримки (год):

- 1 – 4; 2 – 24; 3 – 45 (по сухої сталевій поверхні);
- 4 – 4 (мастило з рослинного масла);
- 5 – 4 (зі змочуванням водою)

Була вивчена залежність коефіцієнту тертя м'якішу та корки сухарних плит вищого та І сортів від нормального тиску, швидкості ковзання та тривалості витримки. Швидкість ковзання зразку змінювали у границях від 0,3 до 13,8 м/с.

Результати дослідів показали, що зі збільшенням тиску коефіцієнт тертя м'якішу сухарних плит до тиску 8 кПа різко зростає, а потім збільшується незначно або практично залишається сталим (при тривалості витримки 4 та 8 год), як наведено на рисунку 6.38. Збільшення тривалості витримки плит веде до зростання коефіцієнтів тертя.

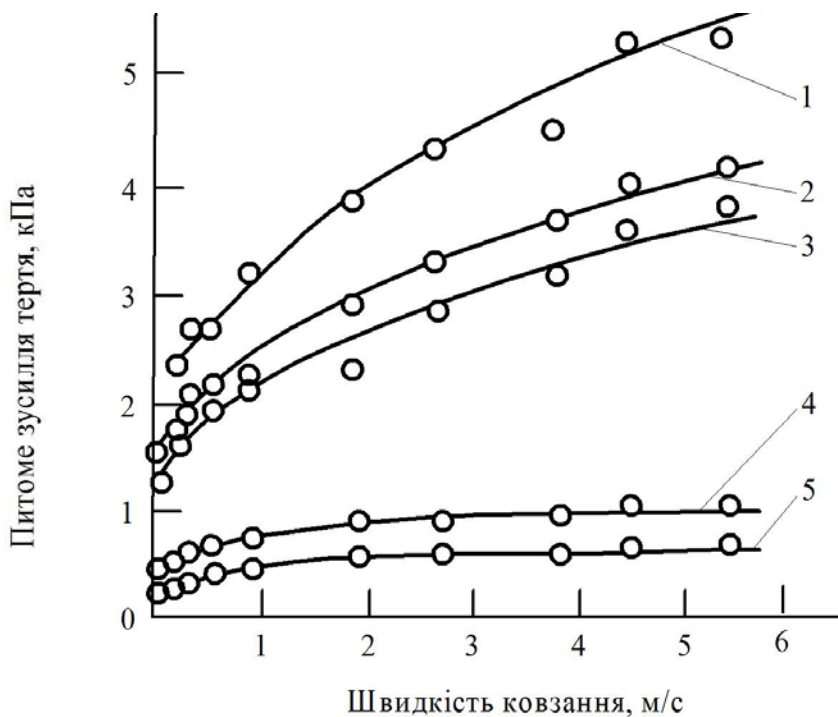


Рисунок 6.37 – Залежність питомого зусилля тертя м'якішу житнього хліба від швидкості ковзання при тривалості витримки (год):
 1 – 4; 2 – 24; 3 – 45 (по сухої сталевій поверхні);
 4 – 4 (мастило з рослинного масла);
 5 – 4 (зі змочуванням водою)

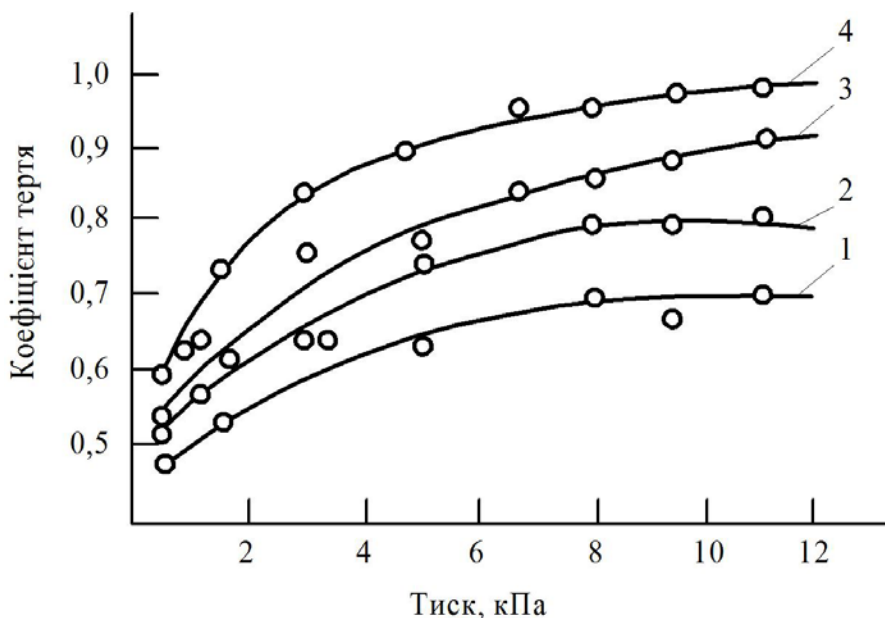


Рисунок 6.38 – Залежність коефіцієнту тертя м'якішу сушарних плит від тиску при тривалості витримки (год):
 1 – 4; 2 – 8; 3 – 24;
 4 – 48

Залежність коефіцієнту тертя м'якішу від швидкості ковзання має складний вигляд (рисунок 6.39). Підвищення швидкості від 0,3 до 2-3 м/с веде до різкого падіння коефіцієнту тертя – від 0,6 до 0,4. При подальшому зростанні швидкості коефіцієнт тертя збільшується.

Були визначені коефіцієнти тертя о сталь: макаронного тіста – 0,29-0,30, бубликового – 0,5-0,6 [34].

Коефіцієнти тертя хлібу різної вологості з пшеничного борошна II сорту визначали методом одноплосинного зсуву. Як показали результати (таблиця 6.84), значення коефіцієнту тертя суттєво залежить від матеріалу поверхні ковзання та вологості продукту.



Рисунок 6.39 – Залежність коефіцієнту тертя м'якшущих сухарних плит від швидкості ковзання при тривалості витримки (год):

1 – 4; 2 – 8; 3 – 24; 4 – 48

Коефіцієнти тертя хлібу різної вологості з пшеничного борошна II сорту визначали методом одноплощинного зсуву. Як показали результати (таблиця 6.84), значення коефіцієнту тертя суттєво залежить від матеріалу поверхні ковзання та вологості продукту.

Таблиця 6.84 – Значення коефіцієнту тертя пшеничного хлібу по різних матеріалах у залежності від вологості

Матеріал, по якому визначається коефіцієнт зовнішнього тертя	Вологість продукту в процесі сушки, кг/кг			
	0,350	0,227	0,1668	0,118
Сталь неіржавна (харчова)	0,700	0,255	0,200	0,180
Дюралюміній (харчовий)	0,420	0,175	0,137	0,146
Дюралюміній (харчовий) з діаметром отворів 1 мм, живий переріз сита 0,1009	0,670	0,349	0,285	0,250
Дюралюміній (харчовий) з діаметром отворів 3 мм, живий переріз сита 0,3264	0,718	0,268	0,220	0,200
Дюралюміній (харчовий) з діаметром отворів 7 мм, живий переріз сита 0,55	0,718	0,326	0,238	0,248

Коефіцієнти тертя сухарів по різних матеріалах були вивчені методом площини нахилу. Кут нахилу приймали за кут тертя сухарів по матеріалу, який випробується. Тангенс кута, при якому починалося ковзання продукту, вважали дорівнюючим коефіцієнту зовнішнього тертя. Коефіцієнт внутрішнього тертя був визначений при русі сухаря по нерухомому такому же сухарю (таблиця 6.85).

На коефіцієнт тертя великий вплив оказує вологість сухарів: при підвищенні вологості від початкової 14% до 20-25% коефіцієнт зовнішнього тертя різко знижується, що пояснюється зменшенням при-

липання продукту до поверхні тертя внаслідок наявності вологи. При подальшому збільшенні вологості спостерігається зріст коефіцієнтів тертя. Коефіцієнт внутрішнього тертя сухарів при змінненні вологості від 14 до 37% безперервно зростає, але з різною інтенсивністю.

Таблиця 6.85 – Коефіцієнти тертя сухарів

Сухарі з пшеничного борошна II сорту	Внутрішнє тертя	Зовнішнє тертя (у стані спокою)							
		О неіржавну сталь	О харчовий дюралюміній з отворами діаметром, мм						
			0	1	2	3	5	7	10
	0,710	0,360	0,320	0,470	0,440	0,540	0,560	0,620	1,540
Кофейні	1,290	0,420	0,390	1,430	0,470	0,920	0,520	0,990	0,530
Гірчичні	1,380	0,470	0,340	0,580	0,460	0,490	0,880	1,110	0,620
Шкільні	2,150	0,420	0,290	0,830	0,470	0,540	0,460	0,900	0,640
З маком	1,380	0,290	0,290	0,980	0,400	0,550	0,500	1,260	0,640
Лимонні	1,190	0,490	0,320	0,360	0,710	0,740	0,920	0,760	1,500

Питання для самоконтролю

1. Які фактори впливають на адгезійний тиск тіста?
2. Як впливають тривалість бродіння, температура цукор та жир на властивості адгезії тіста?
3. Яким чином досягають зменшення адгезійних сил?
4. Як залежить адгезія тестових заготовок від тривалості та інтенсивності їх обдування повітрям, величини напруження контакту?
5. При яких умовах характер відриву тіста змінюється з адгезійного на когезійний?
6. Як змінюються фрикційні характеристики пшеничного борошна від вологості?
7. Яка залежність між питомим зусиллям тертя та контактним тиском і тривалістю витримки хлібу?
8. Який вплив на коефіцієнт тертя оказують тиск, тривалість витримки, швидкість ковзання, вологість, матеріал поверхні ковзання?

Розділ 7

СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДИТЕРСЬКИХ ПРОДУКТІВ

7.1 Характеристики зсуву кондитерських продуктів

Структурно – механічні характеристики кондитерських продуктів залежать від багатьох факторів і в першу чергу від швидкості зсуву, тиску, температури та вологості. У більшості випадків ці залежності є нелінійними. Особливий інтерес представляє визначення впливу температури на величини характеристик, оскільки у виробничих умовах при стандартній рецептурі продукту регулювання технологічних процесів може здійснюватися зміненням температурного режиму. Отримані дані дозволяють відповісти на питання необхідності термостатування та можливих границях терморегулювання процесу.

Всі головні операції харчового виробництва (пресування, формування, транспортування та інші) здійснюються при всебічному стиску продукту. В інженерних розрахунках технологічного обладнання значення реологічних характеристик повинні бути отримані з урахуванням тиску.

Віскозиметрія праліне на приборах РВ-8 та РМ-1 дозволили віднести їх до в'язко – пластичного тіла Бінгама, ламінарна пластично – в'язка течія якого характеризується пластичною в'язкістю та граничним напруженням зсуву [30]. Відзначено переважний вплив на граничне напруження зсуву θ_0 та пластичну в'язкість η температури і жирності та незначний вплив змінення (в границях рецептури) вологості, що наведено у таблиці 7.1. Величина в'язкості знижається зі збільшенням швидкості зсуву, досягаючи найменшого значення при швидкостях 7 c^{-1} , що наближається до граничного ступеню руйнування структури.

Таблиця 7.1 – Залежність констант рівняння Бінгама $\theta = \theta_0 + \eta dy/dt$ від жирності та температури праліне

Жирність кг жиру на 1 кг продукту	θ_0 (Па) (у чисельнику) та η (Па·с) (у знаменнику) при температурі, °С							
	26	28	30	32	34	37	40	45
«Чародійка»								
0,306	$\frac{2080}{140}$	$\frac{1590}{61}$	$\frac{1130}{50}$	$\frac{830}{35}$	$\frac{610}{31}$	$\frac{530}{24}$	$\frac{500}{22}$	$\frac{500}{18}$
0,346	$\frac{850}{90}$	$\frac{730}{36}$	$\frac{590}{9,3}$	$\frac{330}{6,2}$	-	$\frac{260}{5,9}$	$\frac{240}{5,6}$	$\frac{220}{5,5}$
Батончики «Рот Фронт»								
0,302	$\frac{3000}{188,5}$	$\frac{2270}{120,5}$	$\frac{1630}{53,6}$	$\frac{1250}{24,1}$	$\frac{840}{13,3}$	$\frac{630}{12,9}$	$\frac{450}{12,0}$	$\frac{370}{10,1}$
0,318	-	$\frac{2040}{104,3}$	$\frac{1550}{45,8}$	$\frac{1040}{23,6}$	$\frac{710}{12,5}$	$\frac{520}{10,7}$	$\frac{400}{9,3}$	$\frac{390}{8,5}$
«Маска»								
0,333	-	$\frac{2840}{60}$	-	$\frac{1500}{25}$	$\frac{400}{15}$	$\frac{170}{13}$	$\frac{120}{10}$	-
«Кара-Кум»								
0,312	$\frac{1380}{130}$	$\frac{1050}{80}$	$\frac{830}{50}$	$\frac{550}{32}$	$\frac{280}{27}$	$\frac{100}{26}$	-	$\frac{95}{21}$

У таблиці 7.2 наведена залежність ефективної в'язкості праліне від швидкості зсуву.

Таблиця 7.2 – Залежність $\eta_{E\Phi} \cdot 10^{-3}$ (Па·с) праліне від швидкості зсуву

Вид праліне	Температура, °С	Жирність, кг/кг	Швидкість зсуву, с ⁻¹					
			1,2	2	3	5	7	11
«Чудесниця»	36	0,220	2,0	1,25	0,86	0,65	0,58	0,54
«Батончики Рот Фронт»	35	0,272	1,46	0,98	0,74	0,58	0,54	0,52
«Кара-Кум»	34	0,285	1,08	0,92	0,64	0,48	0,44	0,43
«Колос»	32	0,288	0,7	0,5	0,37	0,27	0,24	0,23

Цукерні маси, які містять горіхи, являють собою типові гетерогенні системи. Твердою фазою є частки розтертих ядер горіху та мікрочастинки цукру, рідинною фазою є масло ядер горіху з доданком твердого жиру (при температурі вище температури плавлення дисперсійного середовища). На рисунку 7.1 наведені залежності ефективної в'язкості цукерних мас від швидкості зсуву.

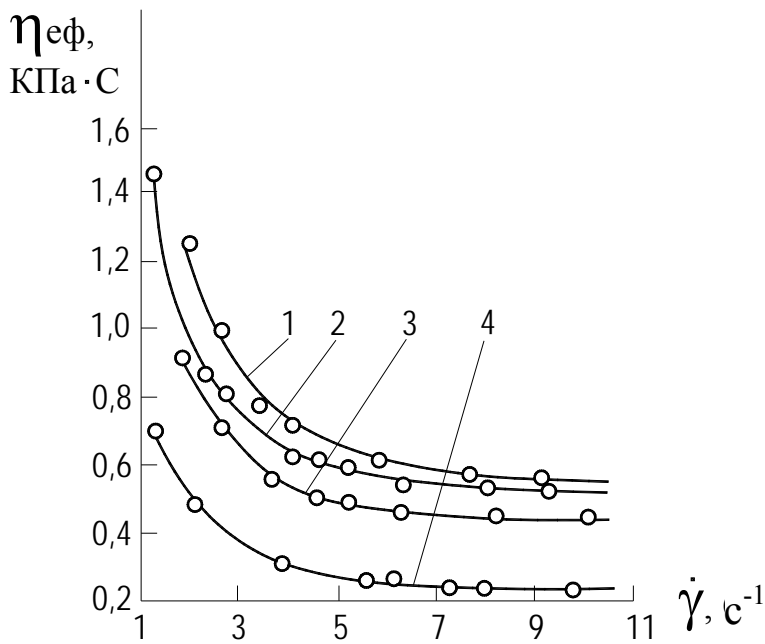


Рисунок 7.1 – Залежність ефективного в'язкого коефіцієнта від швидкості зсуву для мас праліне цукерок: 1 – «Чудесниця» (температура $T=36^{\circ}\text{C}$, жирність $J=22\%$, вологість $W=2,5\%$); 2 – «Батончики» (температура $T=35^{\circ}\text{C}$, $J=27,2\%$, $W=1,6\%$); 3 – «Кара-Кум» ($T=34^{\circ}\text{C}$, $J=28,5\%$, $W=2,8\%$); 4 – «Колос» ($T=32^{\circ}\text{C}$, $J=28,8\%$, $W=1,8\%$)

Наведені графіки мають вигляд характерний для в'язко – пластичних твердообразних систем. Зі зростанням швидкості зсуву в'язкість падає. Наприклад, для цукерок «Батончики» від $\eta_{E\Phi}=1460$ Па·с при $\dot{\gamma}=1,2$ с⁻¹ до $\eta_{E\Phi}=532$ Па·с при $\dot{\gamma}=9,2$ с⁻¹, тобто у 3 рази. Подобна картина спостерігається і для інших цукерних мас.

Дослідні дані показали, що при підвищенні швидкості зсуву більш різке зниження в'язкості відбувається при змінненні малих швидкостей. Наприклад, для маси цукерок «Чудесниця» в'язкість змінюється від 1250 до 860 Па·с при збільшенні швидкості зсуву від 7 до 8 с⁻¹, тобто, якщо у першому випадку в'язкість зменшилася на 31%, то у другому – лише на 3,4% при змінненні швидкості зсуву в обох випадках на 1 с⁻¹.

З графіків (рисунок 7.2) видно, що ефективна в'язкість падає зі збільшенням швидкості зсуву, досягаючи найменшого значення при швидкості 6-7 с⁻¹, що відповідає найбільшому руйнуванню структури. При напруженнях нижче граничного, яке характеризує міцність просторової структури, спостерігається повільна течія типу повзучості. При такій повільній течії структура руйнується, але встигає знову відновлюватися. Ця течія обумовлена практично постійною найбільшою в'язкістю в області малих напружень зсуву.

Криві залежності $\eta_{E\Phi}(\dot{\gamma})$ мають практичне значення, оскільки вони визначають оптимальні параметри технологічних процесів об-

робки та формування цукерних мас, встановлюючи зв'язок між характером течії, ступеню руйнування структури та напруженням зсуву.

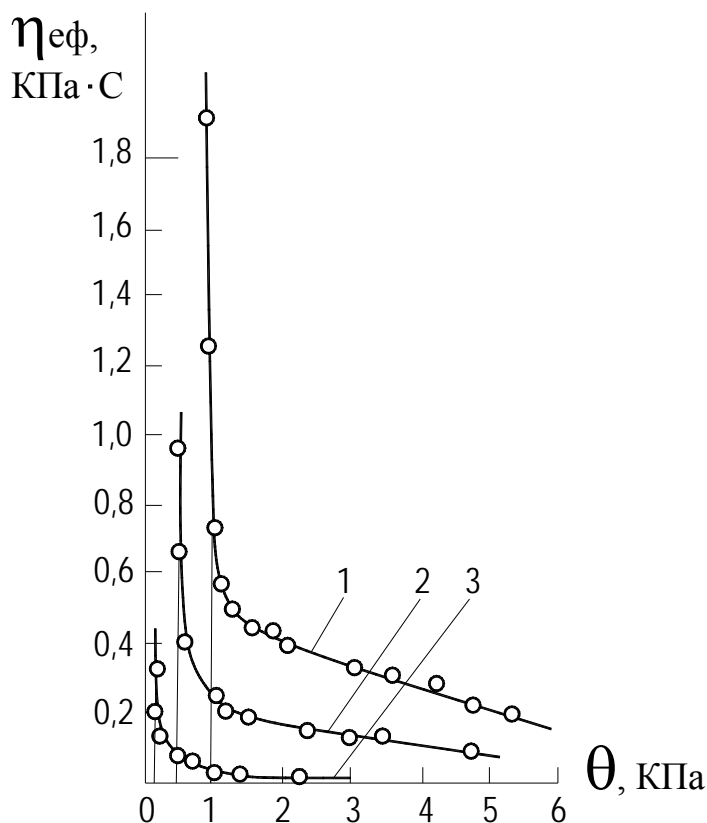


Рисунок 7.2 – Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву маси для цукерок «Кара-Кум» ($Ж=31,2\%$, $W=1,8\%$); при температурі ($^{\circ}C$):

1–28; 2–32; 3–37

Розгляд цих кривих приведе до висновку, що процес пластичного формування буде найбільш ефективним в областях напружень зсуву, які дають найбільше руйнування структури.

Температура оказує суттєвий вплив на граничне напруження зсуву. Наприклад, при температурі $28^{\circ}C$ граничне напруження зсуву $\theta_0=760$ Па, при температурі $32^{\circ}C$ $\theta_0=400$ Па, при температурі $37^{\circ}C$ $\theta_0=120$ Па, тобто при підвищенні температури на $9^{\circ}C$ θ_0 зменшилося у 6,3 разів. Темп змінення θ_0 зі збільшенням температури не однаковий. Найбільш різке змінення від-

бувається при температурах $25-30^{\circ}C$. При більш високих температурах швидкість зменшення θ_0 помітно знижується; при температурах вище $45^{\circ}C$ θ_0 залишається практично постійним. Зі збільшенням жирності маси θ_0 зменшується. Але змінення температури впливає у значно більшій мірі, ніж змінення вмісту жиру. Змінення вологості маси в межах рецептури незначно впливає на граничне напруження зсуву.

При реологічних дослідженнях особливо важливо отримати достовірні криві течії, які відображають властивості матеріалу при зсуві. На рисунку 7.3 наведені деякі з отриманих графіків.

Результати опитів показали, що з ціллю переборювання сил

опору в'язкості маси для цукерок «Маска» та отримання однієї і тієї же швидкості зсуву треба прикласти момент, приблизно в 1,5-2 рази більший, ніж для маси цукерок «Чудесниця».

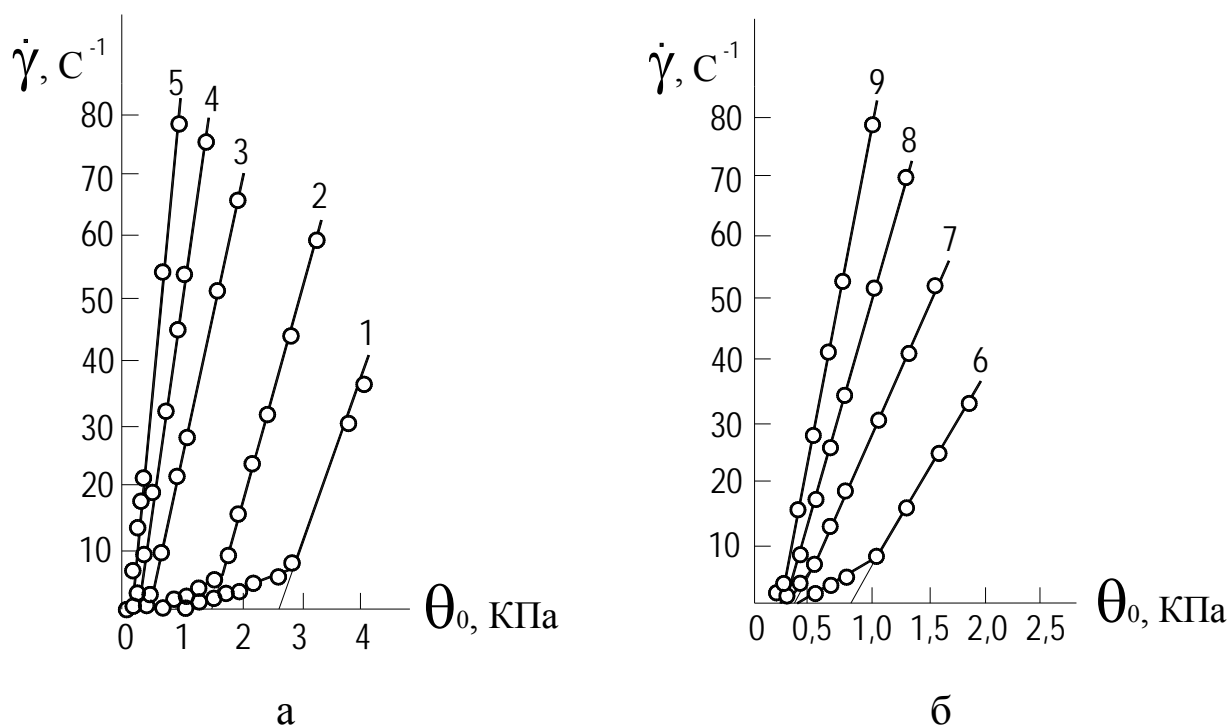


Рисунок 7.3 – Криві течії маси для цукерок «Маска» ($J=33,3\%$, $W=2,8\%$) (а) та «Чародійка» ($J=30,5\%$, $W=2,1\%$) (б) при температурі ($^{\circ}\text{C}$):

1–28; 2–32; 3–34; 4–37; 5–40; 6–26; 7–33; 8–37; 9–45

Пластична в'язкість різко змінюється при відносно невисоких температурах, а при температурі порядку 40°C її значення практично стабілізуються. Залежність в'язкості від температури однакова як для мас, виготовлених на основі какао-масла, так і для мас на кондитерському жирі. Різниця полягає в тому, що температура, при якій починається стабілізація $\eta_{ПЛ}$, у другому випадку вище, оскільки у кондитерського жиру температура плавлення вище. В інтервалі відхилень жирності, які допускаються температурою, значення $\eta_{ПЛ}$ змінюються незначно при наступних температурах: для мас на основі какао-масла при $29-32^{\circ}\text{C}$, на основі кондитерського жиру при $32-37^{\circ}\text{C}$.

Аналогічна закономірність спостерігається і для граничного напруження зсуву. Це вказує на різке збільшення опорів зсуву, які виникають при механічній дії на маси праліне при вказаних значеннях

температури. Внаслідок цього незначні коливання температури приводять до нестабільності реологічних параметрів. З цього слідує висновок про те, що переробку мас праліне мас (формування, транспортування та інші) не слід вести при температурі нижче 29-32⁰С.

Дослідження впливу вібрації на масу цукерок «Маска» довели, що при температурі 28⁰С при збільшенні частоти коливань від 1 до 10 Гц та амплітуді деформації 0,07 ефективна в'язкість зменшується від 9,2 до 0,9 кПа·с, тобто у 10 разів, а при подальшому збільшенню частоти від 10 до 25 Гц в'язкість зменшується до 0,42 кПа·с, тобто приблизно у 2 рази. Ця особливість характерна для цукерних мас [30].

Амплітуда та частота практично у рівному ступеню впливають на процес. Тому ефективність діяння вібрації визначали максимальною амплітудою швидкості періодичної деформації ($\dot{\gamma}_{\max}$), яка пов'язана з параметрами коливань співвідношенням:

$$\dot{\gamma}_{\max} = 2\pi f \gamma_0, \quad (7.1)$$

де f - частота коливань, Гц; γ_0 - амплітуда деформації.

Залежність ефективної в'язкості від максимальної амплітуди швидкості періодичної деформації може бути наведена у формі степеневого рівняння:

$$\eta_{E\Phi} = a \dot{\gamma}_{\max}^b, \quad (7.2)$$

Таблиця 7.3 – Залежність коефіцієнтів рівняння (7.2) для цукерних мас від температури

Цукерна маса	Температура, ⁰ С	a	b
«Кара-Кум»	28	27200	-1,159
	34	1195	-0,901
Батончики	28	22350	-1,028
	34	5240	-0,914
Цукрова помада	40	3256	-0,638
Молочна помада	50	1305	-0,725

де a , b - емпіричні коефіцієнти (таблиця 7.3.)

Дослідження дозволили встановити, що вплив вібрації оборотний, час тиксотропного відновлення незначний.

Графічно ефект впливу вібрацій проявляється у зміщенні кривих течії в область менших напружень (рисунок 7.4).

Були проведені дослідження реологічних властивостей деяких кондитерських мас (праліне, шоколадна, вершкова помадка) у діапазоні змінення тиску від 0 до 0,5 МПа.

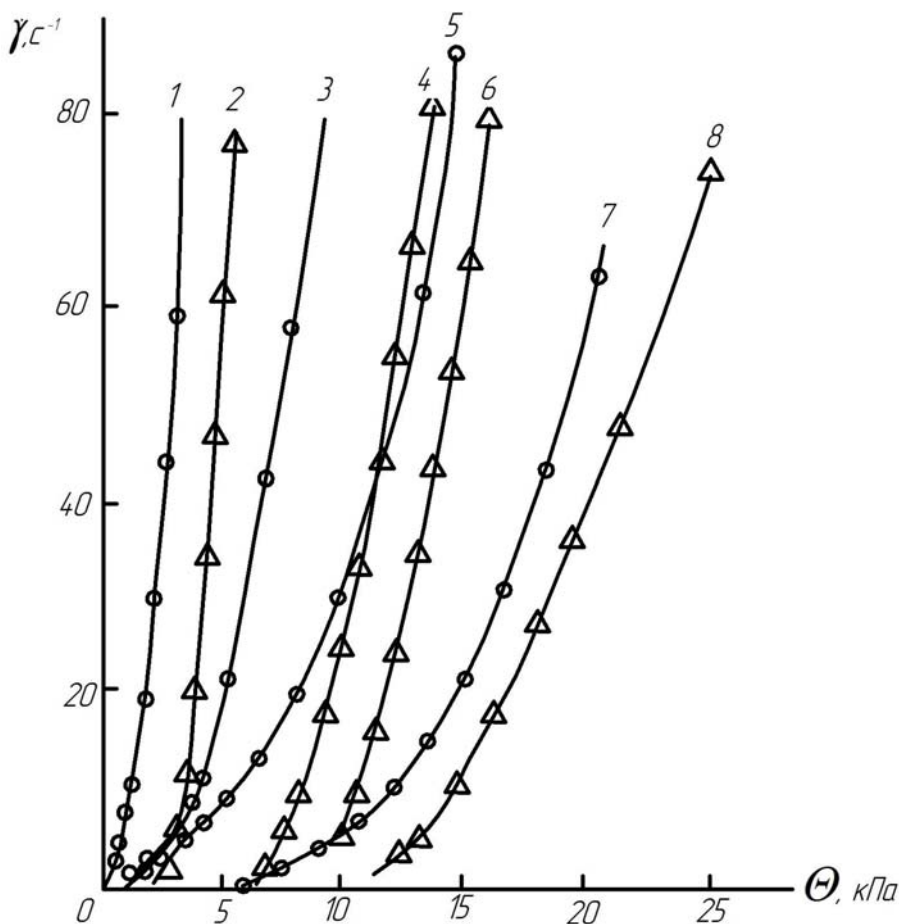


Рисунок 7.4 – Криві течії маси для цукерок «Каракум» при вібрації ($f=25$ Гц, $\gamma_0=0,13$) (криві 1, 3, 5, 7), без вібрації (криві 2, 4, 6, 8) та при різній температурі ($^{\circ}\text{C}$):

1, 2 – 34;
 3, 4 – 30;
 5, 6 – 28;
 7, 8 – 26

Вибір такого діапазону визначається тим, що у формуючих машинах кондитерського виробництва тиск зазвичай не перевищує 0,5 МПа, окрім того, найбільший вплив на абсолютні значення в'язкості мас оказує тиск до 0,1 МПа. Процес пластичної деформації мас праліне, який виникає у результаті силової взаємодії між робочим органом машини та масою, що обробляється, залежить від її пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву. З підвищенням тиску η і θ_0 зростають, це спостерігається при змінненні тиску від 0 до $0,49 \cdot 10^5$ Па; η збільшується у 1,5-2,5 рази, а θ_0 - у 2-3 рази. Залежність цих величин від тиску наведена у таблиці 7.4. При підвищенні тиску відбувається ущільнення маси; графік пресування кондитерських мас нелінійний, найбільший вплив на щільність оказує тиск у границях від 0 до 0,1 МПа.

Результати дослідів з масами праліне для цукерок «Колос» (жирність 28,8%, вологість 1,8%), «Кара-Кум» (жирність 28,5%, вологість 2,8%), «Батончики» (жирність 27,2%, вологість 1,6%) показали, що тиск оказує великий вплив на в'язкість, різке зростання в'язкості спостерігається при змінненні тиску від 0 до 0,05 Мпа (рисунок 7.5).

Наприклад, для маси «Кара-Кум» в'язкість при цьому збільшується на 102%, подальше підвищення тиску на таку же величину приведе до змінення в'язкості тільки на 12-20%.

Таблиця 7.4 – Залежність η і θ_0 праліне від тиску

Вид праліне	Температура, °С	θ_0 (Па) (у чисельнику) та η (Па·с) (у знаменнику) при тиску $p \cdot 10^{-5}$, Па				
«Батончики»	28	$\frac{3300}{420}$	$\frac{6200}{647}$	$\frac{9100}{800}$	$\frac{11800}{825}$	-
	31	$\frac{1800}{200}$	$\frac{5200}{475}$	$\frac{7300}{562}$	$\frac{8250}{575}$	-
«Кара-Кум»	34	$\frac{1080}{284}$	$\frac{1760}{452}$	$\frac{2720}{460}$	$\frac{3300}{500}$	$\frac{3520}{546}$
«Колос»	25	$\frac{1100}{290}$	$\frac{2100}{560}$	$\frac{2500}{1110}$	$\frac{4600}{1110}$	$\frac{5900}{1110}$
	32	$\frac{340}{196}$	$\frac{1480}{246}$	$\frac{2160}{264}$	$\frac{2200}{276}$	$\frac{2740}{316}$
«Чудесниця»	27	$\frac{1300}{159}$	-	$\frac{3600}{558}$	$\frac{4450}{596}$	-
	30	$\frac{1200}{114}$	-	$\frac{2350}{142}$	$\frac{2400}{300}$	-

Дослідження впливу вібрації на реологічну поведінку мас праліне та помадних мас показало, що в області малих швидкостей зсуву їх поведінка різниться. Для маси батончиків при малій швидкості зсуву спостерігається лінійна залежність між швидкістю та напруженням зсуву (рисунок 7.6). Тобто, маса тече подібно ньютонівської рідині (в'язкість дорівнює 700 Па·с). При температурі 30⁰С маса являється твердообразною системою, яка має границю структурної міцності.

При діянні вібрації величина цієї границі практично дорівнює нулю, і течія маси починається навіть при незначному напруженні. Ньютонівська поведінка маси відмічається при швидкості зсуву до 3 с⁻¹. При подальшому збільшенні швидкості спостерігається аномалія в'язкості, що обумовлене руйнуванням структури маси.

Для помадної маси (молочна помадка) при температурі 40⁰С та зміненні швидкості зсуву від 0,5 до 3 с⁻¹ ефективна в'язкість збільшується від 720 до 960 Па·с, а потім починає зменшуватися. Тобто, при малій швидкості зсуву помадні маси проявляють ділатантні властивості, оскільки в'язкість зростає зі збільшенням швидкості зсуву.

Це пояснюється тим, що при вібрації різко збільшується рухомість часток твердої фази у дисперсійному середовищі.

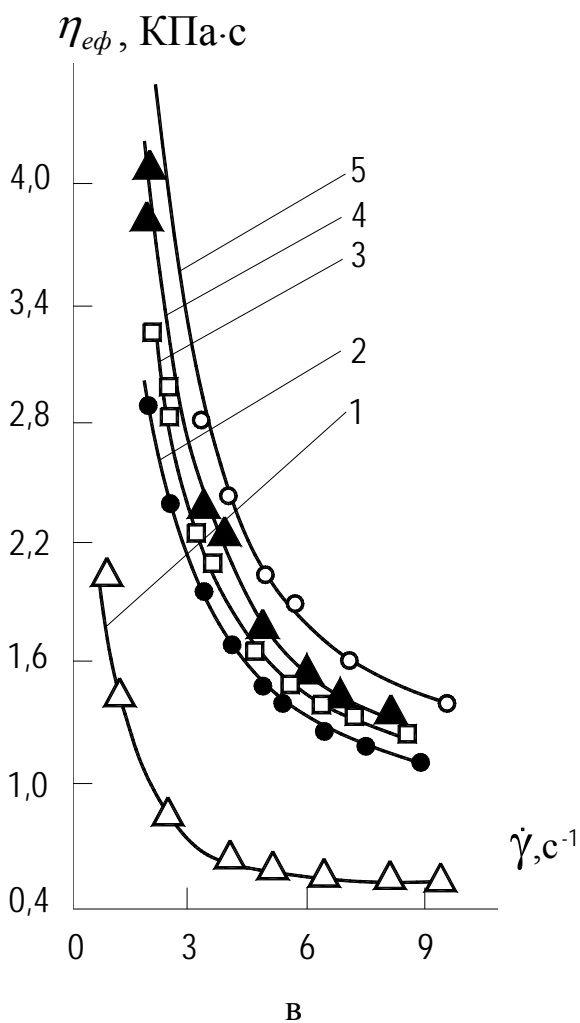
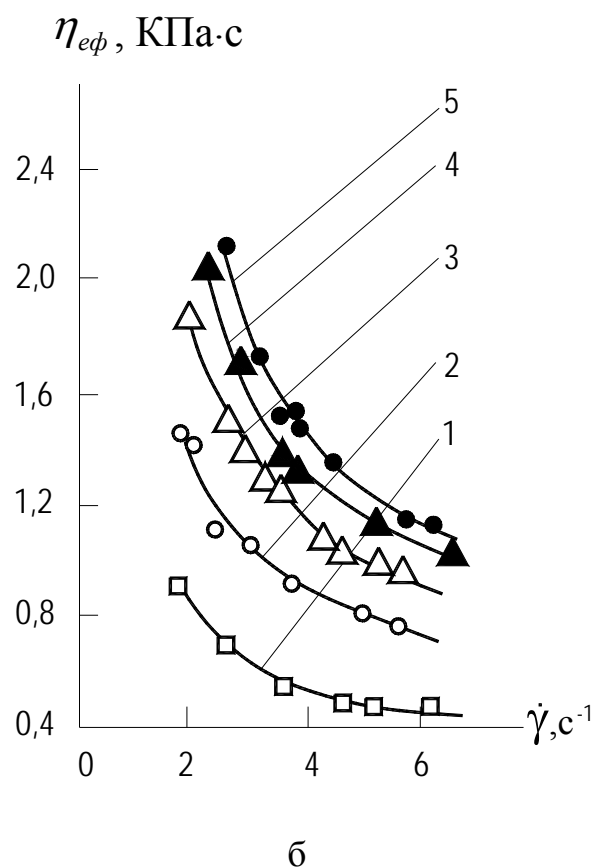
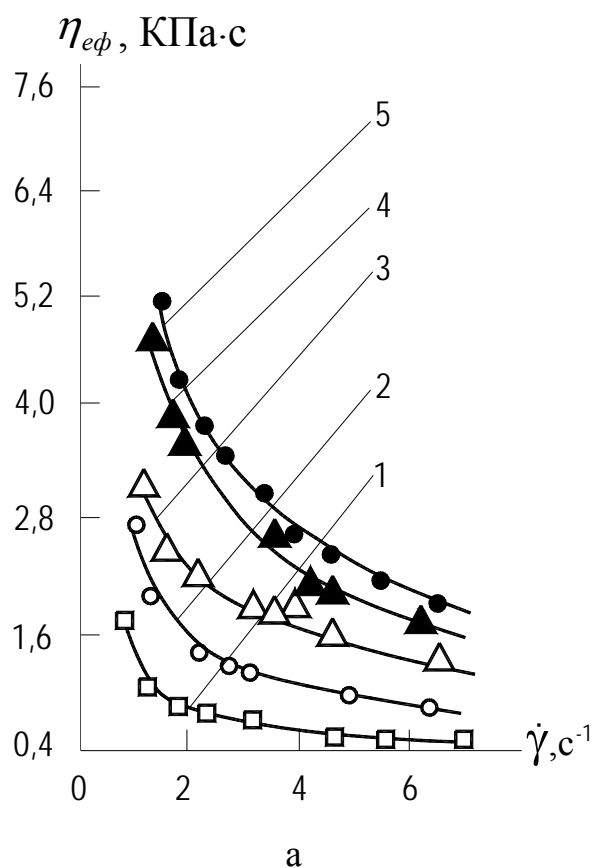


Рисунок 7.5– Залежність ефекти-
вної в'язкості від швидкості зсуву
мас для цукерок «Колос» при
25⁰С (а),
«Кара-Кум» при 34⁰С (б)
та «Батончики» при 35⁰С (в)
при тиску (МПа):

1 – 0; 2 – 0,05;
3 – 0,1; 4 – 0,15;
5 – 0,2

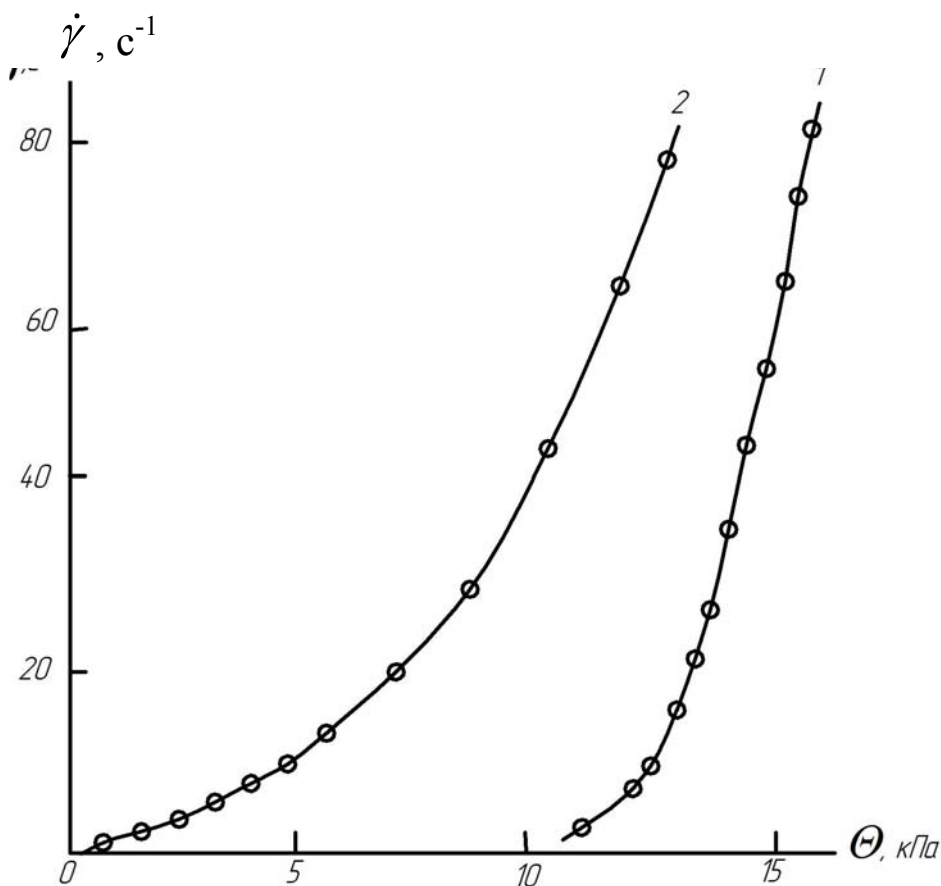


Рисунок 7.6 –
Криві течії маси
батончиків при
температурі
30⁰С та різних
режимах:

1 – без вібрації;
2 - з вібрацією
($f=25,5$ Гц,
 $\gamma_0=0,13$)

Тому опір зсуву у порівнянні зі стаціонарною течією значно зменшується завдяки скороченню кількості контактів між окремими частками. При збільшенні швидкості зсуву кількість контактів збільшується, опір зсуву та в'язкість також збільшуються. Потім наростання кількості контактів уповільнюється та починається процес руйнування зв'язків між окремими частками. Цьому моменту відповідає максимальне значення ефективної в'язкості. Природно, що швидкість зсуву, при якій в'язкість приймає максимальне значення, залежить від параметрів коливань, тобто від ступені рухомості часток.

Так, при частоті 10,6 Гц швидкість зсуву дорівнює 0,7 с⁻¹, а при частоті 25,5 Гц - 2,6 с⁻¹, ефективна в'язкість у ці моменти відповідно дорівнює 1690 та 970 Па·с. Дослідження на вібрацію довели, що для цукерних мас, які містять какао-масло, наприклад «Кара - Кум», «Чародійка», характерні ділатантні властивості та відсутність граничного напруження зсуву. Помадні маси при температурі 60⁰С та вище поведуть себе як ньютонівські рідини (рисунки 7.7, 7.8).

Експериментальні дослідження довели, що більш значне зменшення в'язкості цукерних мас при дії вібрації спостерігається у діапазоні швидкостей зсуву від 0 до 20 с⁻¹.

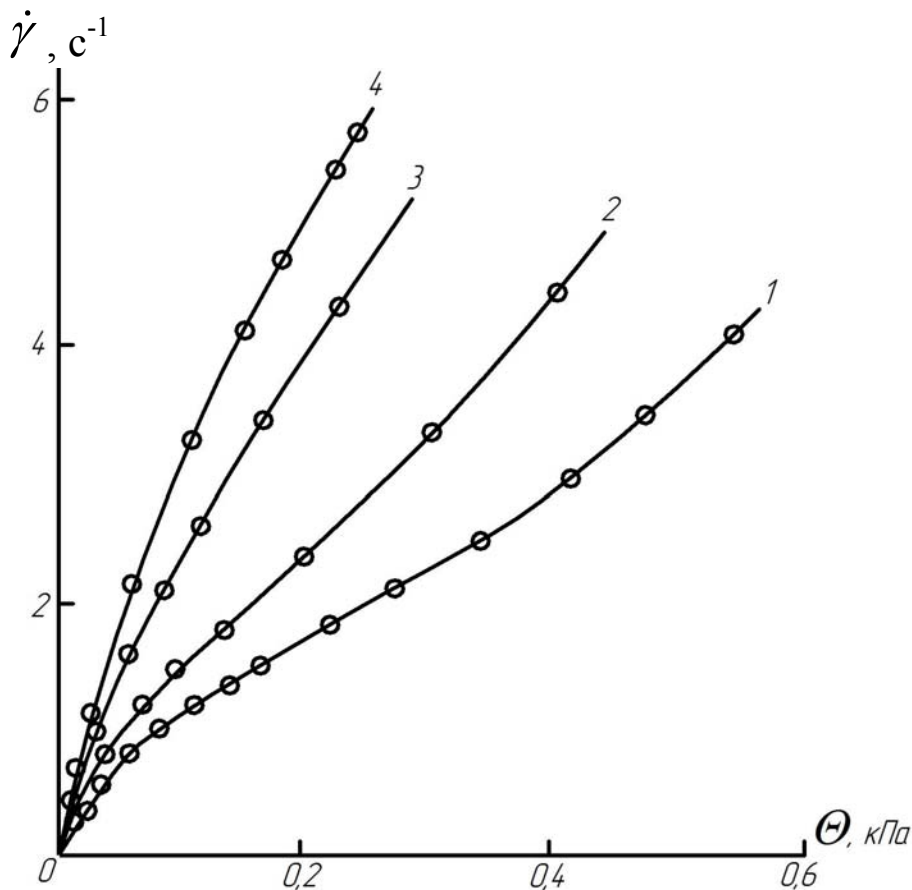


Рисунок 7.7 –
Криві течії маси
праліне
«Кара-Кум»
при амплітуді
деформації 0,12,
частоті 8 Гц
(криві 1, 2)
та 24 Гц (криві
3-7), різної тем-
пературі 30⁰С:

1, 3 – 30;
2, 4 – 34;
5 – 50; 6 – 55;
7 – 60.

У зв'язку з питанням транспортування шоколадних мас були проведені дослідження реологічних властивостей маси для цукерок «Спорт» [30]. У результаті експериментів були визначені: напруження зсуву θ , швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ та ефективна в'язкість η_{EF} . Випробування проводили при температурі 44⁰С, яка відповідає температурі маси у виробничих умовах. Отримані дані наведені у таблиці 7.5.

При дослідженнях впливу виду жиру на в'язкість праліне на віскозиметрі РМ-1 було встановлено, що при температурі від 25 до 28⁰С, жирності праліне типу «Білочка» 0,28-0,30 кг/кг та швидкості зсуву від 1 до 50 с⁻¹ ефективна в'язкість η_{EF} (Па·с) незалежно від виду жиру, який додається, визначається за формулою $\eta_{EF} = B_0^* \dot{\gamma}_*^{-m}$, де $B_0^* = 4010 - 94,3t$; $m = 0,7$. При температурі 31⁰С та 34⁰С криві течії праліне «Білочка» описуються рівнянням Оствальда $\theta = B_1^* \dot{\gamma}^n$ при $\theta_0 = 0$; значення коефіцієнтів рівняння наведені у таблиці 7.6.

Аналіз результатів дослідів показав, що тиск суттєво впливає на реологічні характеристики шоколадних мас.

Головним напівфабрикатом для виготовлення цукерок «Верш-

кова помадка» є помада, яка складається з кристаликів сахарози та між кристального сиропу (рідинної фази).

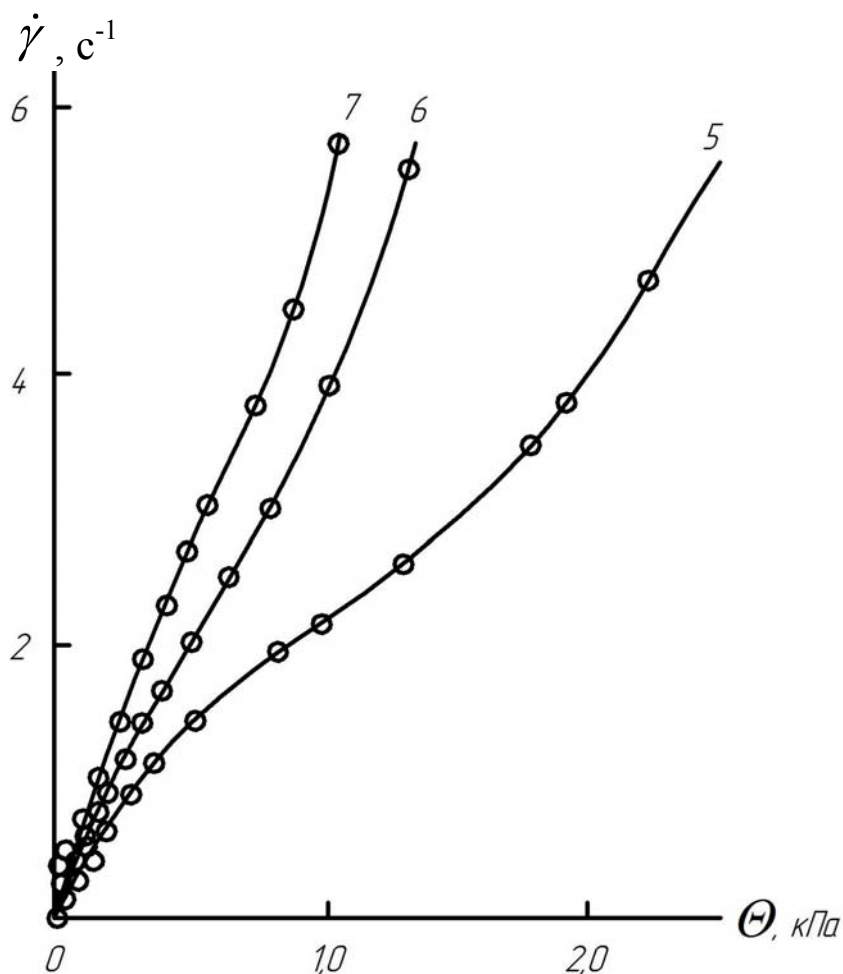


Рисунок 7.8 – Криві течії молочної помади при амплітуді деформації 0,12, частоті 8 Гц (криві 1, 2) та 24 Гц (криві 3-7), різної температури 30⁰С:

- 1, 3 – 30;
- 2, 4 – 34;
- 5 – 50;
- 6 – 55;
- 7 – 60.

Таблиця 7.5 – Залежність швидкості зсуву $\dot{\gamma}$, ефективної в'язкості $\eta_{E\Phi}$ та напруження зсуву θ цукерної маси від тиску

Тиск 0,3 МПа			Тиск 0,6 МПа			Тиск 1 МПа		
θ , кПа	$\eta_{E\Phi}$, кПа·с	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹	θ , кПа	$\eta_{E\Phi}$, кПа·с	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹	θ , кПа	$\eta_{E\Phi}$, кПа·с	$\dot{\gamma}$, с ⁻¹
17,2	14,3	1,20	30,8	38,5	0,8	49,6	35,4	1,4
19,7	5,36	3,67	35,0	9,22	3,8	62,8	13,7	4,6
21,1	3,60	5,85	41,8	5,64	7,4	77,6	8,83	8,8
22,6	2,76	8,20	43,0	4,70	9,15	86,5	7,86	11,0
24,1	2,63	9,15	48,5	4,42	11,2	94,0	7,34	12,8
28,6	1,96	14,60	54,6	3,75	14,6	101	6,91	14,6
31,8	1,74	18,25	57,5	3,15	18,3	110,6	6,67	16,6

Помаду отримують уварюванням суміші цукрово – паточного та молочного сиропів, охолодженням та збиванням. Процес відсадження

вершкової помадки на пресах супроводжується її течію по каналах нагнітальних органів.

Таблиця 7.6 – Значення коефіцієнтів рівняння Оствальда для праліне «Білочка» з різними жирами

Коефіцієнти	Температура, °С	Какао – масло	Кондитерський жир	Кокосове масло	Шоклін
B_1^*	31	1600	1000	1280	1416
	34	1230	952	1220	496
n	31	0,28	0,35	0,33	0,21
	34	0,34	0,34	0,34	0,44

Для того, щоб викликати течію матеріалу з визначеною швидкістю, необхідно прикласти до системи значні зусилля.

Було проведене вивчення властивостей в'язкості «Вершкової помадки». Експерименти здійснювали на ротаційному віскозиметрі РМ-1 з масою, виготовленою у виробничих умовах, температурою 24°С, жирністю 0,159 кг/кг і вологістю 0,102 кг/кг [29].

Після обробки експериментальних даних побудовані логарифмічні криві течії $\lg \theta - \lg \dot{\gamma}$ для вершкової помадки, які з достатньою точністю апроксимуються декількома прямими. У діапазоні швидкостей від 0,04 до 10 с⁻¹ криву течії можна замінити двома прямими: перша для швидкостей від 0,04 до 0,3 с⁻¹, друга – від 0,3 до 10 с⁻¹. Тангенс куту нахилу першої прямої декілька більше, ніж тангенс кута другої. Таким чином, було виявлено, що вершкова помадка проявляє неньютонівську течію, тобто в'язкість є функцією швидкості зсуву.

Д.М. Мак-Кельві [24] указує, логарифмічні криві течії розплавів полімерів мають вигляд прямих, якщо обмежитися одним-двома порядками швидкостей зсуву, але при змінненні швидкості на декілька порядків криві відхиляються від прямої. Це явище пояснюється тим, що з підвищенням напруження зсуву відбувається зменшення опору потоку, при високих швидкостях опір залишається майже постійним, у результаті чого матеріал поводить як ньютонівська рідина [43].

Експериментальні дані показали, що повну криву течії вершкової помадки не можна описати загальним степеневим законом, але її характерні ділянки можуть бути їм описані. Для першої ділянки кривої (швидкість зсуву до 0,3 с⁻¹) індекс течії n_1 дорівнює 0,53. Приймавши $\dot{\gamma}^0 = 1$ с⁻¹, знайшли значення $\theta^0 = 8,2$ кПа·с. Рівняння в'язкості (в

кПа·с) для першої ділянки кривої течії приймає вигляд:

$$\eta_{E\Phi} = \eta_{E\Phi}^0 \left| \dot{\gamma} / \dot{\gamma}^0 \right|^{n_1 - 1} = 8,2 \dot{\gamma}^{-0,47} . \quad (7.3)$$

Для другої ділянки (швидкість зсуву від 0,3 до 10 с⁻¹) з індексом течії $n_2 = 0,123$ при $\dot{\gamma}^0 = 1 \text{ с}^{-1}$, $\theta^0 = 5,2 \text{ кПа}$, рівняння течії має вигляд:

$$\eta_{E\Phi} = 5,2 \dot{\gamma}^{-0,877} . \quad (7.4)$$

Таким чином, підставляючи у рівняння (7.3) та (7.4) різні значення швидкості зсуву, отримують залежність $\eta_{E\Phi}(\dot{\gamma})$ для маси, яка досліджується. Така залежність для двох діапазонів швидкостей наведена на рисунку 7.9.

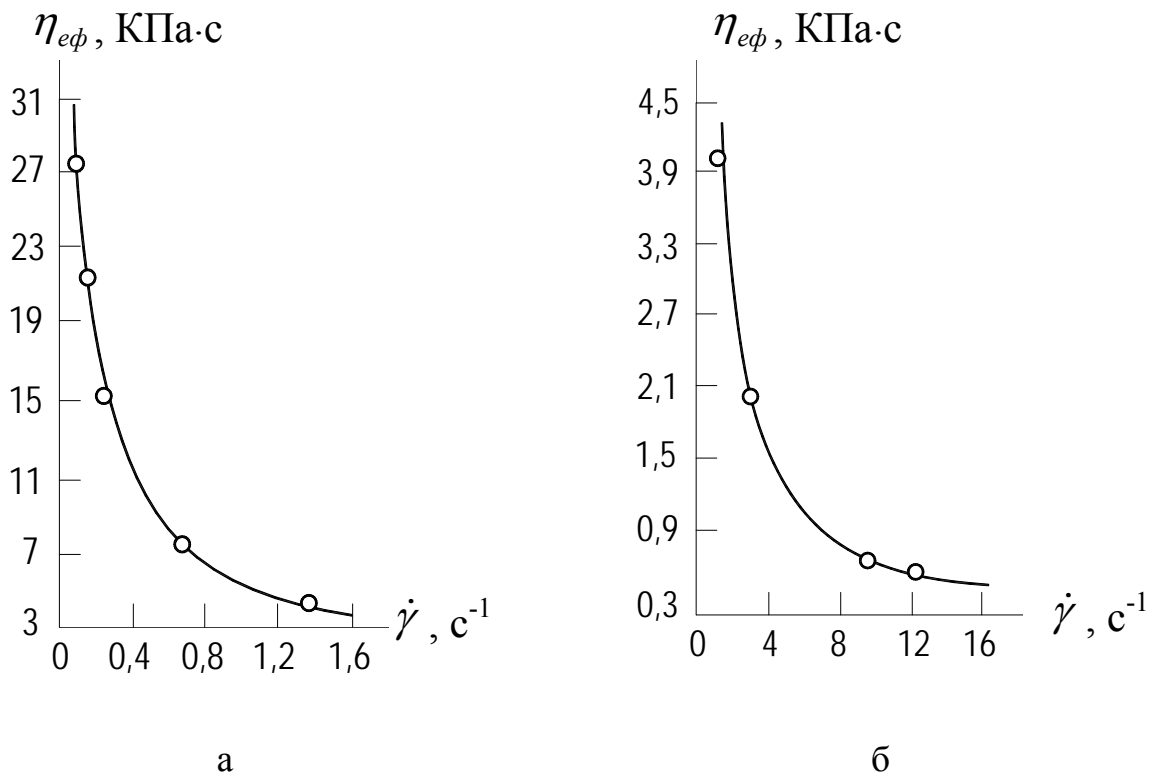


Рисунок 7.9 – Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву маси для цукерок «Вершкова помадка» при температурі 24⁰С

Добрий збіг експериментальних значень з теоретичними підтверджує припущення, що реологічні властивості помадки для визначеного діапазону швидкостей зсуву описується степеневим рівнянням.

Для того, щоб рівняннями (7.3) та (7.4) можна було користуватися при розрахунках реальних процесів формування, в них необхідно ввести визначені змінення, які враховують вплив температури.

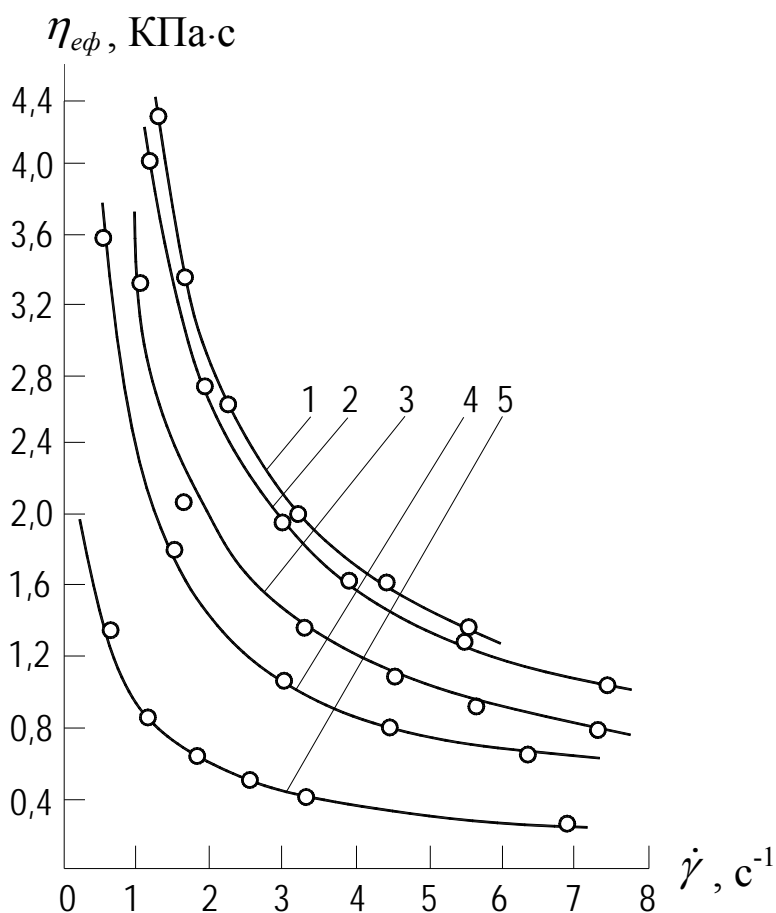


Рисунок 7.10 – Залежність ефективної в'язкості маси для цукерок «Вершкова помадка» від швидкості зсуву при температурі $^{\circ}\text{C}$:

1 – 16; 2 – 20; 3 – 24; 4 – 28; 5 – 32

пературах зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість особливо зменшується у діапазоні порівняно малих швидкостей зсуву – приблизно до 5 с^{-1} . При подальшому збільшенні швидкості в'язкість змінюється незначно. Отримані криві характерні для структурованих систем.

При малих напруженнях зсуву, тобто, і при малих швидкостях зсуву структура маси частково відновляється, з підвищенням ступені руйнування структури в'язкість змінюється дуже мало.

Слід відмітити, що ступінь відхилення від ньютонівської течії в обраному інтервалі температур не змінюється, оскільки індекс течії

Була досліджена залежність ефективної в'язкості та напруження зсуву маси для цукерок «Вершкова помадка» від швидкості зсуву при різній температурі. За допомогою термостату регулювали та автоматично підтримували температуру. Інтервал температур, в якому проводилися експерименти, обраний з урахуванням режимів роботи у виробничих умовах: 16, 20, 24, 28 і 32°C (рисунок 7.10).

Криві змінення в'язкості вершкової помадки у залежності від швидкості зсуву мають вигляд, характерний для багатьох полімерних матеріалів. При всіх обраних тем-

для всіх кривих практично однаковий: для швидкостей зсуву від $0,3$ до 10 с^{-1} він дорівнює $0,27$. Зі збільшенням температури маси напруження зсуву помітно зменшується. При змінненні температури від 16 до $32 \text{ }^\circ\text{C}$ відбувається зменшення напруження майже у 7 разів.

Порівнювати величини напружень зсуву при різній температурі можна при будь-якої однакової швидкості зсуву. Зручно це робити при $\dot{\gamma}^0 = 1 \text{ с}^{-1}$.

Провівши на графіку $\lg \theta - \lg \dot{\gamma}$ при $\dot{\gamma}^0 = 1 \text{ с}^{-1}$ ординату, отримуємо на ній значення напруження зсуву θ^0 , яке входить до формул степеневого закону:

$$\theta = \theta^0 (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}^0)^n \quad \text{або} \quad \eta_{E\Phi} = \theta^0 \dot{\gamma}^{n-1} / (\dot{\gamma}^0)^n. \quad (7.5)$$

θ^0 можна навести як функцію температури T . При температурах від 16 до $20 \text{ }^\circ\text{C}$ змінення напруження зсуву незначне, зі збільшенням температури до $32 \text{ }^\circ\text{C}$ ця залежність приймає лінійний характер. Тобто при температурах, які відповідають цієї ділянці, для отримання стабільного процесу формування масу необхідно термостатувати.

Дослідження характеристик в'язкості «Вершкової помадки» жирністю $0,159 \text{ кг/кг}$ і вологістю $0,102 \text{ кг/кг}$ здійснювали на ротаційному віскозиметрі РМ-1. Діапазон змінення температури – від 20 до $32 \text{ }^\circ\text{C}$ [30]. Результати експериментів показали, течію «Вершкової помадки» можна описати степеневим законом у визначеному діапазоні змінення швидкості зсуву. Рівняння в'язкості з урахуванням поправки на температуру має вид залежності $\eta_{E\Phi} = B_0^* \dot{\gamma}_*^{-m}$, де величини констант наступні: $B_0^* = a - bT$; $m = 1 - n$; T - температура помадки. Емпіричні коефіцієнти мають значення: $a = 85026 \text{ Па}$, $b = 275 \text{ Па/К}$.

Для проведення інженерних розрахунків значення n приймається у залежності від того, для якого діапазону змінення $\dot{\gamma}$ розглядається процес течії: при $\dot{\gamma} \leq 0,3 \text{ с}^{-1}$ $n = 0,4$; при $\dot{\gamma}$ від $0,3$ до 5 с^{-1} $n = 0,2$.

Криві течії в'язкості «Вершкової помадки» від швидкості зсуву мають вигляд, характерний для структурованих систем: при всіх обраних температурах зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість зменшується, особливо швидко у діапазоні порівняно малих швидкостей зсуву до 5 с^{-1} ; при подальшому збільшенні швидкості в'язкість змінюється незначно, що наведено у таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Залежність ефективної в'язкості (Па·с) цукерок «Вершкова помадка» від швидкості зсуву та температури

Швидкість зсуву, с ⁻¹	Температура, °С				
	16	20	24	28	32
1	5500	4450	3350	2250	1000
3	2150	1950	1450	1050	450
5	1400	1300	1000	700	250
7	1200	1050	800	600	200
8	1100	1000	700	600	200

Найбільший інтерес викликає інтервал температур від 20 до 32°С, де проявляється лінійна залежність, оскільки в цих границях можливе формування вершкової помадки у виробничих умовах. Для вказаного інтервалу температур залежність $\theta^0(T)$ можна представити лінійною функцією.

Таким чином, рівняння степеневого закону з урахуванням температури вершкової помадки можна записати наступним чином:

$$\theta = (A + BT)\dot{\gamma}^n / (\dot{\gamma}^0)^n ; \eta_{E\Phi} = (A + BT)\dot{\gamma}^{n-1} / (\dot{\gamma}^0)^n , \quad (7.6)$$

де T - температура маси, K ; A і B - емпіричні коефіцієнти, які відповідно дорівнюють 85026 Па та 275 Па/К.

Підраховуючи запропонованими рівняннями напруження зсуву та в'язкість, можна показати, що відносне змінення цих параметрів при зміненні температури на один градус складає приблизно 8%.

Під час дослідження роботи відсаджувальних машин для «Вершкової помадки» з ціллю вибору оптимальних режимів роботи, забезпечення доброї якості готових виробів та з ціллю отримання даних для створення принципово нових машин виникла необхідність визначення реологічних властивостей помадки у залежності від тиску [29].

При будь-якому тиску вершкова помадка проявляє аномалію в'язкості, характер кривих залежності $\eta_{E\Phi} = \eta_{E\Phi}(\dot{\gamma})$ при підвищеному тиску не змінюється, але в'язкість при всіх швидкостях зсуву з підвищенням тиску помітно збільшується (рисунок 7.11).

При швидкості зсуву 3 с⁻¹ та атмосферному тиску в'язкість дорівнює 1580 Па·с, при тиску 0,1 МПа вона зростає до 1850 Па·с, а при тиску 0,5 МПа стає дорівнювати 2400 Па·с, тобто збільшується приблизно у 1,5 разів у порівнянні зі значенням при атмосферному тиску.

На логарифмічній сітці $\lg \theta - \lg \dot{\gamma}$ (рисунок 7.12) експериментальні дані добре співпадають з прямими лініями, що показує засто-

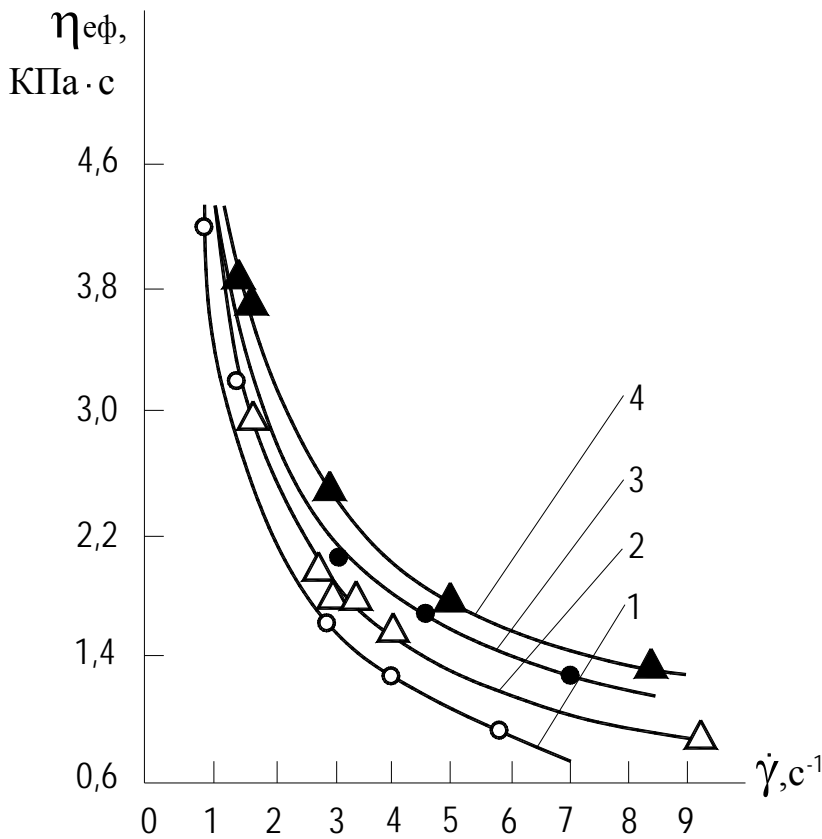


Рисунок 7.11 – Залежність ефективної в'язкості «Вершкової помадки» від швидкості зсуву при тиску (МПа):

1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,3; 4 – 0,5

шому підвищенні тиску до 0,5 МПа індекс течії не змінюється. Зі збільшенням тиску помітно змінюється величина напруження зсуву θ^0 (відрізок, який відсікає пряма на ординаті при $\dot{\gamma} = 1 \text{ c}^{-1}$ (рисунок 7.12).

Обробка експериментальних даних дозволила отримати наступну залежність:

$$\theta^0 = \theta_{p=0}^0 + cp, \quad (7.7)$$

де $\theta_{p=0}^0$ - напруження зсуву при атмосферному тиску і швидкості зсуву $\dot{\gamma} = 1 \text{ c}^{-1}$, Па; p - тиск, Па; $c = 2,4 \cdot 10^{-3}$ – емпіричний коефіцієнт.

Рівняння для розрахунку в'язкості помадки та напруження зсуву у залежності від швидкості зсуву $\dot{\gamma}$ і тиску p мають вигляд:

сування степеневого закону для опису течії маси, яка досліджується, в обраному діапазоні тисків та швидкостей зсуву. Підвищення тиску веде до збільшення напружень зсуву при тієї ж швидкості зсуву.

При $\dot{\gamma} = 1 \text{ c}^{-1}$ напруження збільшується від 370 Па при атмосферному тиску до 480 Па при тиску 0,5 МПа, тобто приблизно в 1,3 рази, а при $\dot{\gamma} = 5 \text{ c}^{-1}$ ця різниця зростає до 1,65 разів.

При атмосферному тиску індекс течії маси n дорівнює 0,195, а при тиску 0,1 МПа він збільшується до 0,345, при подальшому

$$\eta_{E\Phi} = (\theta_{p=0}^0 + cp) \dot{\gamma}^{n-1} / |\dot{\gamma}^0|^n; \quad \theta = (\theta_{p=0}^0 + cp) \dot{\gamma} / |\dot{\gamma}^0|^n, \quad (7.8)$$

де $\theta_{p=0}^0 = 3,5 \cdot 10^{-3}$ Па.

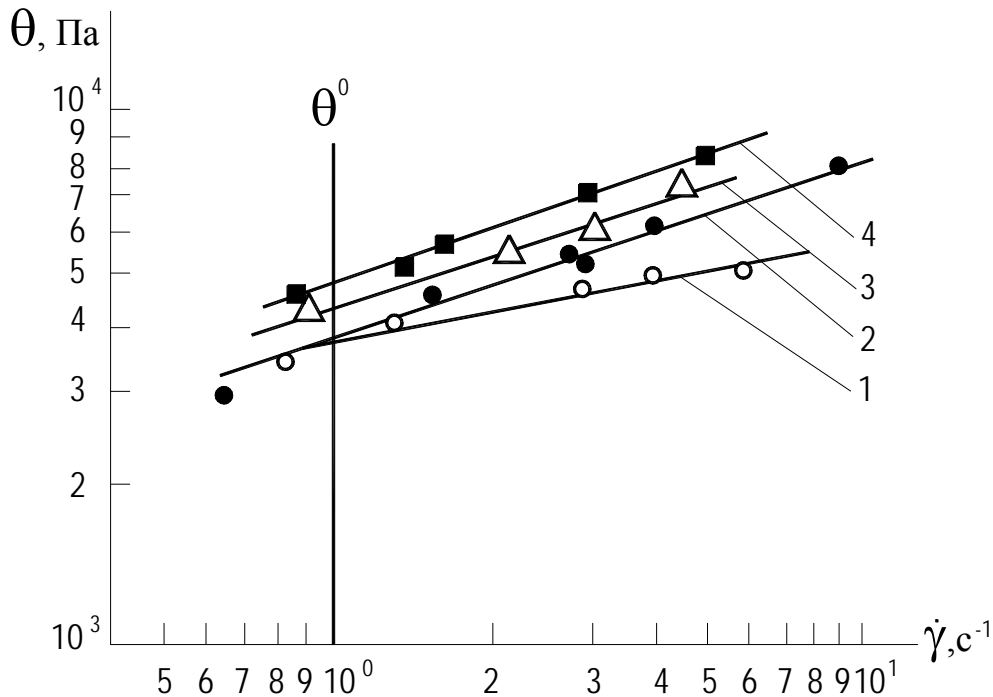


Рисунок 7.12 – Залежність напруження зсуву «Вершкової помадки» від швидкості зсуву при тиску (МПа):

1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,3; 4 – 0,5

Таблиця 7.8 - Залежність $\eta_{E\Phi}$ (Па·с) від швидкості зсуву та тиску при температурі 24°C

Швидкість зсуву, с ⁻¹	Тиск $p \cdot 10^{-5}$, Па			
	0	1	3	5
1	3400	3900	4100	4600
3	1600	1800	2100	2400
5	1100	1300	1600	1800
7	800	1100	1300	1500
9	700	800	1100	1300

«Вершкова помадка» проявляє аномалію в'язкості при надлишковому тиску, при цьому ефективна в'язкість при всіх швидкостях зсуву помітно зростає. Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву та тиску наведена у таблиці 7.8.

Течія «Вершкової помадки» в обраному діапазоні тисків та швидкостей зсуву описується рівнянням Оствальда $\theta = B_1^* \dot{\gamma}^n$. Підвищення тиску веде до збільшення напруження зсуву при тієї же швидкості зсуву. Наприклад, при

$\dot{\gamma} = 1 \text{ c}^{-1}$ напруження збільшується від 370 Па при атмосферному тиску до 480 Па при тиску $5 \cdot 10^5$ Па, тобто приблизно в 1,3 рази, а при $\dot{\gamma} = 5 \text{ c}^{-1}$ ця різниця зростає до 1,65 разів.

При атмосферному тиску індекс течії $n=0,195$, а при надлишковому тиску $1 \cdot 10^5$ Па він збільшується до $n=0,345$, при подальшому підвищенні тиску до $5 \cdot 10^5$ Па він не змінюється.

Рівняння $\eta_{E\Phi} = B_0^* \dot{\gamma}^{-m}$ для визначення в'язкості «Вершкової помадки», виготовленої по нормальній рецептурі, при температурі $24 \text{ }^\circ\text{C}$ та надлишковому тиску від 0 до $5 \cdot 10^5$ Па має наступні константи:

$$B_0^* = \theta_{p=0} + ap; \quad m = 1 - n,$$

де $\theta_{p=0} = 3,5 \cdot 10^3$ Па – напруження зсуву при $\dot{\gamma} = 1 \text{ c}^{-1}$, атмосферному тиску та температурі $24 \text{ }^\circ\text{C}$; p - надлишковий тиск, Па; $a = 2,4 \cdot 10^3$ - емпіричний коефіцієнт.

При тиску, який перевищує $0,5 \cdot 10^5$ кПа, n слід приймати збільшеним в 1,5 разів.

Температура оказує суттєвий вплив на реологічні властивості помадних цукерних мас. Залежність ефективної в'язкості помадної маси «Загадка» від температури та швидкості зсуву наведена у таблиці 7.9.

Таблиця 7.9 – Залежність $\eta_{E\Phi} \cdot 10^{-3}$ (Па·с) помадної маси «Загадка» від температури та швидкості зсуву

Температура маси, $^\circ\text{C}$	Швидкість зсуву, c^{-1}							
	0,5	1	3	5	7	10	13	16
20	21,2	13,5	7,0	5,4	4,63	3,82	3,34	2,95
24	20,0	12,6	6,2	4,7	3,80	3,08	2,62	2,30
28	15,2	9,0	4,1	3,1	2,52	2,04	1,72	1,53
32	10,8	6,0	2,8	2,0	1,68	1,40	1,23	1,07
36	4,0	2,5	1,5	1,2	1,06	0,94	0,86	0,79

Великий вплив на реологічну поведінку цукерних мас оказує вологість. Змінення вологості маси навіть у допустимих рецептурою границях (від 10 до 13%) викликає зниження в'язкості, еквівалентне

підвищенню температури на 4-6 $^\circ\text{C}$, що оказує негативний вплив на якість готової продукції.

Як показали результати дослідів на ротаційному віскозиметрі РМ-1, помадні маси незалежно від рецептурного складу відносяться до псевдопластичних тіл, течію яких достатньо добре описують степенева модель Оствальда або модель Гершеля-Балклі [30]. Коефіцієнти цих рівнянь для помадних мас наведені у таблиці 7.10.

Тиск оказує суттєвий вплив на ефективну в'язкість помадних мас. Залежність в'язкості маси цукерок «Озеро Ріца» від швидкості зсуву та тиску наведена у таблиці 7.11.

Таблиця 7.10 – Коефіцієнти реологічних рівнянь для помадної маси «Загадка»

Температура, °С	Модель Освальда $\theta = B_1^* \dot{\gamma}^n$		Модель Гершеля-Балклі $\theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\gamma}^n$		
	B_1^*	n	θ_0 , Па	B_1^*	n
20	14,0	0,43	5800	7,6	0,63
24	13,3	0,36	4600	8,7	0,47
28	8,6	0,37	3400	5,6	0,47
32	5,8	0,39	3300	2,8	0,58
36	2,9	0,44	1100	2,1	0,54

Таблиця 7.11 – Залежність в'язкості $\eta_{EF} \cdot 10^3$ (Па·с) маси цукерок «Озеро Ріца» від швидкості зсуву та тиску

Швидкість зсуву, с ⁻¹	Тиск, МПа			
	0	0,1	0,2	0,3
0,1	30	50	70	80
1	5,0	7,0	7,6	8,2
2	3,2	3,5	5,0	5,5
4	2,1	2,8	3,3	3,8
10	1,2	1,5	1,8	2,1
16	0,9	1,1	1,4	1,7

Криві течії маси для цукерок «Озеро Ріца» (рисунок 7.13) показують, що з підвищенням тиску в'язкість маси збільшується. Наприклад, при швидкості зсуву 10 с⁻¹ в'язкість зростає від 1200 Па при атмосферному тиску до 2000 Па при тиску 0,3 МПа, тобто в 1,6 разів.

Реологічні властивості цукерної маси «Руський узор», виготовленої у виробничих умовах за нормальною рецептурою (жирність 0,20 кг/кг та вологість 0,10 кг/кг), були визначені на віскозиметрі РМ-1 при температурі 28, 29, 30 °С.

Течія маси цукерок «Руський узор» описується трьохконстантною реологічною моделлю Гершеля-Балклі $\theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\gamma}^n$.

При підвищенні швидкості зсуву в'язкість маси зменшується. Більш різке зниження відбувається при змінненні малих швидкостей: при температурі 29 °С в'язкість змінюється від 1600 до 1380 Па·с при збільшенні швидкості зсуву від 5 до 6 с⁻¹ та від 320 до 317 Па·с – при зростанні швидкості від 60 до 61 с⁻¹. Зі збільшенням температури θ_0

та B_1^* помітно зменшуються, а n залишається незмінним. У рівняння в'язкості введені поправки, які враховують вплив температури:

$$\eta_{E\Phi} = (a + bt)/\dot{\gamma} + (a_1 + b_1t)\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (7.9)$$

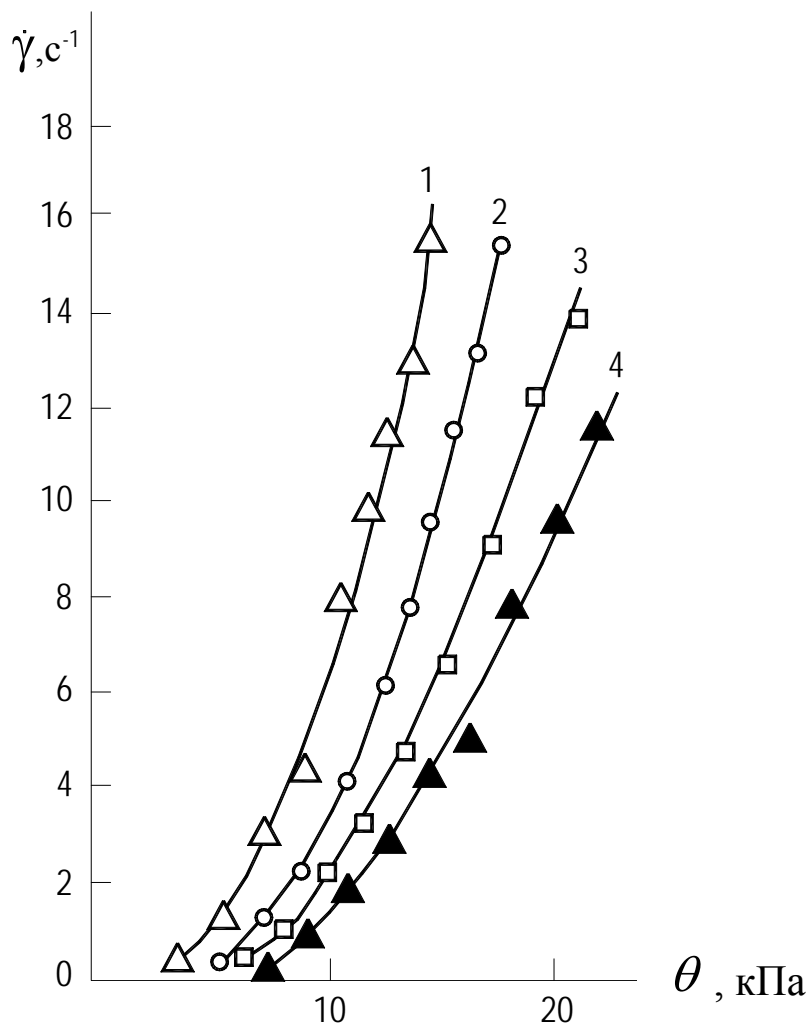


Рисунок 7.13 - Криві течії маси для цукерок «Озеро Рица» при тиску (МПа):
1 – 0; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,3

Таблиця 7.12 – Значення коефіцієнтів до рівняння (7.9)

Індекс течії n	a	b	a_1	b_1
0,50	28525	-875	21323	-667
0,55	12900	-400	9524	-282

де $\eta_{E\Phi}$ - ефективна в'язкість, Па·с;
 $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву, s^{-1} ; t - температура маси, $^{\circ}C$;
 n - індекс течії;
 a, b, a_1, b_1 - емпіричні коефіцієнти (таблиця 7.12).

Рівняння (7.9) справедливо при змінненні швидкості зсуву від 2 до $140s^{-1}$, температури маси – від 28 до $30^{\circ}C$ при атмосферному тиску.

Були досліджені реологічні характеристики молочної помади та цукерних мас «Руський узор», «Мокко» і «Космічні» у діапазоні змінення адлишко-

вого тиску від 0 до $4,9 \cdot 10^5$ Па та швидкості зсуву – від 1,5 до $120 s^{-1}$

[30]. Криві течії цих мас запропоновано описувати рівнянням Гершеля-Балклі.

Дані таблиці 7.13 показують, що з підвищенням тиску граничне напруження зсуву та коефіцієнт консистенції зростають, а індекс течії залишається практично постійним. Найбільше змінення в'язкості відбувається при збільшенні тиску від 0 до $0,98 \cdot 10^5$ Па.

Таблиця 7.13 – Залежність коефіцієнтів рівняння Гершеля-Балклі від тиску та температури кондитерських мас

Кондитерська маса	Температура, °С	Граничне напруження зсуву, Па					Коефіцієнт консистенції				
		При тиску $p \cdot 10^{-3}$									
		0	98	196	294	490	0	98	196	294	490
«Руський узор»	28	1650	2440	3170	3170	4475	2255	2990	3640	4080	4710
	29	1100	1760	2185	2500	2955	1825	2395	2835	3130	3540
	30	880	1352	1690	1900	2200	1550	2095	2555	2825	3220
«Космічні»	25	4050	5550	-	6150	-	700	1040	-	1310	-
	27	2550	3850	-	4800	5400	553	930	-	1082	1194
«Мокко»	30	1000	1500	-	-	1580	3820	7950	-	-	1049
Молочна помада	30	3000	6000	-	7000	-	2275	4630	-	5070	-

Вивчали реологічні властивості маси для трюфелів «Екстра» та впливу температури використовуючи «Реотест-2». [30].

Масу готували у виробничих умовах по уніфікованій рецептурі (жирність 43,3, вологість 7%) збиванням шоколадної маси з вершковим маслом та смаковими доданками протягом 30-40 хвилин. Маса має ніжну консистенцію і є трьохфазною системою: тверда фаза – частки какао та цукру, рідка – суміш какао-масла з вершковим, газообразна – повітря, яким маса насичується при збиванні.

Необхідну кількість матеріалу завантажували у вимірвальний циліндр та термостатували протягом 20-25 хвилин. Потім отримували криву течії у діапазоні швидкостей зсуву від 0,5 до $218,7 \text{ с}^{-1}$ – спочатку при їх зростанні, а потім при зменшенні. Інтервал варіювання температури складав 25 - 34 °С. Після обробки експериментальних даних будували криві течії у логарифмічних координатах.

Для всіх температур вони з достатньою точністю апроксимовані лінійною функцією з однаковим нахилом графіків до осей коор-

динат, що дозволило віднести масу, яка досліджувалася, до псевдопластичної рідини (таблиця 7.14).

Таблиця 7.14 - Залежність коефіцієнтів рівняння Оствальда від температури трюфельної маси «Екстра»

Коефіцієнти	Температура маси, °С				
	25	28	31	33	34
<i>K</i>	131,0	93,7	89,5	73,3	62,2
<i>n</i>	0,37	0,38	0,36	0,37	0,39

Доцільно описувати реологічну поведінку мас як при вібрації, так і без неї законом Оствальда.

У границях експериментів *n* можна вважати постійним та для розрахунків дорівнюючим 0,37, *K* - функцією температури.

Ефективну в'язкість для трюфелів «Екстра» можна розраховувати за формулою:

$$\eta_{E\Phi} = (306 - 7,05T) / \dot{\gamma}^{0,63} . \quad (7.10)$$

Це рівняння може бути застосоване при змінній температурі від 25 до 34°С та швидкості зсуву від 0,5 до 218,7 с⁻¹.

Криві в'язкості, побудовані за експериментальними даними (рисунк 7.14), мають однаковий вигляд для всіх температур, при цьому в'язкість зі збільшенням температури падає. Зі збільшенням швидкості зсуву (при невеликих значеннях) в'язкість різко знижується, а потім відзначається плавний перехід в область зруйнованої структури.

Формування збитих мас треба вести при таких швидкостях зсуву, коли структура маси не зруйнована. Максимальні швидкості зсуву, при яких можна отримати цукерки доброї якості, відповідають початку ділянки плавного переходу в область зруйнованої структури.

У таблиці 7.15 наведені значення граничної швидкості зсуву при різній температурі трюфельної маси.

Значення швидкості зсуву нижче граничної відповідає незруйнованій структурі трюфельної маси. Чим вище температура маси, тим менші швидкості зсуву повинні бути при формуванні.

При вібрації спостерігається значне зменшення коефіцієнту консистенції *K* та збільшення індексу течії *n* у рівнянні Оствальда. Це свідчить про деяке наближення характеру течії до ньютонівської. У таблиці 7.16 наведені значення коефіцієнтів рівняння Оствальда у залежності від температури та режиму течії цукерних мас. Ефект діяння вібрації визначається коефіцієнтом зниження в'язкості ϕ , який дорівнює відношенню в'язкості в умовах стаціонарної течії до в'язкості в

умовах течії з вібрацією при одній і тій же швидкості зсуву (таблиця 7.17).

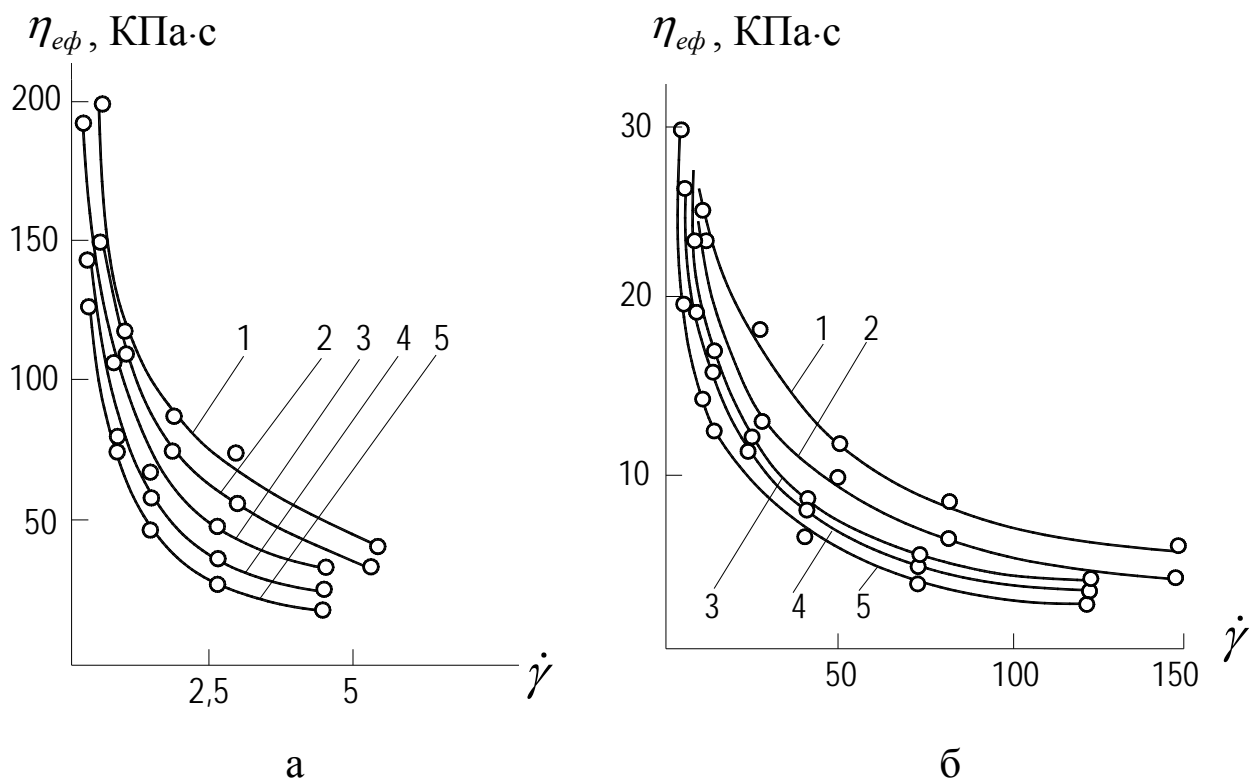


Рисунок 7.14 – Залежність ефективної в'язкості цукерної маси для трюфельів «Екстра» від швидкості зсуву до 5 c^{-1} (а) та до 150 c^{-1} (б) при температурі $^{\circ}\text{C}$:

1 – 25; 2 – 28; 3 – 31; 4 – 33; 5 – 34

Таблиця 7.15 - Значення граничної швидкості зсуву при різній температурі трюфельної маси

Температура маси, $^{\circ}\text{C}$	25	28	31	33	34
Гранична швидкість зсуву, c^{-1}	11,7	9,8	8,4	7,8	7,5

Найбільший ефект діяння вібрації спостерігається в області малих швидкостей зсуву. Оскільки зі збільшенням інтенсивності стаціонарної течії відбувається значне руйнування структури маси, у результаті чого діяння вібрації не може

забезпечити суттєвого зниження в'язкості. В діапазоні швидкостей зсуву, який відповідає режиму течії при формуванні, коефіцієнт зниження в'язкості вище 1,5.

Були проведені дослідження структурно - механічних властивостей деяких кондитерських виробів та напівфабрикатів [30]. Отримані залежності в'язкості від швидкості зсуву (таблиця 7.18).

Результати досліджень показали, що системи, які досліджувалися володіють стійкою структурою, руйнування якої починається тільки після досягнення визначеного напруження. Зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість систем зменшується, а після повного руйнування структури в'язкість залишається практично постійною.

Таблиця 7.16 – Залежність коефіцієнтів рівняння Оствальда від температури та режиму течії

Цукерна маса	Температура, °C	Режим течії			
		Без вібрації		З вібрацією	
		<i>K</i>	<i>n</i>	<i>K</i>	<i>n</i>
«Кара-Кум»	28	6780	0,21	1180	0,57
	34	1980	0,21	220	0,63
Батончики	28	11340	0,15	2170	0,47
	34	6300	0,15	708	0,61
«Золотий півень»	28	4730	0,17	602	0,61
	32	1580	0,28	520	0,55

Таблиця 7.17 – Залежність коефіцієнта ϕ від швидкості зсуву та температури маси для цукерок «Кара-Кум» ($f=25,5$ Гц, $\gamma_0=0,133$)

Швидкість зсуву, c^{-1}	Температура, °C			
	26	28	30	34
10,0	1,14	2,02	2,22	3,10
20,0	1,11	1,46	1,98	2,25
40,0	1,10	1,24	1,92	1,83
60,0	1,09	1,17	1,91	1,66

Таблиця 7.18 – Змінення в'язкості ірисної маси «Золотий ключик», цукрово – паточно – молочного сиропу та молочної помадки у залежності від швидкості зсуву

Ірисна маса «Золотий ключик»		Цукрово – паточно – молочний сироп		Молочна помадка	
Швидкість зсуву, c^{-1}	В'язкість, Па·с	Швидкість зсуву, c^{-1}	В'язкість, Па·с	Швидкість зсуву, c^{-1}	В'язкість, Па·с
0,685	725	4,0	112,5	1,3	55,0
1,092	575	9,0	70,0	7,3	20,0
2,062	467	18,0	46,5	11,0	13,5
2,438	400	27,0	32,5	19,0	7,5
4,435	365	34,0	26,5	29,0	5,0

Було проведено вивчення властивостей в'язкості кондитерських мас. Для кожної маси був обраний свій температурний діапазон, границі якого визначалися здібністю мас до формування. Найбільш зручна форма опису течії цукерних мас різної реологічної природи степеневим рівнянням

Оствальда. Воно зручно для проведення різноманітних математичних операцій при розрахунках процесів течії цукерних мас у різних технологічних умовах. Аналіз отриманих даних (таблиця 7.19) показав,

що для всіх кондитерських мас з підвищенням температури коефіцієнти консистенції B_1^* зменшуються, а індекс течії n змінюється незначно.

Таблиця 7.19 – Структурно – механічні властивості цукерних мас

Цукерна маса	Температура, °C	Границі швидкості зсуву, c^{-1}	Коефіцієнти		Границі швидкості зсуву, c^{-1}	Граничне напруження зсуву, Па	Пластична в'язкість, Па·с
			B_1^*	n			
По степеневому рівнянню $\theta = B_1^* \dot{\gamma}^n$				По рівнянню Бінгама $\theta = \theta_0 + \eta d\dot{\gamma}/d\tau$			
Суфле «Кофейне»	66	0,17-0,5	13,1	0,32	1,5-8,1	10	8,7
	58	0,17-0,5	19,9	0,51	1,5-8,1	15	13,3
	66	0,5-72,9	16,8	0,72	8,1-24,3	28	6,4
	58	0,5-72,9	25,3	0,71	8,1-24,3	56	8,3
	58	0,17-0,9	49,5	0,30	1,5-8,1	49	11,3
	66	0,9-72,9	36,3	0,46	8,1-24,3	60	4,9
Суфле «Смородинове»	66	0,17-2,7	23,1	0,43	1,5-8,1	18	6,9
	58	0,17-2,7	39,2	0,55	1,5-8,1	27	15,3
	66	2,7-72	18,8	0,66	8,1-24,3	33	5,2
	58	2,7-72	32,8	0,71	8,1-24,3	66	9,6
	66	0,5-2,7	32,9	0,45	8,1-24,3	55	5,5
	58	0,5-2,7	40,0	0,45	8,1-24,3	64	6,8
	66	0,17-0,5	29,5	0,27	-	-	-
«Красна»	36	0,17-0,9	125,0	0,33	2,7-8,1	130	42,2
	28	0,17-0,9	327,5	0,24	2,7-8,1	290	73,4
	36	0,9-8,1	127,5	0,59	-	-	-
	28	0,9-8,1	337,5	0,42	-	-	-
«Космічна»	34	0,17-13,5	248	0,33	1,5-4,5	200	52,7
	26	0,17-13,5	512	0,26	1,5-4,5	460	81,5
	34	-	-	-	4,5-13,5	365	15,5
	26	-	-	-	4,5-13,5	660	34
Кара-Кум	34	0,17-0,9	146	0,31	-	-	-
	28	0,17-0,9	512	0,17	-	-	-
	34	0,9-24,3	152	0,57	8,1-24,3	300	27,4
	28	0,9-24,3	475	0,37	8,1-24,3	730	34,8
«Трюфелі»	31	0,17-2,7	96	0,18	8,1-24,3	117	6,2
	27	0,17-2,7	325	0,21	8,1-24,3	460	5,6
	31	2,7-24,3	80	0,35	-	-	-
	27	2,7-24,3	295	0,32	-	-	-
«Грильяж»	130	1,7-44	350	0,44	9-44	575	31,5
	90	1,7-44	1730	0,46	1,7-8,3	2350	238

Можливо також описувати криві течії рівнянням Бінгама.

Визначали в'язкість маси «Трюфелі» при різній швидкості зсуву у залежності від температури [30]. Інтервал температур обраний від 29 до 32⁰С, оскільки формування маси ведеться при цих температурах. Зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість різко зменшується, що свідчить про часткове руйнування структури, оскільки зі зростанням напруження зсуву кулькові пухирчики повітря перетворюються у еліпсоїди, що полегшує рух шарів маси та веде до зниження в'язкості. Значне зниження в'язкості при температурі 29⁰С відбувається до швидкості зсуву 10 с⁻¹, при 32⁰С – тільки до 2 с⁻¹. Потім криві мають ділянки плавного переходу до постійної в'язкості, цим ділянкам відповідає поступово зростаюча кількість зруйнованих повітряних пухирчиків. Горизонтальні ділянки кривих відповідають в'язкості маси з повністю зруйнованою структурою. З підвищенням температури в'язкість знижується достатньо значно.

Результати експериментів дозволяють проводити механічні розрахунки формуючих органів машин, але за ними не можна встановити оптимальну швидкість формування, при якій не відбувається помітного змінення структури (зниження пористості).

Дослідження дозволили встановити допустимі швидкості зсуву, які не приводять до помітного руйнування структури: при 29⁰С – 13,6 с⁻¹, при 30⁰С - 10с⁻¹, при 31⁰С – 7,9 с⁻¹ та 32⁰С – 3,6с⁻¹.

На віскозиметрі РМ-1 проведено вивчення залежності в'язкості вершкового крему «Шарлотт» вологістю 0,24 кг/кг від тиску. У результаті обробки дослідних даних запропоноване рівняння:

$$\eta_{EF} = 1/(a + b\dot{\gamma}), \quad (7.11)$$

Таблиця 7.20 – Залежність коефіцієнтів рівняння (7.11) від температури та тиску

Температура, °С	Тиск, кПа					
	0		196		392	
	<i>a</i>	<i>b</i> ·10 ⁵	<i>a</i>	<i>b</i> ·10 ⁵	<i>a</i>	<i>b</i> ·10 ⁵
19	0,018	85	0,011	9	0,001	7
20	0,022	100	0,014	10	0,012	9
21	0,030	100	0,019	9	0,012	10
22	0,043	86	0,025	8	0,016	9

де η_{EF} - ефективна в'язкість, Па·с;
 $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву, с⁻¹; *a*, *b* - емпіричні коефіцієнти, значення яких наведені у таблиці 7.20.

Рівняння (7.11) справедливе при змінній швидкості зсуву від 3 до 40 с⁻¹ та тиску - від 0 до 392 кПа. У цьому діапазоні змінення тиску відмічена лінійна залежність в'язкості від тиску. При збільшенні тис-

ку до 490 кПа залежність набуває нелінійний характер, що пояснюється складністю дисперсної системи вершкового крему:

$$\eta_{E\Phi} = (2,45 \cdot 10^{-12} p^2 + 9,15 \cdot 10^{-6} p + 22) / \dot{\gamma} - 0,236p + 1, \quad (7.12)$$

де p - тиск, Па; $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву, с^{-1} .

Руйнування структури крему при атмосферному тиску починається при $\theta = 1 \cdot 10^3$ Па ($\dot{\gamma} = 35 \text{ с}^{-1}$), а при тиску $49 \cdot 10^3$ Па $\theta = 650$ Па ($\dot{\gamma} = 25 \text{ с}^{-1}$). Нелінійне рівняння множинної регресії відображає функціональну залежність ефективної в'язкості крему від швидкості зсуву, тиску та температури:

$$\eta_{E\Phi} = 193,422 - 1,596\dot{\gamma} + 0,0148\dot{\gamma}^2 + 3,815p - 0,165p^2 - 10,895T + 0,186T^2, \quad (7.13)$$

де p - тиск, Па; T - температура крему $^{\circ}\text{C}$.

Відхилення розрахункової в'язкості від експериментальної складає 12-15%.

Дослідження течії вершкового крему дозволило віднести його до реологічного тіла Бінгама [30]. При температурі 20°C пластична в'язкість дорівнює 2,72 Па·с, граничне напруження зсуву – 33,3 Па. Гранична швидкість, при якій крем повністю руйнується, дорівнює 70 с^{-1} . Швидкість зсуву, при якій крем майже не змінює своїх реологічних властивостей, $25\text{-}30 \text{ с}^{-1}$.

Граничне напруження зсуву θ_0 мармеладу «Літній» та «Яблучний формовий» визначали на пенетрометрі ОМП за 5 с поглиблення конусу з кутом при вершині 75° . Зберігання мармеладу протягом 5 діб при температурі мінус 4°C привело до невеликого змінення θ_0 : з $7 \cdot 10^3$ до $9,7 \cdot 10^3$ Па для «Яблучного формового» та з $7,2 \cdot 10^3$ до $8 \cdot 10^3$ Па для «Літнього». З підвищенням температури мармеладу «Літній» до 17°C значення θ_0 збільшується на 50-70%, а при подальшому зміненні до 30°C θ_0 зменшується. Для мармеладу «Яблучний формовий» змінення θ_0 незначне. Зі збільшенням тривалості зберігання θ_0 підвищується, особливо у перші 15-20 діб.

Залежність θ_0 (Па) від температури ($^{\circ}\text{C}$) описується рівняннями:
для мармеладу «Літній»

$$\theta_0 = -0,094t^2 + 2,28t + 91; \quad (7.14)$$

для мармеладу «Яблучний формовий»

$$\theta_0 = -0,089t^2 + 1,73t + 92. \quad (7.15)$$

Залежність θ_0 (Па) від тривалості зберігання t (добы) має експоненціальний вигляд:

$$\theta_0 = a \cdot 10^3 e^{b\sqrt{t}}, \quad (7.16)$$

де a , b - емпіричні коефіцієнти; для мармеладу «Літній» $a=7,6$, при $T=-4^{\circ}\text{C}$ $b=0,136$ та при $T=30^{\circ}\text{C}$ $b=0,178$; для мармеладу «Яблучний формовий» $a=6,4$, при $T=-4^{\circ}\text{C}$ $b=0,175$ та при $T=30^{\circ}\text{C}$ $b=0,245$.

Зараз розвивається тенденція підвищеного інтересу до розробки нових технологій продуктів харчування з використанням рослинної сировини, які оказують оздоровчу дію на організм людини. З ціллю дослідження впливу додатків до рецептури були проведені реологічні дослідження самбуків, одержаних за новою технологією на основі білково-рослинного напівфабрикату з молочної сироватки [23].

Реологічні дослідження з використанням ротаційного віскозиметру Rheotest RN4.1 проводились з ціллю отримання кривих течії, які відображають властивості самбуків при зсуві; знаходження кількісних значень характеристик; вивчення кінетики змінення в'язкості та напруження зсуву; визначення оптимальних параметрів технологічних процесів; встановлення зв'язку між характером течії продукту та ступеню руйнування структури. Досліджувалися 4 зразки: 1 - контрольний зразок, виготовлений без додавання напівфабрикату, і три зразки, що містять білково-рослинний напівфабрикат у кількості 2 - 60%; 3 - 65% та 4 - 70%. Реологічні характеристики самбуків суттєво залежать від температури, вологовмісту, тривалості збивання. Тому зразки були виготовлені з одної первісної сировини, температура продукту 5°C протягом експерименту зберігалася постійною.

Самбук характеризується складним хімічним складом і є пружно – в'язко –пластичним матеріалом. Він являє собою дисперсну систему, в якій пухирчики повітря, пов'язані плівками, утворюють суцільну структуру, що володіє пружністю, в'язкістю та стійкістю. В'язкість системи обумовлена кількістю повітряних пухирчиків, площиною розділу фаз, властивостями дисперсного середовища і т. д. Якість самбуків залежить від здібності зберігати тривалий час надану форму, тому величина граничного напруження зсуву, яка визначає здібність утримувати форму мас є важливою характеристикою.

Криві в'язкості та напруження зсуву, отримані за експериментальними даними мають однаковий вигляд та близькі кількісні значення для всіх зразків, тобто додавання напівфабрикату не оказує суттєвого впливу на структуру виробів.

Зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість зразків самбуків зменшується, а після повного руйнування структури - стабілізується. Особливо швидко значення в'язкості зменшуються у діапазоні порівняно малих швидкостей зсуву до 5 c^{-1} . На цієї ділянці в'язкість зменшилась приблизно на 85% для всіх зразків. Швидкість змінень значень напруження зсуву на цієї ділянці найбільша. При подальшому збільшенні швидкості зсуву у діапазоні від 10 c^{-1} до 75 c^{-1} в'язкість змінюється незначно, ріст значень напруження зсуву при цьому уповільнюється. При швидкостях зсуву вище ніж 75 c^{-1} відбувається стабілізація в'язкості, та при швидкості 100 c^{-1} отримуємо значення граничного напруження зсуву зразків.

При напруженнях нижче граничного напруження зсуву спостерігається повільна течія, при якій структура руйнується, але знову відновляється, тобто існує мала рівноважна ступінь руйнування.

Для всіх зразків криві залежності напруження зсуву від швидкості зсуву з високим коефіцієнтом кореляції апроксимується функцією загального закону Кассона, для якої найбільше відхилення розрахункових та експериментальних даних не перевищує 5 %:

На рисунку 7.15 зображені криві течії чотирьох зразків, а також рівняння, які їх описують.

Були проведені реологічні дослідження вершкового крему з використанням білково-рослинного напівфабрикату на основі молочної сироватки [23].

Реологічні характеристики крему знайдені при експериментальних дослідженнях з використанням ротаційного віскозиметру Rheotest RN4.1.

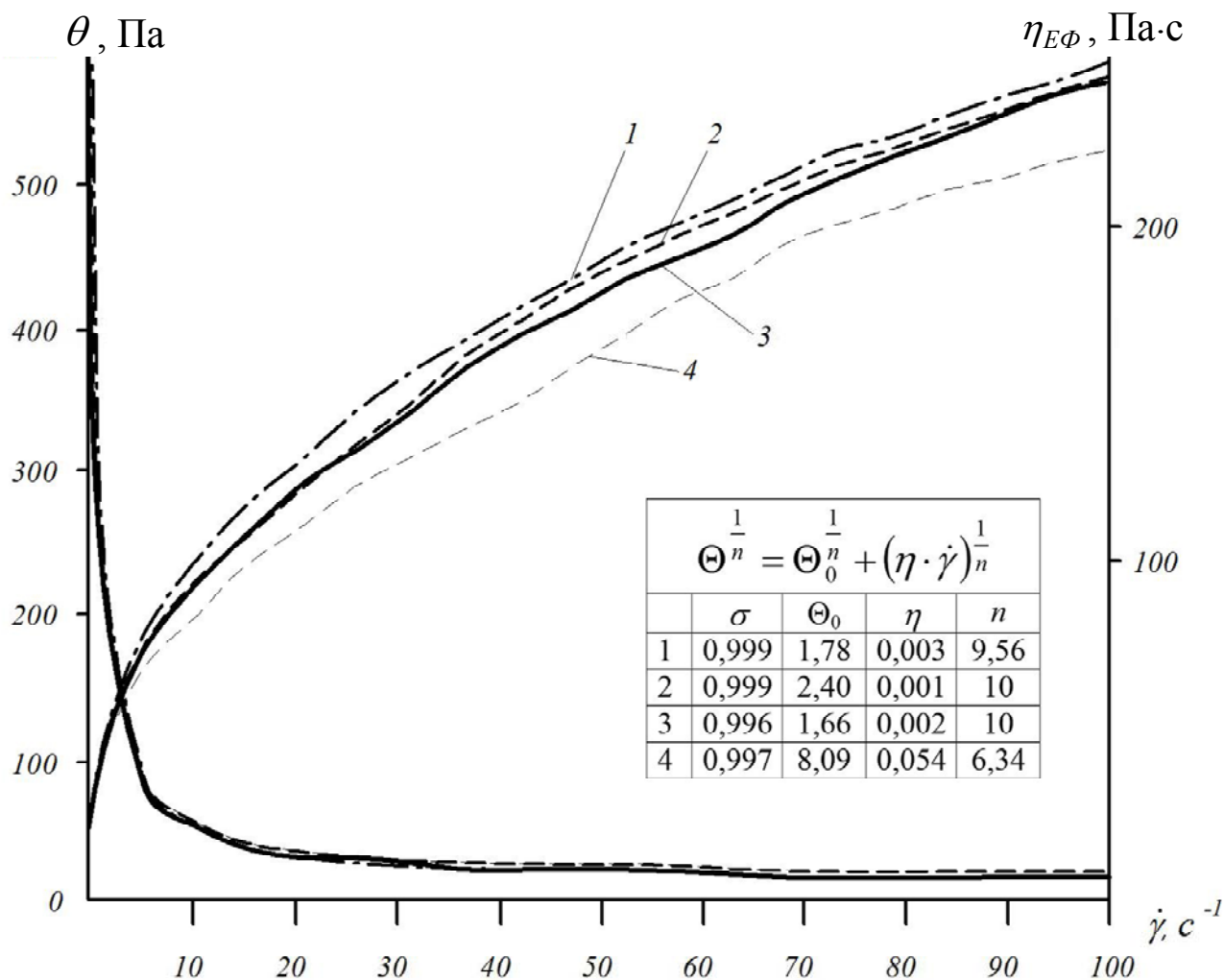


Рисунок 7.15 – Криві течії зразків:

1 - контрольний зразок; 2 – зразок зі вмістом 60% напівфабрикату;
 3 - зразок зі вмістом 65% напівфабрикату; 4 - зразок зі вмістом 70%
 напівфабрикату

Об'єктами дослідження були: контрольний зразок, отриманий за традиційною технологією без додавання напівфабрикату і дослідницькі зразки зі вмістом напівфабрикату 10%, 15%, 20%. Криві течії контрольних зразків у залежності від швидкості зсуву наведені на рисунку 7.16.

Дослідження проводились в діапазоні швидкостей до $40s^{-1}$, з ціллю отримання кривих течії до повного руйнування структури крему. Температурний режим випробувань був обраний таким, щоб маса знаходилась у в'язко - пластичному стані з достатньою для формування ступеню, цієї умові відповідає інтервал температур $12-14^{\circ}$.

При вимірюваннях використано термостат, для підтримки сталої

температури, оскільки для крему вершкового незначні коливання температури приводять до нестабільності реологічних параметрів.

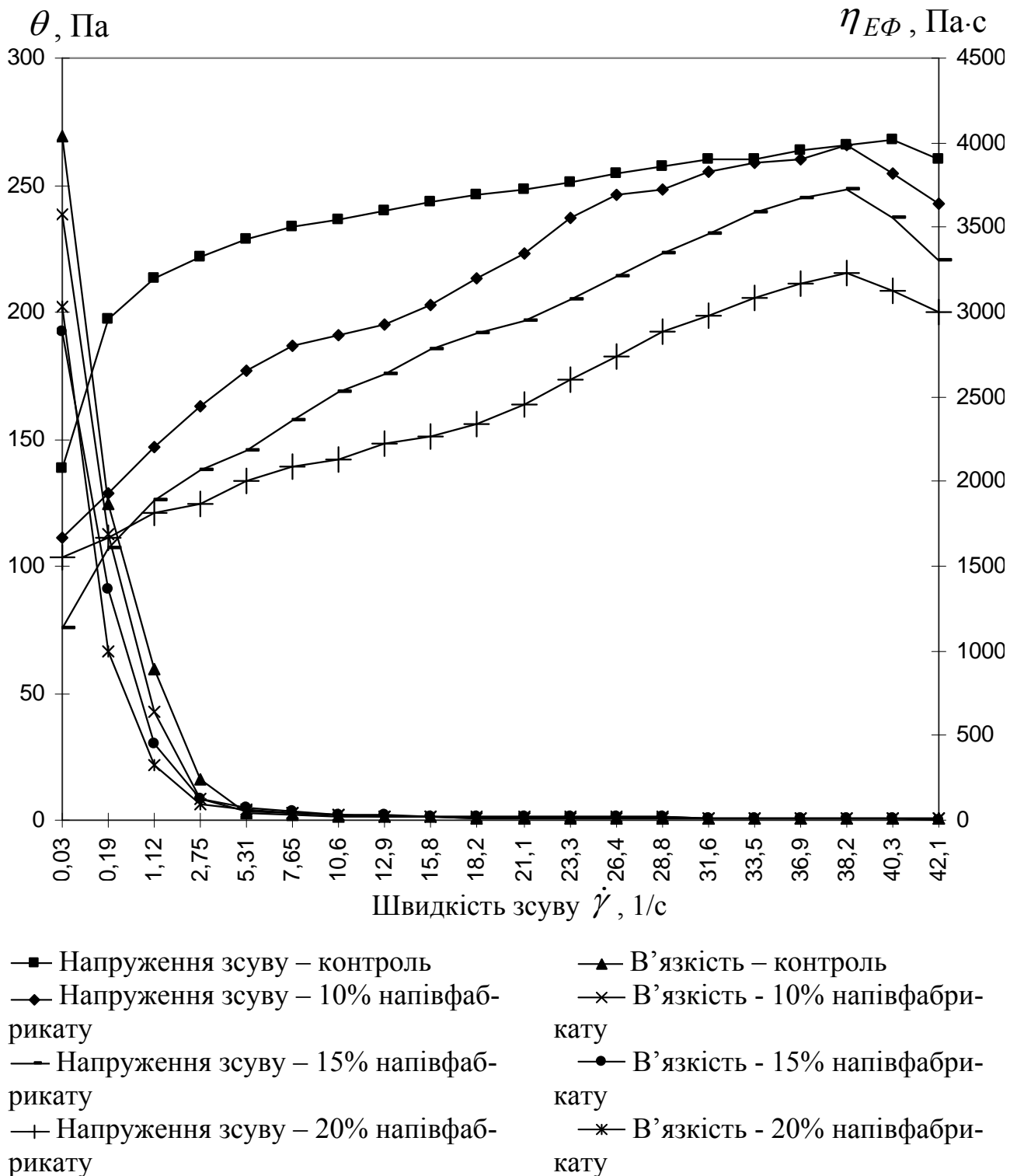


Рисунок 7.16 – Криві течії зразків вершкового крему

Зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість різко зменшується, тобто структура частково руйнується. Дослідні дані показали, що при

підвищенні швидкості значне пониження в'язкості відбувається для всіх зразків до швидкості зсуву $4,5\text{с}^{-1}$. При цьому в'язкість зменшується від 3500–4000Па·с для всіх зразків до $\approx 100\text{Па}\cdot\text{с}$. При змінній швидкості на 15с^{-1} падіння значень в'язкості відбувається на 30-35%.

Подальше збільшення швидкості не викликає значних змінень в'язкості, криві мають ділянки плавного переходу в діапазоні швидкостей до 38с^{-1} при цьому в'язкість зменшується на $\approx 9\%$. При підвищенні швидкості зсуву напруження зсуву для всіх зразків зростає. При швидкості зсуву $\approx 40\text{с}^{-1}$ відбувається повне руйнування структури, ділянки кривих в'язкості стають практично горизонтальними, напруження зсуву різко зменшується.

З кривих течії бачимо, що гранична напруження зсуву для всіх зразків досягається при швидкості зсуву 38с^{-1} . Коливання значень граничного напруження зсуву 200 – 250 Па при таких великих швидкостях свідчить, що додавання білково-рослинного напівфабрикату з молочної сироватки до складу крему вершкового не впливає на його здібність утримувати форму.

Течія всіх зразків, які досліджувалися, описуються законом Бінгама. Рівняння, що описують криві течії зразків, отримані при обробці експериментальних даних, наведені в таблиці 7.21.

Таблиця 7.21 – Рівняння опису кривих течії зразків

Закон течії у загальному вигляді	Тип зразку	Закони течії	Коефіцієнт детермінації
$\theta = \theta_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$	Контрольний зразок	$\theta = 217,88 + 1,28\dot{\gamma}$	$R^2 = 0,878$
	Зміст напівфабрикату 10%	$\theta = 150,58 + 3,60\dot{\gamma}$	$R^2 = 0,866$
	Зміст напівфабрикату 15%	$\theta = 113,93 + 3,38\dot{\gamma}$	$R^2 = 0,912$
	Зміст напівфабрикату 20%	$\theta = 111,37 + 2,97\dot{\gamma}$	$R^2 = 0,947$

Однаковий характер змінення кривих течії та близькі кількісні значення в'язкості та напруження зсуву при відповідних швидкостях зсуву, що додавання білково-рослинного напівфабрикату з молочної сироватки не погіршує структуру готового продукту.

Поверхнево-активні речовини (ПАР), які прискорюють технологічні процеси та поліпшують якість виробів знаходять широке застосування в харчовій промисловості Вивчений вплив ПАР на рео-

логічні властивості шоколадних мас, бісквітного напівфабрикату та кексу, хлібопекарного та макаронного тіста [30].

Розплавлені шоколадні маси проявляють неньютонівську течію, яка досить задовільно описується рівнянням Бінгама, при цьому узгодження між експериментальною кривою течії, отриманій на ротаційному віскозиметрі, та законом течії Бінгама є достатнім для технічних розрахунків тільки у випадку, якщо відношення радіусів віскозиметру не менш ніж 0,85.

Аналіз кривих течії показав, що закон Бінгама не дуже точно відображає поведінку розплавленого шоколаду при його течії. У дійсності за границею текучості спостерігається нелінійна залежність між напруженням та швидкістю зсуву. Кривина кривої течії залежить від властивостей матеріалу. Тобто рівняння Бінгама можна застосовувати не для всієї кривої течії, а тільки для малої її частини [30].

Дослідження п'яти зразків шоколаду в області малих та середніх напружень зсуву показало, що існує лінійна залежність між квадратними коренями з напруження та швидкості зсуву. Результати експериментів показали, що поведінка шоколаду може бути описана рівнянням Кассона в інтервалі змінення температури від 30 до 80⁰С.

Залежність ефективної в'язкості шоколадних мас від вмісту жиру визначалася за допомогою віскозиметру Коха з набором кульок, які падали з різною швидкістю у масі, що досліджувалася. Визначення в'язкості шоколадних мас рекомендується проводити при температурі, яка обирається для кожної маси у залежності від температури її плавлення. Відомо, що темперований шоколад швидко піддається частковому затвердінню, тому в'язкість шоколадної маси визначають при температурі, яка перевищує температуру темперування маси.

Наприклад, в'язкість шоколадної маси на какао-маслі слід визначати при 40⁰С, а глазури на твердому рослинному жирі – при 47⁰С. При цій умові можливе порівняння технологічних властивостей цих глазурей.

Дослідження реологічних властивостей невальцьованої шоколадної маси «Спорт» при температурі 44⁰С дозволяє віднести його до бінгамовського тіла.

Залежність значень θ_0 та η шоколадної маси «Спорт» від тиску наведені у таблиці 7.22.

Дослідження впливу температури на в'язкість шоколадної та жирової глазури і шоколадної маси «Байки Крилова» вели на пневматичному віскозиметрі А1 - ЕВШ у виробничих умовах. Жирність

продуктів, які досліджувалися, знаходилась у межах 0,31-0,36 кг/кг, ступінь подрібнення 92-96%, температура змінювалася від 29 до 65⁰С. Встановлено, що залежність ефективної в'язкості $\eta_{E\Phi}$ (Па·с) від температури маси (⁰С) має вигляд:

Таблиця 7.22 – Залежність значень θ_0 та η шоколадної маси «Спорт» від тиску

$p \cdot 10^{-5}$, Па	$\theta_0 \cdot 10^{-2}$, Па	$\eta \cdot 10^{-2}$, Па·с
0	58	7,20
1	89,5	7,25
3	162	8,55
6	292	16,40
10	440	40,0

$$\eta_{E\Phi} = a + b/T, \quad (7.17)$$

де a , b - емпіричні коефіцієнти.

Для жирової глазури $a = 1,12$, $b = 437,76$; для маси «Байки Крилова» $a = 5,85$, $b = 222,56$; для шоколадної глазури $a = 6,14$, $b = 161,12$.

Температура значно впливає на в'язкість карамельної маси. Залежність в'язкості (Па·с) карамельної маси різної рецептури від температури наведена у таблиці 7.23.

Таблиця 7.23 - Залежність в'язкості (Па·с) карамельної маси різної рецептури від температури

Температура ⁰ С	Вміст патоки, кг на 1 кг продукту					
	0,15	0,25	0,35		0,50	
	Вологість, кг на 1 кг продукту					
	0,0191	0,0184	0,0248	0,0230	0,0319	0,0270
80	11800	17400	12100	30060	2890	35000
90	2020	3030	1563	4820	575	5000
100	439	633	289	881	180	900
110	132	167	88	189	76	190
120	49	58	37	61	48	64

Найменша в'язкість карамельної маси – при температурі 125-130⁰С. При охолодженні маси в'язкість різко зростає, при температурі приблизно 80⁰С швидкість кристалізації стає дорівнювати нулю.

Випробування для напівфабрикату для тістечок «Цукрова трубочка» проводили на віскозиметрі РВ-8 при змінненні наступних параметрів: швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ від 0,5 до 7 с⁻¹, вологість W від 0,318 до 0,40 кг/кг та температурі t від 15 до 30⁰С [30].

Ефективна в'язкість (Па·с) виражається рівнянням:

$$\eta_{E\Phi} = 108,87 - 3,99\dot{\gamma} + 1,13t - 0,032t^2 - 404W + 360W^2. \quad (7.18)$$

Модуль пружності бісквітного напівфабрикату був визначений методом стиску циліндричних зразків між двома плоско паралельними пластинами на пенетрометрі АР 4/1. Залежність модулю пружності напівфабрикату від якості бісквітного тіста наведена у таблиці 7.24.

Таблиця 7.24 - Залежність модулю пружності напівфабрикату від якості бісквітного тіста

Щільність тіста, кг/м ³	Вологість тіста кг/кг	Вологість напівфабрикату, кг/кг	Пористість, %	Модуль пружності $E \cdot 10^{-3}$, Па
664	0,377	0,223	67,5	20,3
549	0,377	0,227	73,5	12,5
476	0,375	0,230	78,5	7,2
454	0,376	0,227	81,0	4,3
418	0,372	0,230	80,0	4,3
405	0,373	0,230	81,5	4,2

З експериментів на приборі Б.А. Ніколаєва для тіста листового на маргарині встановлено, що при підвищенні температури від 14 до 22⁰С понижується пластична в'язкість у 8,5 разів та модуль пружності E - у 2,9 разів [30]. Найбільш різке зміння спостерігається в інтервалі температур від 18 до 22⁰С.

Залежність η (Па·с) та E (Па) від температури t (⁰С) тіста може бути описана рівняннями:

$$\eta = 13,3 - 0,58t; \quad (7.19)$$

$$E = -1,1 + 0,41t - 0,01t^2. \quad (7.20)$$

При збільшенні вологості від 0,277 до 0,445 кг/кг значення η та E знижуються відповідно у 1,2 та 2,3 рази.

Залежності η (Па·с) та E (Па) від вологості W (%) описуються рівняннями:

$$\eta = 59,65 - 253W + 300W^2; \quad (7.21)$$

$$E = 5,48 - 12W. \quad (7.22)$$

Час відлежи тіста також впливає на $\eta_{ПЛ}$: якщо після відлежи протягом 20 хвилин $\eta_{ПЛ}$ знижується на 17,5 %, то за наступні 40 хвилин – тільки на 1,4 %.

Для забезпечення доброї якості готових виробів рекомендовані наступні величини показників: θ_0 - від 4 до 5 кПа, $\eta_{ПЛ}$ - від 0,34 до 0,4 МПа·с, E - від 1,1 до 1,6 кПа.

Залежність θ_0 від температури та вологості цукрового тіста, а також тривалості його витримки після замісу визначали на шарометрі КП-3 (таблиця 7.25).

Таблиця 7.25 - Залежність θ_0 від температури, вологості цукрового тіста та тривалості витримки після замісу

$T, ^\circ\text{C}$	24					25					
$W, \text{кг/кг}$	0,172	0,178	0,216			0,159			0,183		
$\theta_0 \cdot 10^{-3}, \text{Па}$	11,6	10,9	7,9			19,2			9,4		
$T, ^\circ\text{C}$	24					25					
$W, \text{кг/кг}$	0,172					0,159					
Час витримки, хв	0	15	20	25	30	0	10	20	25	30	50
$\theta_0 \cdot 10^{-3}, \text{Па}$	11,6	14,9	16,0	16,5	15,6	19,2	20,2	21,9	22,2	22,2	22,2

Залежність пластичної в'язкості заварного тіста для пряників при тривалості замісу 30 хв від температури наведена у таблиці 7.26. В'язкість цукрового тіста при замісі збільшується (таблиця 7.27).

Таблиця 7.26 – Залежність пластичної в'язкості заварного тіста від температури

Температура, $^\circ\text{C}$	20	30	40
$\eta_{ПЛ} \cdot 10^{-3}, \text{Па}\cdot\text{с}$	550	270	260

Таблиця 7.27 - В'язкість цукрового тіста

Тривалість замісу, хв	6	10	15	20	
$\eta_{ПЛ} \cdot 10^{-3}$ при температурі 30°C , Па·с	«Фантазія»	2,3	2,9	4,3	4,9
	«Українська суміш»	15	16	17	18

Зі збільшенням тривалості замісу зтяжного тіста в'язкість спо-

чатку знижується, а потім різко зростає. В'язкість тіста вологістю 0,25 кг/кг при температурі 40⁰С, виготовленого по рецептурі «Суміш № 12», у залежності від тривалості замісу наведена у таблиці 7.28.

В'язкість зтяжного тіста знижується при збільшенні вологості. Для тіста, яке досліджувалося, (тривалість замісу 30 хв, температура 40⁰С) залежність в'язкості від вологості наведена у таблиці 7.29.

Таблиця 7.28 - В'язкість тіста у залежності від тривалості замісу

Тривалість замісу, хв	10	20	30	40	60	80	90
$\eta_{ПЛ} \cdot 10^{-3}$, Па·с	38	36	26	17	60	69	110

Таблиця 7.29 - В'язкість тіста у залежності від вологості

Вологість тіста	0,231	0,252	0,263
$\eta_{ПЛ} \cdot 10^{-3}$, Па·с	170	47	25

Експериментальне дослідження цукерних та шоколадних мас показало, що їх структурний стан залежить від ступеню механічної обробки [30].

При збиванні пінної та ірисної мас в'язкість протягом тривалості зростає. Змінення в'язкості для мас «Суфле» у залежності від тривалості збивання наведено у таблиці 7.30.

Таблиця 7.30 – В'язкість мас «Суфле»

Тривалість збивання, с	180	210	240	270	300
В'язкість, Па·с	10,34	18,27	30,0	42,5	50

При вимішуванні шоколадної маси значно знижується її в'язкість при малих швидкостях зсуву.

Різниця в значеннях в'язкості маси при вимішуванні протягом 60 - 300 хвилин при швидкості зсуву 6 с⁻¹ складає 60 Па·с. При швидкостях зсуву від 24 до 30 с⁻¹ ця різниця зменшується до 20 Па·с. Структура маси максимально руйнується через 240 - 300 хвилин вимішування.

При виробці сортів цукерок з маси праліне вихідна сировина перетерплює механічну обробку. Умовою цього виробництва є змішування сировини, в результаті якого отримують систему, яка містить від 6 до 9 різних компонентів. У процесі перемішування відбувається рівномірний розподіл інгредієнтів у загальній масі і настає такий стан системи, при якому подальше механічне діяння не приводить до помітних змін складу та фізико – механічних властивостей суміші. Це свідчить про завершення процесу перемішування. Якість готової

маси та її здібність до формування залежать від рівномірного розподілення в неї інгредієнтів. Оскільки структурний стан цукерної маси, яка перемішується, найбільш чітко впливає на її реологічні характеристики, то було запропоновано готовність маси у змішувачах визначати по стабілізації цих властивостей.

Експерименти проводили з масами праліне для цукерок «Колос», «Чародійка» та «Московські». Властивості мас праліне вивчали в умовах чистого зсуву на віскозиметрі типу Ейлера-Ребіндера. Через рівні проміжки часу після початку перемішування одбирали зразки маси і проводили вимірювання за допомогою віскозиметру. Напруження зсуву θ (кПа) та ефективну в'язкість $\eta_{E\Phi}$ (кПа·с) при усталеної течії розраховували за формулами:

$$\theta = P/\pi dl, \quad \eta_{E\Phi} = \theta/\dot{\gamma} \quad (7.23)$$

де P - зусилля зсуву, Н; d - діаметр стержню, м; l - довжина стержню, яка занурена у масу, м; $\dot{\gamma} = V/\Delta h$ - швидкість зсуву с^{-1} ; V - швидкість переміщення стержню, м/с; Δh - зазор між стержнем та внутрішньою стінкою циліндра.

На початку деформації маси праліне мас спостерігали збільшення зусилля, потім починалась усталена течія, і зусилля зменшувалося, при цьому напруження зсуву не змінювалось. Постійність напруження при визначеній швидкості зсуву свідчить, що структура матеріалу повністю зруйнована. Такий характер процесу аналогічний для всіх стадій виготовлення мас праліне на змішувачах.

Лінійна залежність початкових ділянок графіків «напруження – кутова деформація» дозволила визначити модулі зсуву G мас праліне. Дані таблиці 7.31 показують, що при перемішуванні відбувається зменшення G , що викликає зниження опору маси механічним діям. Результати експериментів показали, що тривалість перемішування змінює реологічні показники. Зі збільшенням тривалості перемішування зменшується ефективна в'язкість та напруження зсуву. Так, для маси цукерок «Московські» до перемішування $\eta_{E\Phi} = 280$ кПа·с, $\theta = 12,5$ кПа, а через 120 с після початку процесу $\eta_{E\Phi} = 115$ кПа·с, $\theta = 5,5$ кПа, тобто зменшилися більш ніж у 2 рази.

Таке падіння значень обумовлене тим, що, по перше, маси пра-

Таблиця 7.31 – Залежність модуля зсуву, ефективної в'язкості та напруження зсуву від тривалості перемішування цукерної маси

Тривалість перемішування, с	Маса для цукерок		
	«Колос»	«Московські»	«Чародійка»
Модуль пружності при зсуві, кПа			
0	52,5	16,5	3,9
60	6,0	5,7	3,1
120	-	4,2	2,5
150	5,0	3,0	-
Ефективна в'язкість, кПа·с			
0	265,0	280	265
60	77,0	175	145
120	62,8	115	105
150	31,2	113	73
180	38,0	100	74
240	38,0	98	68
Напруження зсуву, кПа			
0	10,50	12,5	10,8
60	2,00	7,7	6,2
120	1,90	5,5	4,8
150	1,88	5,8	3,7
180	1,00	5,4	3,8
240	1,00	5,3	3,4

ліне відносяться до тіл, для яких характерне руйнування структури, що веде з протягом часу до зменшення η_{EF} та θ ; по друге, при перемішуванні до маси додається невелика кількість рідких інгредієнтів, які в процесі механічної обробки маси оказують вплив на величину в'язкості та напруження зсуву.

Таким чином, стабілізація реологічних властивостей мас праліне вказує на завершення процесу перемішування та їх готовність.

Тривалість перемішування це час, протягом якого матеріал

набуває стійкі реологічні властивості. Для мас праліне - 240 -360 с.

Були проведені дослідження змінення реологічних характеристик у процесі механічної обробки яєчно-цукрової суміші; білково-цукрової суміші; збитого білка для тіста «Буше»; білкового та вершкового кремів [23]. На рисунках 7.17 – 7.20 наведений характер змінення параметрів сумішей.

У білково-цукрових та яєчно-цукрових сумішей протягом процесу зростає об'ємна доля повітряної фази, що веде до зменшення щільності ρ . Ефективна в'язкість та граничне напруження зсуву безперервно зростають. На початкової ділянці всі характеристики змінюються значно. Протягом часу змінення величин уповільнюється і в кінці процесу спостерігається стабілізація реологічних параметрів.

При виробництві крему «Білкового» збивається чистий білок до максимального насичення повітрям, після чого вливається гарячий (180-200 °С) цукровий сироп, що веде до різкого збільшення при пе-

ремішуванні ρ , $\eta_{E\Phi}$, θ_0 .

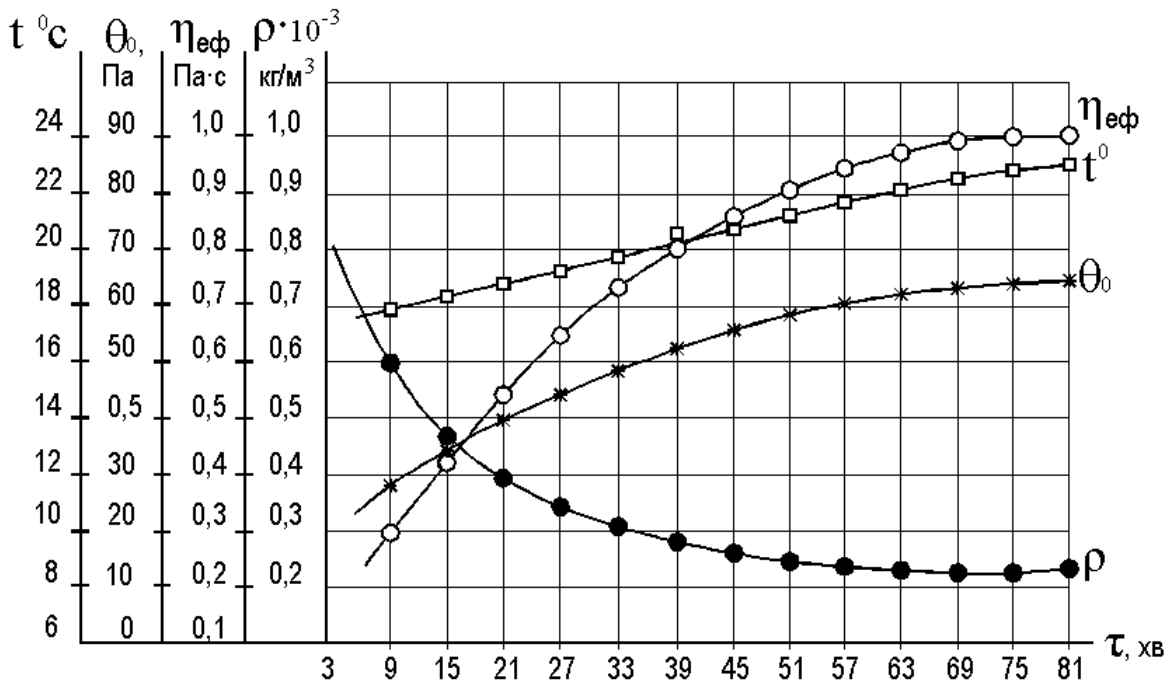


Рисунок 7.17 – Зміння параметрів у процесі збивання яєчно-цукрової суміші

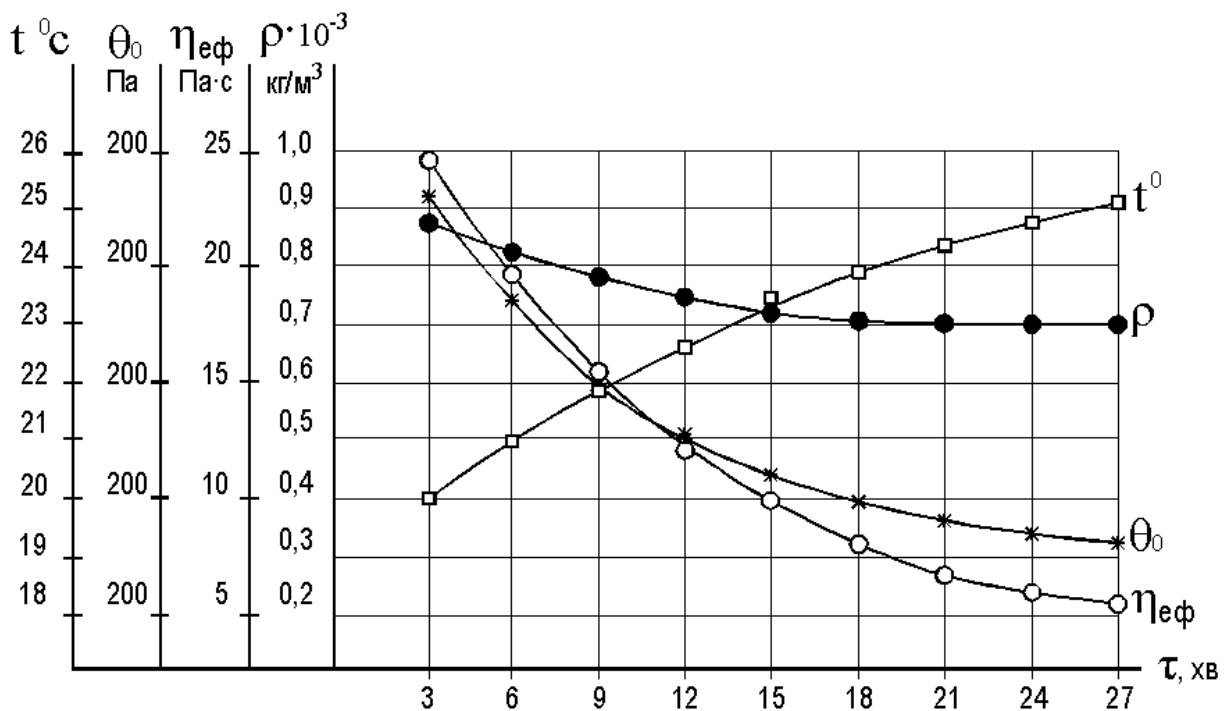


Рисунок 7.18 – Зміння параметрів у процесі збивання крему «Новий»

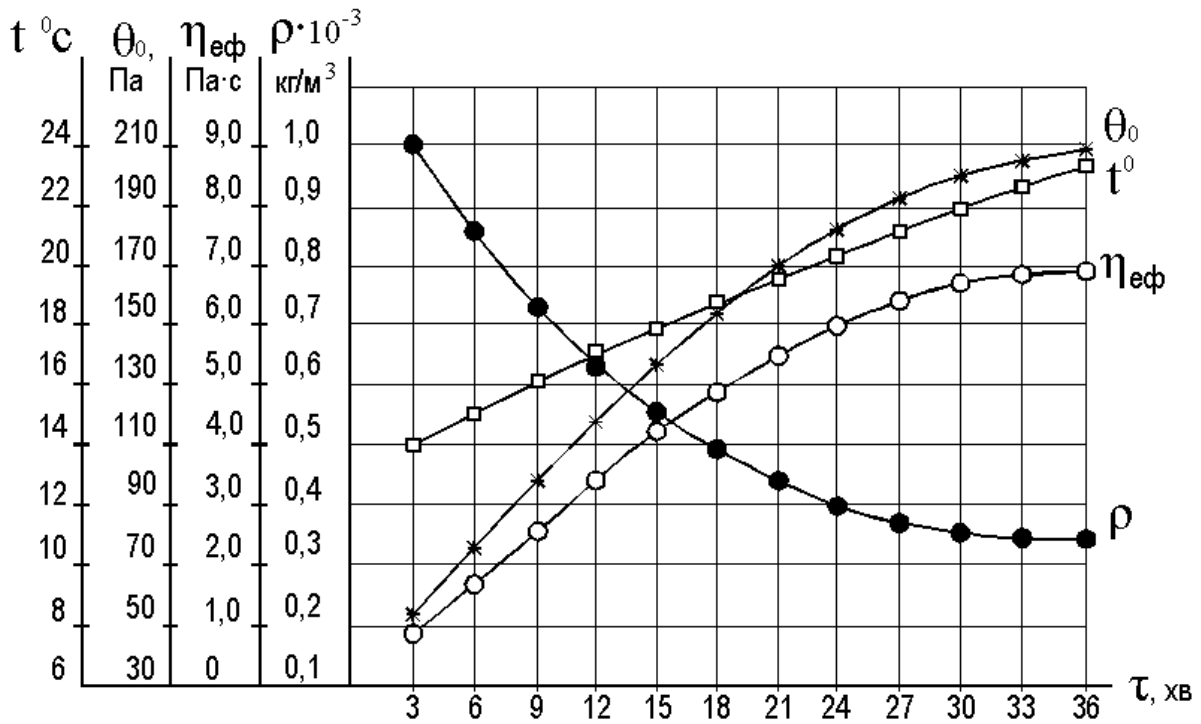


Рисунок 7.19 – Змінення параметрів у процесі збивання білково-цукрової суміші

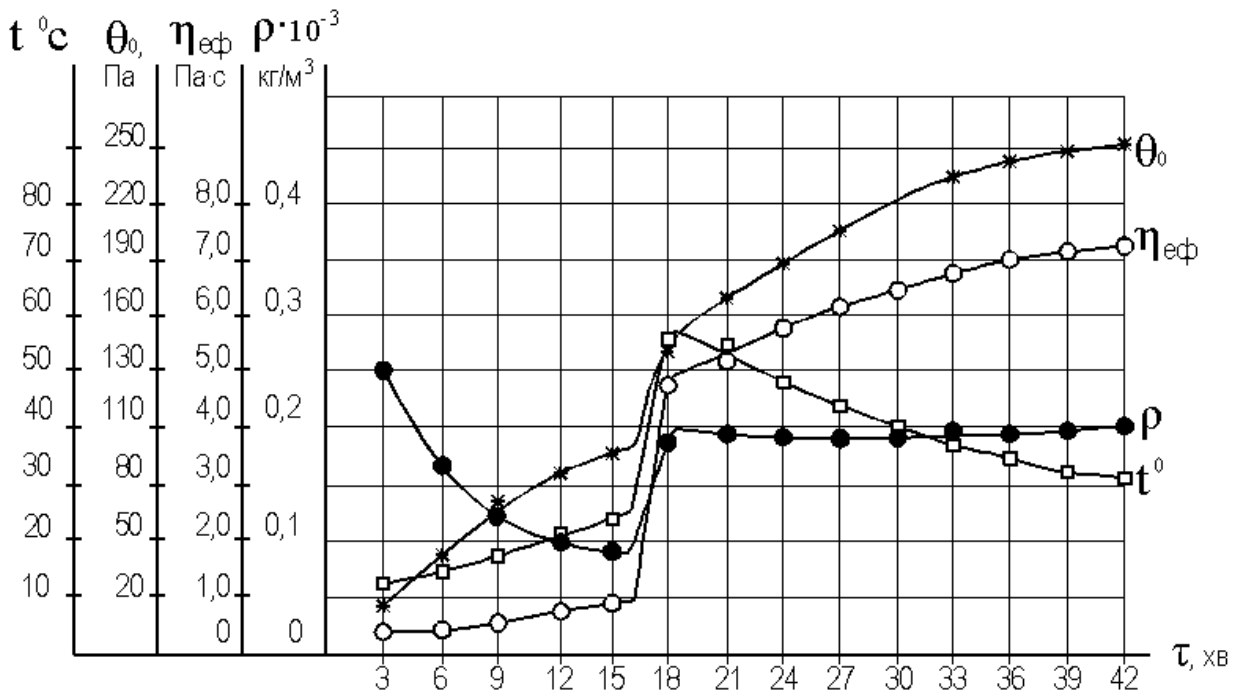


Рисунок 7.20 – Змінення параметрів у процесі збивання крему «Білкового»

У подальшому об'ємна доля повітряної фази, а внаслідок цього і

щільність залишаються практично незмінними. Величини η_{EF} та θ_0 зростають, досягаючи у кінці процесу оптимальних значень.

Для білково-цукрових та яєчно-цукрових сумішей протягом процесу зростає об'ємна доля повітряної фази, що веде до зменшення щільності ρ . Ефективна в'язкість та граничне напруження зсуву також зростають. На початковій ділянці всі характеристики змінюються значно. Протягом часу змінення величин уповільнюється і в кінці процесу спостерігається стабілізація реологічних параметрів.

При виробництві крему «Білкового» збивається чистий білок до максимального насичення повітрям, після чого вливається гарячий (180-200 °С) цукровий сироп, що веде до різкого збільшення при перемішуванні ρ , η_{EF} , θ_0 . У подальшому об'ємна доля повітряної фази, а внаслідок цього і щільність залишаються практично незмінними. Величини η_{EF} та θ_0 монотонно зростають, досягаючи у кінці процесу оптимальних значень.

У процесі приготування крему «Нового» (вершкового) значення щільності, ефективної в'язкості та граничного напруження зсуву зменшуються, оскільки він володіє високою щільністю, малою об'ємною концентрацією повітря, незначною термічною стійкістю.

У результаті проведених досліджень були отримані реологічні характеристики збитих сумішей у момент готовності (таблиця 7.32).

Таблиця 7.32 - Реологічні характеристики збитих сумішей у момент готовності

Вид напівфабрикату	Температура t , °С	Щільність ρ , кг/м ³	Ефективна в'язкість η_{EF} , Па·с	Граничне напруження зсуву θ_0 , Па
Білково-цукрова суміш 1:2,2	23	347	6,79	209,8
Яєчно-цукрова 2:1	23	230	1,08	64,8
Крем «Білковий»	32	203	7,23	251,1
Крем «Новий»	25	693	5,38	262,2

Вивчали змінення граничного напруження зсуву тіста вологістю 0,28-0,29 кг/кг, виробленого по рецептурам «Столове» та «Молодість», на різних стадіях виготовлення: при замісі, вилежуванні, прокатці та формуванні (таблиця 7.33) [30].

Оптимальні реологічні властивості досягаються при замісі протягом 30-40 хвилин, θ_0 стає дорівнювати 1540-1720 Па. Мінімальне

значення θ_0 досягається після двох годин вилежування. Механічний вплив на тісто веде до зниження його напруження зсуву.

Таблиця 7.33 – Залежність θ_0 від тривалості замісу, тривалості вилежування, прокатці та формування

Тривалість замісу, хв.	Столовий	Молодість	Тривалість вилежування, хв	Столовий	Молодість	Стадії розділки	Столовий	Молодість
10	4190	3860	30	1150	990	Реверсивне вальцювання	7200	6120
20	2410	2390	60	980	850			
30	1720	1640	90	870	800	Прокатка	6340	5080
40	1680	1540	120	800	740			
50	1280	1160	150	850	750	Формування	5150	4830
60	1120	1070	180	990	810			

Таблиця 7.34 – Залежність ефективної в'язкості $\eta_{E\Phi} \cdot 10^{-3}$ (Па·с) молочної помади при температурі 50°C від частоти та амплітуди періодичної деформації

Частота, Гц	Амплітуда періодичної деформації				
	6	10	13	20	26
1	11	5,5	2,9	2,5	1,6
3	5,2	3,4	1,95	1,35	0,95
5	3,6	2,4	1,45	0,95	0,73
10	3,35	1,5	0,96	0,65	0,48
15	1,85	1,15	0,74	0,49	0,37
20	1,6	0,92	0,6	0,4	0,29
25	1,4	0,74	0,5	0,34	0,25
30	1,25	0,62	0,42	0,29	0,22

Проводили дослідження цукерних мас при наявності вібрації [30]. Характерні для цукерних мас дані залежності ефективної в'язкості від частоти f та амплітуди періодичної деформації γ_0 , яку визначали як відношення амплітуди зміщення зовнішнього циліндру до зазору між циліндрами віскозиметру, наведені у таблиці 7.34. Спостерігається значне, у границях двох-трьох десятинних порядків, зниження в'язкості.

Амплітуда та частота практично у рівному ступені діють на процес, тому ефективність процесу визначали максимальною амплітудою швидкості періодичної деформації ($\dot{\gamma}_{\max}$), пов'язаної з параметрами коливань співвідношенням:

$$\dot{\gamma}_{\max} = 2\pi f\gamma_0, \quad (7.24)$$

де f - частота, Гц; γ_0 - амплітуда деформації.

Таблиця 7.35 – Значення коефіцієнтів рівняння (7.25) для цукерних мас

Цукерна маса		Температура, °C	a	b
«Кара-Кум»		34	1195	-0,901
«Батончики»		34	5240	-0,914
Помада	Цукрова	40	3256	-0,638
	Молочна	50	1305	-0,725
	Крем-брюле	40	948	-0,594

Залежність ефективної в'язкості від максимальної амплітуди швидкості періодичної деформації може бути виражена степеневим рівнянням:

$$\eta_{E\Phi} = a\dot{\gamma}_{\max}^b, \quad (7.25)$$

де a, b - емпіричні коефіцієнти, які наведені у таблиці 7.35.

$$\left(\theta^{\frac{1}{a}} - \theta_0^{\frac{1}{a}} \right)^b = \eta \dot{\gamma},$$

де $a=b=2$, а маса «Трюфелі» - рівнянням Оствальда $\theta = B_1^* \dot{\gamma}^n$.

Емпіричні коефіцієнти рівнянь наведені у таблицях 7.36 та 7.37.

Таблиця 7.36 – Значення коефіцієнтів рівняння Кассона при течії шоколадної маси без вібрації та з вібрацією ($f=25$ Гц, $\gamma_0=0,12$)

Температура маси, °C	Режим течії			
	Без вібрації		З вібрацією	
	$\sqrt{\theta_0}$	$\sqrt{\eta_K}$	$\sqrt{\theta_0}$	$\sqrt{\eta_K}$
30	2,56	1,65	-0,604	1,94
34	2,54	1,50	-0,323	1,76
38	2,64	1,37	-0,460	1,64

Таблиця 7.37 – Значення коефіцієнтів рівняння Оствальда при течії маси «Трюфелі» без вібрації та з вібрацією ($f=24$ Гц, $\gamma_0=0,12$)

Температура маси, °C	Режим течії			
	Без вібрації		З вібрацією	
	B_1^*	n	B_1^*	n
28	268	0,391	148	0,414
30	182	0,358	94	0,427
32	62	0,428	9	0,785

Питання для самоконтролю

1. Від яких факторів в першу чергу залежать структурно – механічні характеристики кондитерських продуктів?

2. Якими показниками характеризується ламінарна пластично – в'язка течія мас праліне?
3. Як змінюється в'язкість у залежності від границь змінення швидкості для цукерних мас?
4. Що відбувається зі структурою маси при досягненні найменшого значення ефективною в'язкості?
5. Як змінюються граничне напруження зсуву та пластична в'язкість у залежності від змінення температури та вологості суміші?
6. Якими фізичними характеристиками визначається ефективність діяння вібрації на цукерні маси?
7. Який вплив оказує тиск на змінення реологічних показників мас праліне?
8. Якими рівняннями можна описувати криві течії кондитерських мас?
9. Який вплив білково-рослинного напівфабрикату з молочної сироватки на реологічні характеристики самбуків?
10. Чому реологічні дослідження мають особливе значення при отриманні нових продуктів?
11. Яку роль мають реологічні дослідження для забезпечення доброї якості готових виробів?
12. Який вплив має тривалість збивання або перемішування пінних кондитерських мас на їх фізико – механічні властивості?
13. Як визначається момент готовності збитих сумішей за їх реологічними характеристиками?

7.2 Тиксотропні властивості кондитерських виробів

При проектуванні обладнання для переробки та транспортування харчових мас необхідно як можна більш повно знати їх реологічні властивості, у тому числі тиксотропні.

Відомо декілька методів дослідження тиксотропних властивостей дисперсних систем. За методом Грін-Вельтмана розраховується пластична в'язкість до та після руйнування структури. Їх співвідношення є характеристикою процесів утворення структури. Метод Павловського базується на вимірюванні змінення в'язкості при постійній швидкості обертання віскозиметру. Цим методом визначається тільки частина тиксотропних властивостей. Метод Дохерті - Харда базується на вимірюваннях при мінімальній та максимальній швидкостях, при тому прийнято, що структура матеріалу в першому випадку не зруй-

нована, а у другому повністю зруйнована. Час спокою збільшується від вимірювання до вимірювання, і максимальне напруження розраховується як функція часу спокою. Метод граничної швидкості по Остерлею базується на тому, що може наступити стан рівноваги між механічними силами руйнування та специфічними силами відновлення структури. При вимірюваннях повністю руйнують структуру речовини, яка досліджується, та залишають її в спокої до тих пір, доки не відновиться структура. Потім ступенями підвищують швидкість до такого значення, при якому руйнування та відновлення структури досягають рівноваги.

Вивчена тиксотропія мас праліне, ірисної маси, цукрово – патошно – молочного сиропу та молочної помади, емульсій для цукрового та зтяжного печива, рахат – лукумною та трюфельною мас, какао тертого [30]. Тиксотропні властивості вивчали на віскозиметрі РВ-8 за методом гістерезисних петель. Кожну точку як прямого так і оборотного ходу петлі отримували при однократному замірі швидкості обертання внутрішнього циліндру віскозиметру при усталеному його русі. Дослідження тиксотропних властивостей цукерних мас було проведене з ціллю більш повного вивчення їх поведінки при зсуві та ступені процесів утворення структури; визначення впливу температури на тиксотропію мас праліне; визначення інтервалу швидкостей зсуву, в якому проявляються тиксотропні властивості; виявлення особливостей тиксотропного відновлення структури мас.

За результатами експериментів отримані криві течії при фіксованій частоті та амплітуді періодичної деформації. Криві течії маси цукерок «Чародійка» (жирність 0,31 кг/кг, вологість 0,031 кг/кг), отримані на приборі РВ-8, наведені на рисунку 7.21.

З кривих течії маси для цукерок «Чародійка» (жирність 31,8%, вологість 2,4%), наведених на рисунку 7.22, бачимо, що тиксотропні властивості мас праліне починають проявлятися при швидкостях зсуву вище $0,5 \cdot 10^{-1} \text{ c}^{-1}$. Ширина гістерезисної петлі кривих течії зменшується зі збільшенням температури, а при температурі порядку 40°C криві прямого та оборотного ходу практично співпадають (крива 3).

Інтерес представляє змінення в'язкості при збільшенні швидкості зсуву та тиксотропному руйнуванні структури.

На рисунку 7.22 наведені криві в'язкості маси цукерок «Маска» (жирність 32,1%, вологість 2,2%). З них бачимо, що в інтервалі швидкості зсуву, який досліджувався, ефективна в'язкість змінюється у 10-15 разів.

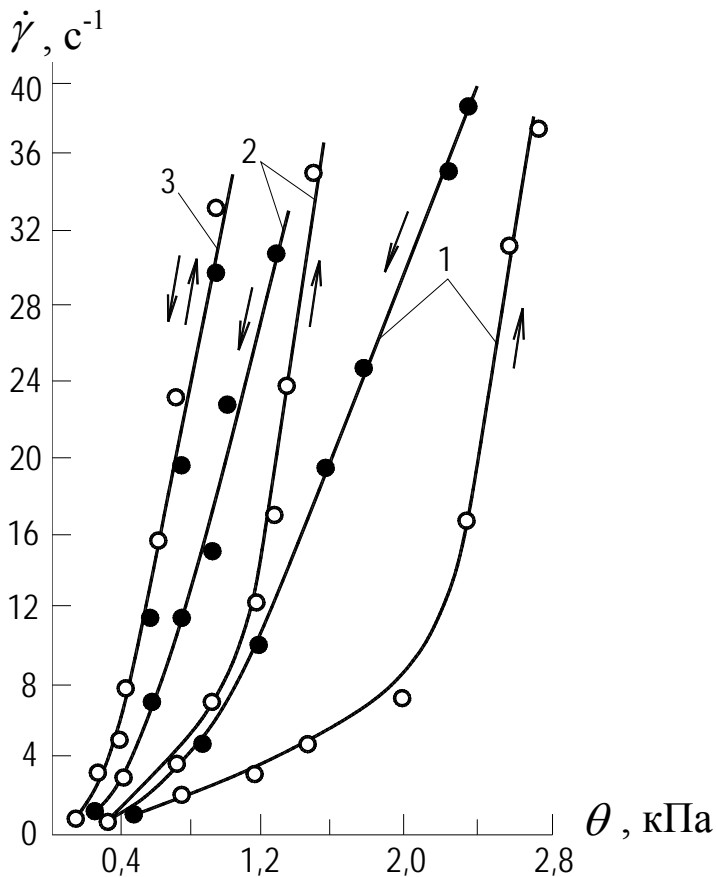


Рисунок 7.21 - Криві течії маси для цукерок «Чародійка» при температурі ($^{\circ}\text{C}$):

1 – 28; 2 – 33; 3 – 40

костей зсуву, тобто точки прямого та оборотного ходу не знаходилися на одній кривій [30]. Тобто, маси праліне володіють специфічними тиксотропними властивостями, часткове відновлення структури після припинення навантаження відбувається за час, який менш проміжку часу між двома сусідніми дослідженнями.

У якості критерію тиксотропії запропонований коефіцієнт, який дорівнює відношенню в'язкості при одній і тій же швидкості зсуву, але у двох станах – при зростанні та зменшенні навантаження: $\xi = \eta'_{E\Phi} / \eta''_{E\Phi}$.

Аналіз показав, що у значному інтервалі швидкостей зсуву це відношення змінюється незначно, зменшуючись на початку та при кінці петлі (таблиця 7.38).

Коефіцієнт тиксотропності ξ характеризує ступінь інтенсивності структуроутворення при зміні температури, зменшаючись до 1 з

При значних швидкостях зсуву ефективна в'язкість стає постійною, що відповідає в'язкості гранично зруйнованої структури. Швидкість зсуву, при якій настає повне руйнування структури, приблизно постійна для більшості мас та дорівнює $30-60 \text{ s}^{-1}$ (у залежності від температури). Значення ефективної в'язкості є функцією температури, типу маси та розмірів дисперсних часток.

У дослідженнях з масами праліне при багатократному повторенні експериментів не спостерігалось повного руйнування структури у всьому діапазоні швид-

підвищенням температури та разом з тим залишаючись стабільним при постійній температурі. При температурі 40⁰ С криві залежності

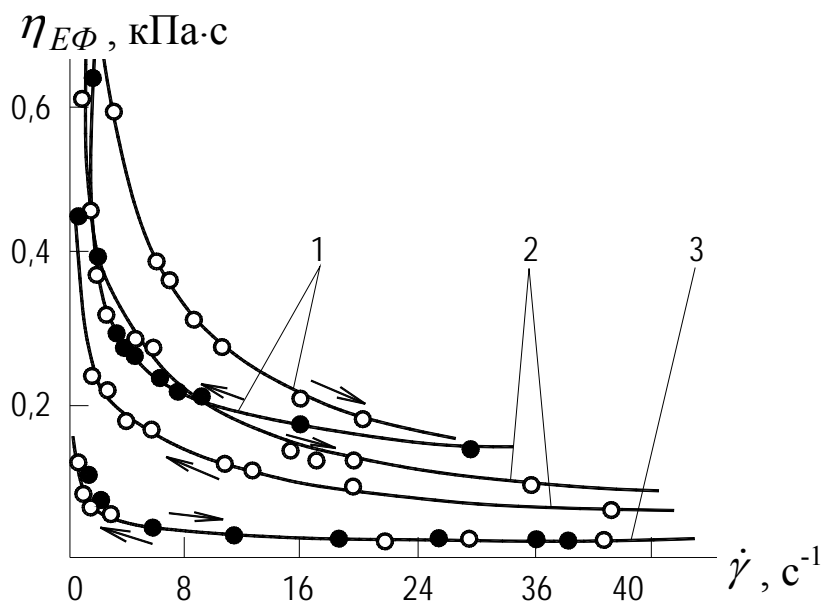


Рисунок 7.22 – Залежність ефективної в'язкості маси для цукерок «Маска» від швидкості зсуву при температурі (°С): 1 – 28; 2 – 30; 3 – 40

в'язкості при прямому та зворотному ході співпадають, що свідчить про зневажено малої тиксотропності даних мас при цієї температурі.

З мас праліне, які досліджувалися, найбільше значення коефіцієнту ξ спостерігається у маси для цукерок «Чудесниця», він дорівнює 1,9 при швидкостях зсуву 8 с⁻¹.

Значний практичний та теоретичний інтерес представляє з'ясування часу

відновлення структури мас праліне після повного її зруйнування.

Таблиця 7.38 – Залежність коефіцієнта тиксотропності ξ від температури маси та швидкості зсуву

Температура, °С	Швидкість зсуву, с ⁻¹										
	1	3	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
Маса для цукерок «Маска»											
26	-	1,53	1,49	1,46	1,39	1,29	1,21	1,09	-	-	-
35	1,72	1,58	1,51	1,53	1,51	1,41	1,37	1,32	1,18	1,15	1,11
37	1,77	1,68	1,64	1,54	1,48	1,50	1,48	1,48	1,48	1,37	1,25
Маса для цукерок «Чародійка»											
28	1,49	1,77	1,87	1,89	1,82	1,77	1,66	1,52	1,45	1,40	1,22
33	1,18	1,30	1,40	1,51	1,58	1,60	1,53	1,39	1,25	1,21	1,17
37	1,09	1,10	1,09	1,09	1,08	-	-	-	-	-	-

Проведена серія дослідів дозволила зробити висновок, що значна частина тиксотропного відновлення структури відбувається за від-

носно невеликий проміжок часу – 10-15 хвилин, при тому цей час тим більше, чим вище температура. Після тривалого часу (12-14 годин) в'язкість маси досягала первісного значення або у деяких випадках декілька перевищувала його. Цей ефект пояснюється явищами зміцнення структури цих мас з часом.

Дослідження довели, що у процесах, які відбуваються у течії тривалого часу з відносно невеликою швидкістю (наприклад, при транспортуванні мас по трубах), тиксотропний процес не буде грати важливої ролі. У процесах, які відбуваються швидко (формування цукерок), коли структура маси зазнає значні зсуви та не встигає відновлюватися, необхідно враховувати тиксотропні властивості.

Випробування цукерної маси для трюфелів «Екстра» дозволили встановити, що цієї масі притаманні тиксотропні властивості, коефіцієнт тиксотропності складає 1,2-1,4 [30].

Було проведене дослідження тиксотропних властивостей маси рахат – лукум двома способами: безперервним зростаючим руйнуванням структури навантаженням, яке зростає, та по відновленню зруйнованої структури. Експерименти проводилися з масою вологістю 18%, при температурі 95⁰С. Аналіз кривих змінення в'язкості як функції часу показав, що часткове тиксотропне відновлення структури маси спостерігається при змінній швидкості зсуву від 1 до 22 с⁻¹, при більш високих швидкостях – від 22 до 60 с⁻¹ – зруйнована структура не відновлюється.

Після витримки деформованої маси протягом 30, 60, 90 хвилин зруйнована структура також не відновлювалася.

Тиксотропні властивості цукерних мас, які містять помаду, визначалися методом гістерезисних петель при тиску та температурі формування.

Значення коефіцієнту тиксотропності для деяких в'язко – пластичних цукерних мас. Дані, наведені у таблиці 7.39, показують, що зі збільшенням тиску та швидкості зсуву при постійній температурі коефіцієнт тиксотропності зменшується.

Таким чином, як показав аналіз експериментальних даних, при формуванні пресуванням зруйнована структура встигає відновлюватися, цьому сприяє тиск у камері. Тому при розрахунку процесу формування тиксотропними явищами можна зневажити.

Коефіцієнт тиксотропності грильжної маси не перевищує 1,5; тиксотропне відновлення структури відбувається за 30-40 хвилин.

Таблиця 7.39 - Залежність коефіцієнту тиксотропності від тиску та швидкості зсуву

Тиск, кПа	Швидкість зсуву, с ⁻¹						
	3	5	10	20	30	40	50
Маса для цукерок «Руський узор» при 28 ⁰ С							
0	-	1,70	1,54	1,38	1,27	1,20	1,12
294	1,15	1,13	1,10	1,06	1,05	1,03	-
490	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	-	-
Маса для цукерок «Космічні» при 25 ⁰ С							
0	1,45	1,34	1,24	1,11	1,08	1,05	1,04
98	1,16	1,14	1,12	1,09	1,08	1,03	1,02
294	1,08	1,08	1,05	1,04	1,03	-	-
Маса для цукерок «Мокко» при 45 ⁰ С							
0	2,33	2,07	1,73	1,44	1,23	1,12	1,04

Питання для самоконтролю

1. Які існують методи дослідження тиксотропних властивостей дисперсних систем?

2. Який вплив має температура на тиксотропні властивості цукерних мас?

3. Як змінюється в'язкість цукерних мас при збільшенні швидкості зсуву та тиксотропному руйнуванні структури?

4. Який коефіцієнт запропонований у якості критерію тиксотропії мас праліне; що він характеризує?

5. У яких процесах отримання цукерок необхідно враховувати тиксотропні властивості, а в яких не треба?

7.3 Компресійні характеристики та характеристики міцності, щільність кондитерських продуктів

Визначення структурно – механічних властивостей мас праліне проводили на удосконаленому шарометрі Д. М. Толстого з пластиною, яка паралельно зміщується [30]. За допомогою шарометру визначали константи пружно – пластично – в'язких властивостей мас з практично незруйнованою структурою, найбільш повно оцінюючих їх технологічні властивості: модуль швидкої еластичної деформації зсуву G_1 (Па), модуль повільної еластичної деформації G_2 (Па), найбільшу пластичну в'язкість η_1 (Па·с) та умовну статичну границю текучості θ_{k1} . Ці константи матеріалу розраховані за формулами:

$$G_1 = \theta a / \varepsilon_0 ; \quad G_2 = \theta a / (\varepsilon_m - \varepsilon_0) ; \quad \eta_1 = (\theta - \theta_{k1}) / \dot{\gamma} , \quad (7.26)$$

де $\theta = Pg/F$ - напруження зсуву, Па; P - навантаження, Н; F - площа пластин, м²; a - товщина шару маси; ε_0 - початкова (умовно – миттєва) деформація, м; ε_m - еластична деформація, м; $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву с⁻¹.

Масу для цукерок «Парус» протягом випробувань брали з виробничої лінії після формуючої машини.

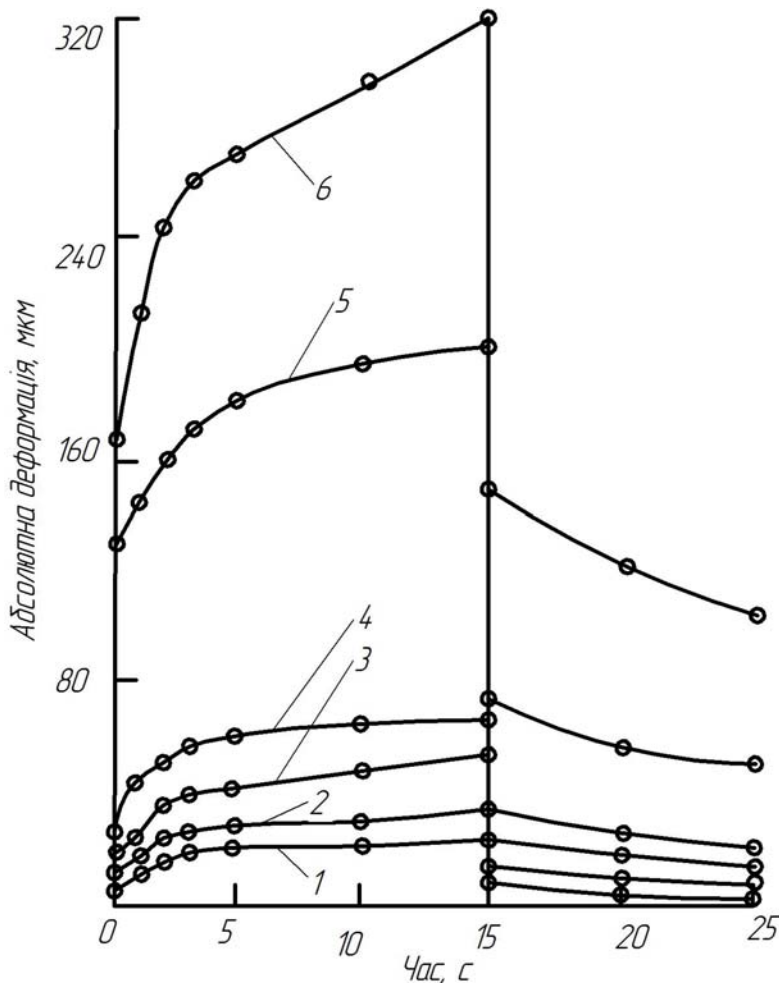


Рисунок 7.24 – Криві кінетики деформації зсуву маси праліне при температурі 13⁰С та напруження (кПа):

- 1 – 30; 2 – 35; 3 – 40; 4 – 45;
5 – 50; 6 – 55.

$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\theta)$ як відрізок, що відсікається прямою на осі θ .

Таким чином, результати випробувань показали, що основні

Експеримент проводили при температурі маси 7, 10, 13, 18, 25 та 27⁰С. При цій температурі на практиці відбувається різання джгутів цукерних мас.

За результатами дослідів отримані криві деформація – час, які наведені на рисунку 7.24.

Після розрахунку величин θ , ε_0 , ε_m та $\dot{\gamma}$ для всіх навантажень будували графіки залежностей:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_0(\theta), \quad \dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\theta)$$

$$(\varepsilon_m - \varepsilon_0) = (\varepsilon_m - \varepsilon_0)(\theta),$$

та за формулами (7.26) знаходили G_1 , G_2 та η_1 (таблиця 7.40).

Умовну статичну границю текучості $\theta_{к1}$ визначали з графіку

пружно – пластично – в’язкі характеристики мас праліне значно знижуються з підвищенням температури.

Таблиця 7.40 – Залежність констант пружно – пластично – в’язких властивостей мас праліне від температури

Константа	Температура, °C					
	7	10	13	18	25	27
G_1 , МПа	51	23	16	8	1,3	1
G_2 , МПа	40	15	9	3	1,2	0,9
$\eta_1 \cdot 10^{-9}$, Па·с	54	32	24	12	3,0	2,5

Процес стиску харчових мас у замкнутому об’ємі поділяється на два етапи: перший супроводжується інтенсивним виділенням повітря та значним стиском маси при невеликих тисках; у другому стиск здійснюється в основному за ра-

хунок пластичної деформації маси.

Залежність маси праліне від тиску визначається рівнянням:

$$\rho = \rho_0 + a(p \cdot 10^{-6})^b, \quad (7.27)$$

де ρ - щільність маси, кг/м³; p - тиск формування, Па; ρ_0 - щільність маси при атмосферному тиску, кг/м³ (для мас праліне $\rho_0=1190$ кг/м³); a , b - емпіричні коефіцієнти.

При надлишковому тиску від 0 до $1,5 \cdot 10^5$ Па $a=13,5$ та $b=0,728$; при тиску від $1,5 \cdot 10^5$ Па до $20 \cdot 10^5$ Па $a=14$ та $b=0,242$. Значення коефіцієнтів залишаються постійними при зміні температури від 28 до 44⁰С. Для маси цукерок «Руський узор» при температурі 29⁰С $\rho_0=1120$ кг/м³, $a=30,35$ та $b=0,15$; при температурі 30⁰С $\rho_0=1075$ кг/м³, $a=33,75$ та $b=0,15$.

Широке застосування при опису кривих пресування (залежність щільності від тиску) різноманітних за реологічною природою харчових матеріалів від сипучих до в’язко – пластичних, знайшло рівняння:

$$\rho = \rho_{ГР} - K_0 e^{-\alpha p} / \alpha, \quad (7.28)$$

де ρ - щільність матеріалу, кг/м³; $\rho_{ГР}$ - умовна гранична щільність, кг/м³; K_0 - коефіцієнт пресування, кг/Па·м³; α - коефіцієнт втрати стисливості, Па⁻¹; p - тиск пресування, Па.

Таблиця 7.41 – Значення коефіцієнтів до рівняння (7.28)

Цукерна маса	$\rho_{ГР},$ кг/м ³	$\alpha \cdot 10^5,$ Па ⁻¹	$K_0 \cdot 10^6,$ кг/Па·м ³
«Вершкова помадка»	1303	5,64	282
«Халва»	1216	5,09	794
«Грюфель Екстра»	1200	3,71	605
«Грюфель»	1265	4,48	319

Міцність карамелі характеризували тимчасовим опором, який знаходили як відношення навантаження, що руйнує, до початкового середнього перерізу зразку.

Таблиця 7.42 – Залежність тимчасового опору карамелі при температурі 23-25⁰С від вмісту фруктово – ягідної начинки

Вміст начинки, %	Оболонка		Начинка		Тимчасовий опір (кПа) при довірчій імовірності 0,9
	Вологість, %	Редуковані речовини, %	Вологість, %	Редуковані речовини, %	
26	2,1	23,0	17,7	61,8	598,4 ± 284,5
31	1,9	21,5	17,7	61,8	313,9 ± 196,2
32	2,2	21,0	17,8	61,8	245,2 ± 88,3
35	1,5	23,5	18,9	60,5	157,0 ± 88,3

Таблиця 7.43 – Тимчасовий опір карамелі

Вміст начинки, %	29	31	33
Тимчасовий опір $\sigma_T \cdot 10^{-3}$ (Па) при температурі начинки, ⁰ С			
24	422	314	206
39	265	137	98

Рівнянням (7.28) були описані криві пресування помадних, вершкових мас та маси халви (таблиця 7.41).

Міцність карамелі при статичному стиску визначали на випробувальній машині МР-0,5 з термокамерою при температурі від 25 до 45⁰С [25].

Міцність залежить головним чином від виду начинки, її процентного вмісту в карамелі, температури виробів. У таблицях 7.42 та 7.43 наведені значення тимчасового опору карамелі у залежності від температури та вмісту фруктово – ягідної начинки.

Міцність карамелі не змінюється при температурі начинки нижче 25⁰С, при цьому карамель вважається повністю охолодженою. Карамель з фруктово – ягідною начинкою має міцність на 25 % нижче міцності з шоколадно – горіховими начинками.

Ці дані необхідні при конструюванні машин для загортання, оскільки тиск з боку захватів не повинен перевищувати тимчасовий опір карамелі.

Характеристикою міцності цукерок прийняте граничне зусилля, яке витримує виріб протягом визначеного часу при навантаженні на задану поверхню без порушення його товарного вигляду (без тріщин, вм'ятин). У якості ще однієї характеристики була введена величина «граничної деформації руйнування», тобто величина деформації виробу в напрямку дії зусилля в момент початку його руйнування.

Таблиця 7.44 – Характеристики міцності цукерок при статичному навантаженні

Сорт цукерок	Поверхня навантаження	$[\sigma_y]$, МПа·с	Δ , мм
«Пілот»	Верхня	1,60	0,37
	Торцева	0,80	0,44
«Мокко»	Верхня	1,98	0,20
	Торцева	1,71	0,32
«Красний мак»	Верхня	0,74	0,17
	Торцева	0,86	0,38
«Чародійка»	Верхня	3,68	0,17
	Торцева	3,52	0,26

При статичному навантаженні були визначенні умовна міцність виробів $[\sigma_y]$ та гранична деформація Δ цукерок, які наведені у таблиці 7.44. Для одного і того ж виробу характеристики міцності змінюються у широкому діапазоні, що пояснюється

нестабільністю механічних властивостей виробів.

Для характеристики деформаційних властивостей виробів при динамічному прикладенні навантаження введено поняття коефіцієнтів «деформаційності» та «відновленості».

Коефіцієнт «деформаційності» K_d дорівнює відношенню скорочення виробу при стиску до його початкового розміру; коефіцієнт «відновленості» K_B дорівнює відношенню остаточного розміру виробу (після зняття навантаження) до його початкового розміру (таблиця 7.45).

Результати дослідів показали, що умовна міцність цукерок при динамічному навантаженні збільшується при зростанні навантаження стиску, зменшенні площі та кількості циклів.

Міцність мармеладу та зефіру не залежить від зусилля, площі та кількості циклів. Міцність цукерок при динамічному навантаженні отримали значно нижче, ніж при статичному.

Умовна міцність зефіру при статичному навантаженні нижче, ніж при динамічному.

Деформація руйнування для всіх виробів при динамічному навантаженні більш, ніж при статичному.

Таблиця 7.45 – Характеристики міцності та деформації цукерок при динамічному навантаженні

Цукерки	Кількість циклів навантаження, 1/хв	$[\sigma_y]$, МПа·с	Δ , мм	K_D , %	K_B , %
«Запорозькі»	18-35	0,29	1,64	8,7	97,4
«Яблуко»	18-25	0,06	1,23	7,0	97,4
«Красний мак»	25-45	0,06	1,50	9,03	98,8
Мармелад формовий	20-23	0,47	3,29	16,7	99,4
Зефір	20-33	0,13	2,70	6,4	95,6

Таблиця 7.46 – Ударна в'язкість печива

Сорт печива	Ударна в'язкість, Н/м	Сорт печива	Ударна в'язкість, Н/м
«Шахове»	168	«Лимонне»	176
«До чаю»	175	«Крокет»	518
«Цукрове»	171	«Спорт»	610
«Вершкове»	168	«Аврора»	495
«Привіт»	176	«Москва»	455

K_D для більшості цукерок знаходиться в межах від 5 до 12%, для формового мармеладу - від 15 до 25%. K_B майже для всіх видів цукерок коливається у границях від 95 до 100%, тобто при навантаженнях менш руйнуючих виробу практично знаходяться в зоні пружних деформацій.

Характеристики міцності печива при ударі визначені на маятниковому копрі (таблиця 7.46).

Таким чином, значення фізико – механічних характеристик дозволяють

раціонально вести технологічний процес готування напівфабрикатів, виявляти оптимальні режими роботи обладнання для формування та визначати його кінематичні параметри.

У харчовій промисловості широке застосування знаходять брикетування та таблетування сипучих матеріалів: цукру кондитерських мас та інших. При брикетуванні матеріал спресується у компактне геометрично правильне тіло в умовах всебічного стиску. Здібність матеріалу до брикетування залежить від його фізико – механічних властивостей, форми зерен, гранулометричного складу, вологості, температури, наявності доданків та деяких інших факторів. У якості показника брикетування приймається змінення щільності, міцності та пружності брикетів у залежності від тиску пресування.

При пресуванні сипучих матеріалів спочатку досягається більш компактне розташування часток продукту завдяки їх переорієнтації та

зсуву, в'язків між ними не виникає. При цьому з продукту вилучається більша частина повітря. На таке ущільнення затрачується мало енергії. Далі ущільнення можливе тільки при деформації окремих часток продукту. На цієї стадії підводиться значна кількість енергії. Більша частина енергії перетворюється у тепло, а також енергію змінення форми та вільну енергію поверхні границь. Зв'язки між частками створюються завдяки їх текучості, виділення тепла та вільних хімічних в'язків. Подальшими зв'язками є адгезійні та когезійні, які виникають одночасно та створюють шари у матеріалі, що їх пов'язують. На при кінці процесу пресування при найбільшому тиску відбувається перехід пружної деформації часток матеріалу в пластичну, внаслідок чого структура брикету зміцнюється та зберігається задана форма.

Важливим реологічне – механічним параметром, який характеризує процес пресування в умовах всебічного стиску, є коефіцієнт бокового тиску, що дорівнює відношенню бокового тиску до тиску пресування. Коефіцієнт бокового тиску ξ займає велике місце у дослідженнях процесів пресування як пружно – пластично – в'язких тіл, так і сипучих матеріалів. Він залежить від пружних властивостей суцільної системи та є показником її якості у відношенні деформування.

Випробування різних мас праліне проводили при тисках, які змінюються від 0 до 2 МПа, та температурах від 36 до 46⁰С. Було встановлено, що з підвищенням тиску коефіцієнт бокового тиску зростає при всіх температурах та при визначених умовах майже дорівнює одиниці. З підвищенням температури маси ξ має більше значення при низькому тиску. Наприклад, якщо при 46⁰С $\xi = 0,9$ при тиску 0,15 МПа, то при 38⁰С $\xi = 0,9$ при тиску 1 МПа.

Вивчення залежності щільності цукерних мас від тиску при різних температурах проводили при температурі мас праліне від 28 до 44⁰С, вершкової помадки - 24⁰С. Стиск мас праліне вели до тиску 2 МПа, вершкової помадки – 0,49 МПа. Отримані криві наведені на рисунку 7.25 [30].

Для практики формування корпусів цукерок найбільший інтерес представляє початкова ділянка кривих, оскільки формування ведеться при тиску не більш ніж 0,2 МПа.

Криві залежності щільності маси праліне від тиску можна навести емпіричним рівнянням:

$$\rho = ap^b + \rho_0, \quad (7.29)$$

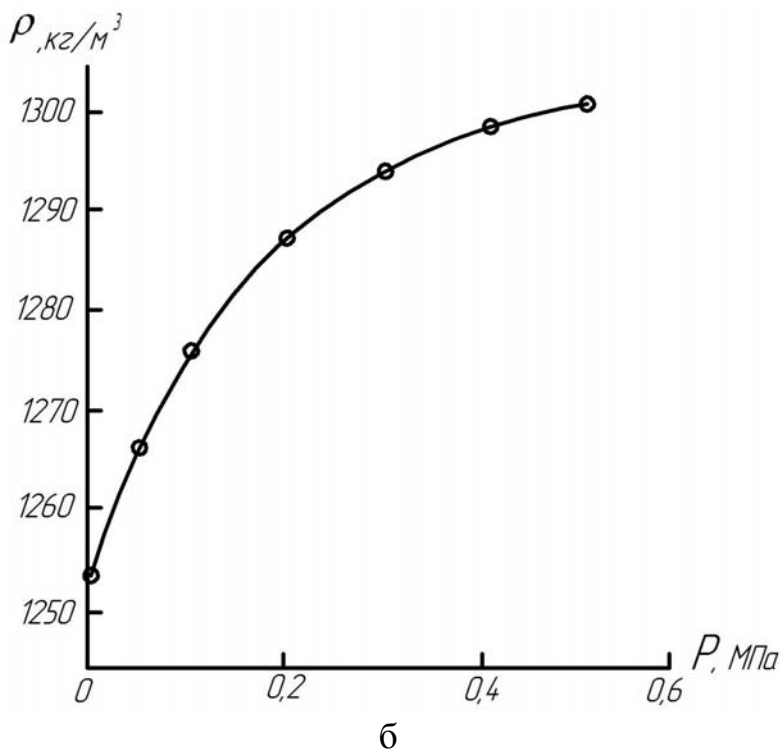
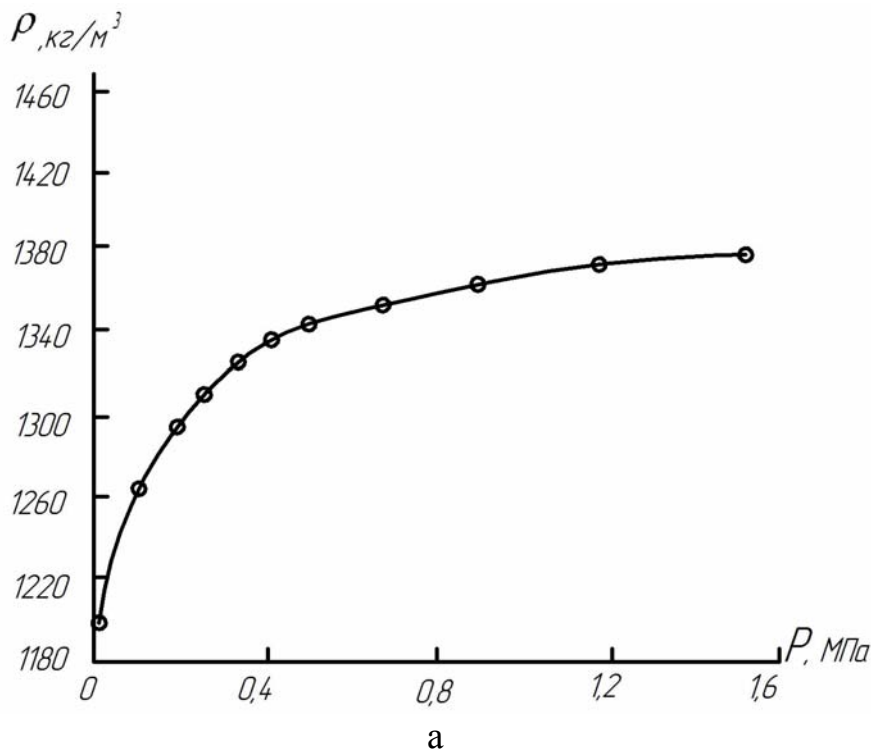


Рисунок 7.25 – Криві пресування маси праліне цукерок «Струмок» при 44⁰С (а) та вершкової помадки при 24⁰С (б)

$\rho_0 = 1075 \text{ кг/м}^3$, $b = 0,15$.

Рівняння (7.29) має широке застосування для опису кривих пресування (залежність щільності від тиску) різноманітних за своєю

де p - тиск формування, Па;

ρ_0 - щільність маси при атмосферному тиску (для мас праліне $\rho_0 = 1190 \text{ кг/м}^3$); a, b - емпіричні коефіцієнти.

Для початкової ділянки при надлишковому тиску від 0 до 0,15 МПа $a=13,5$, $b=0,728$, для наступної ділянки при тиску від 0,15 до 2 МПа $a = 14$ та $b=0,242$. Значення коефіцієнтів залишаються постійними при змінненні температури маси від 28 до 44⁰С.

Для маси цукерок «Руський узор» при температурі 9⁰С:

$\rho_0 = 1120 \text{ кг/м}^3$
 $a = 30,35$, $b = 0,15$;
при 30⁰С: $a = 33,75$,

природою матеріалів: від порошкообразних до в'язко – пластичних.

У діапазоні змінення тиску від 0 до 0,5 МПа відбувається зближення та ущільнення часток маси в основному без їх значної деформації. При достатньо високому тиску буде відбуватися об'ємний стиск компактного тіла, і характер змінення щільності буде іншим.

У виробництві кремових сортів цукерок особливо необхідно враховувати збільшення щільності від тиску для того, щоб отримати потрібну консистенцію маси, яка обумовлюється наявністю пухирчиків повітря та великої кількості жирів. Були проведені дослідження з визначення залежності щільності кремових мас «Трюфелі Екстра» та «Трюфелі» від тиску при температурі 24, 28, 30, 32 та 36⁰С [30].

Найбільше збільшення відбувається в інтервалі тисків від 0 до 0,2 МПа. Подальше підвищення тиску менш впливає на збільшення щільності. При температурі до 26⁰С (тиск атмосферний) щільність маси мало змінюється і складає 960 – 980 кг/м³. Подальший зріст температури до 30⁰С викликає збільшення щільності, потім щільність з підвищенням температури декілька падає.

Встановлене, що маси для цукерок типу «Трюфелі» слід формувати при температурі нижче 26⁰С та тиску нижче 50 кПа.

Були визначенні залежності щільності вершкового крему від тиску в діапазоні від 0 до 0,392 МПа та температури – від 18 до 22⁰С.

Встановлено, що в такому діапазоні змінення температури щільність вершкового крему практично залишається постійною. Отримана залежність щільності крему від тиску у вигляді рівняння:

$$\rho = c + ae^{bp}, \quad (7.30)$$

де p - надлишковий тиск, Па; a, b, c - емпіричні коефіцієнти ($c = 875$; $a = 1,516$; $b = 0,136$).

На основі результатів досліджень рекомендується при обробці тортів створювати тиск на вершковий крем не вище 0,2 МПа при температурі маси в границях 20⁰С.

У виробничих умовах вивчали процес релаксації напружень у цукерних масах при постійній об'ємній деформації. Процес релаксації напружень вивчали при наступних початкових напруженнях: для мас праліне – 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 та 0,5 МПа; для вершкової помадки – 0,209; 0,294; 0,406 та 0,5 МПа. Оскільки випробування проводили з

масами стандартної рецептури, то вплив технологічних параметрів маси на процес релаксації не досліджували.

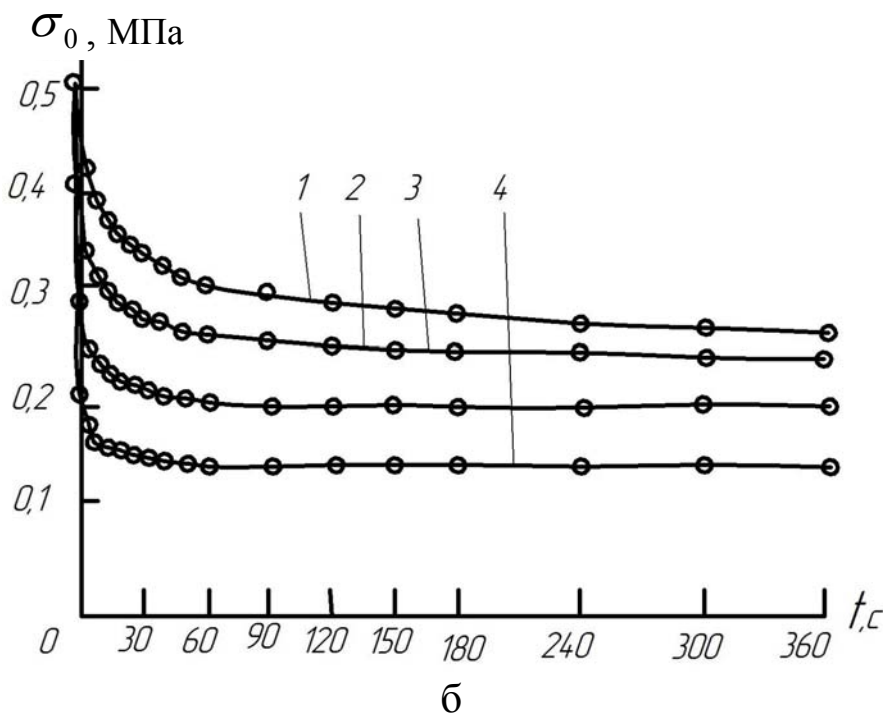
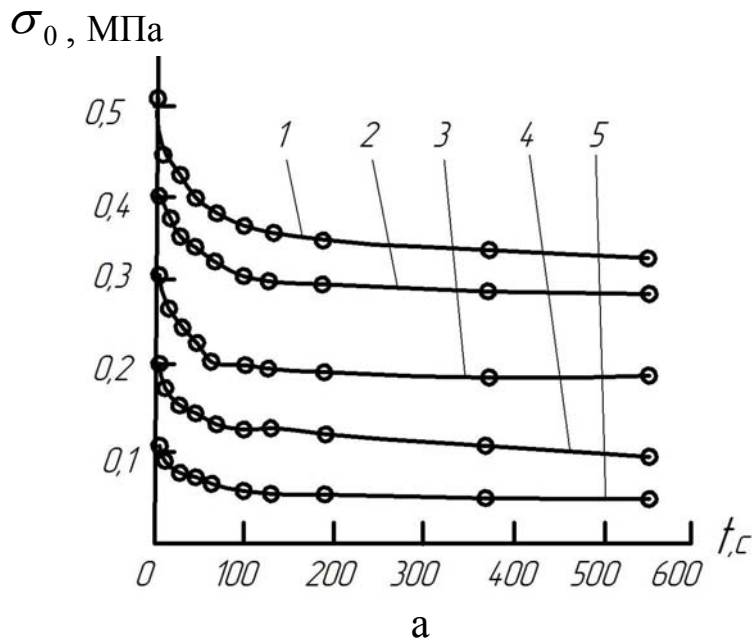


Рисунок 7.26 – Криві релаксації напружень цукерних мас «Карнавальні» (а) «Вершкова помадка» (б) при σ_0 (МПа):

1 – 0,5; 2 – 0,4; 3 – 0,3; 4 – 0,2; 5 – 0,1

тяться і при інших початкових напруженнях.

Експерименти здійснювали з наступними сортами праліне: «Батончики», «Колос», «Карнавальні» та «Московські». За експериментальними даними побудовані криві релаксації напружень (рисунок 7.26). Для практики формування цукерних мас найбільший інтерес представляє перший період релаксації, оскільки за короткий проміжок часу (приблизно 60 с) падає більша частина напруження.

Наприклад, для маси цукерок «Карнавальні» при початковому напруженні 0,5 МПа падіння напруження протягом 60 с склало 0,131 МПа, а за наступні 480 с – лише 0,06 МПа. Подібна картина спостерігається

Для аналітичного опису першого періоду релаксації у цукерних масах користуються рівнянням (6.35), яке з емпіричними коефіцієнтами (таблиця 7.47), справедливе при початкових напруженнях не більш ніж 0,5 МПа.

Визначений модуль релаксації, який дорівнює відношенню напруження до загальної деформації маси, наведений у таблиці 7.48.

Таблиця 7.47 – Залежність коефіцієнтів рівняння (6.35) від виду та температури цукерної маси

Цукерна маса	Температура, °C	A_p	$B_p \cdot 10^3$
«Колос»	26	31,0	1,40
«Московські»	26	34,6	2,03
«Батончики»	26	33,6	1,66
«Карнавальні»	26	28,9	3,53
«Руський узор»	29	35,0	2,65
«Вершкова помадка»	24	43,0	2,90

Таблиця 7.48 – Залежність модуля релаксації цукерних мас (МПа) від тривалості релаксації при початковому напруженні 0,4 МПа і температурі 26°C

Цукерна маса	Тривалість релаксації, с					
	10	20	30	40	50	60
«Карнавальні»	5,9	5,6	5,3	5,3	5,1	5,9
«Батончики»	3,9	3,6	3,5	3,3	3,2	5,9
«Колос»	3,8	3,6	3,4	3,3	3,2	5,9
«Московські»	3,6	3,4	3,2	3,1	2,9	5,9

Для цукерних мас, які досліджувалися, модуль релаксації зменшується у часі, при цьому інтенсивність змінення його за перший період релаксації практично однакова для всіх мас.

Процес релаксації напружень в цукерних масах при всебічному стиску супроводжується процесом повзучості. Повзучість праліне вивчали при температурі 30°C та напруженні від 0,1 до 0,5 МПа [30].

З отриманих експериментальних даних (рисунок 7.27) видно, що процес повзучості поділяється на два етапи: перший – неусталений зі швидкістю деформації, яка поступово згасає, другий – усталений з постійною швидкістю повзучості. Для процесу формування цукерних мас на машинах найбільший інтерес представляє перший етап, оскільки, по – перше, за цей час (100 – 120 с) відбувається найбільша деформація маси, по – друге, у залежності від швидкості випресовування маса знаходиться під тиском протягом 40 – 60 с.

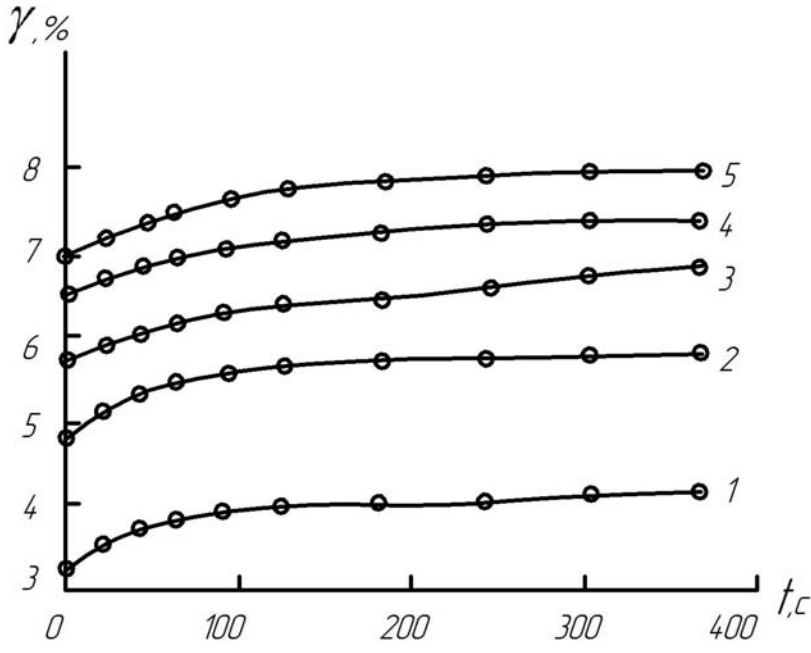
Для першої ділянки кривих повзучості отримане рівняння:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[1 + (A_n + B_n \varepsilon_0) 10^{-3} \sqrt{t} \right], \quad (7.31)$$

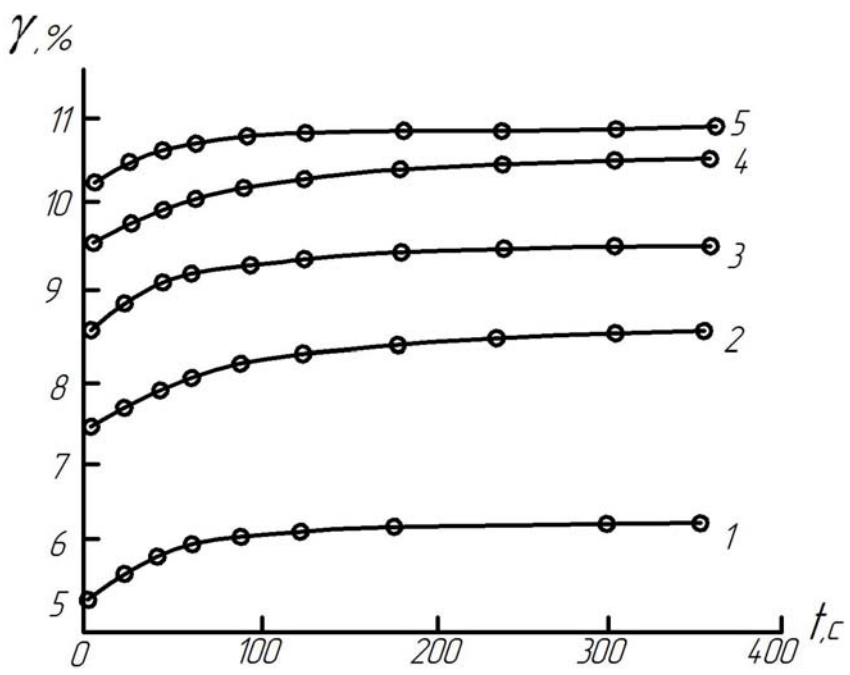
де ε - деформація маси у момент часу t , %; ε_0 - початкова деформація, %; t - час, с; A_n та B_n - емпіричні коефіцієнти, значення яких наведені у таблиці 7.49.

Початкова деформація маси може бути визначена за формулою:

$$\varepsilon_0 = [1 - \rho_0 / \rho_P] 100, \quad (7.32)$$



а



б

Рисунок 7.27 – Криві повзучості цукерних мас «Карнавальні» (а) та «Московські» (б) при напруженні (МПа):

1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,5

Таблиця 7.49 – Емпіричні коефіцієнти рівняння (7.31)

Цукерна маса	A_n	B_n
«Карнавальні»	33,2	3,01
«Московські»	35,1	-2,8
«Колос»	5,58	0,964
«Батончики»	4,53	1,23

де ρ_0 - початкова щільність маси, кг/м³;
 ρ_P - щільність маси при робочому тиску, кг/м³.

При вібраційних діях значно прискорюються процеси релаксації та повзучості, збільшується деформування маси в умовах всебічного стиску.

Дослідження релаксації напружень проводили з масою праліне «Таганай» при температурі 30⁰С у діапазоні змінення тиску від 0 до 0,5 МПа. Амплітуда періодичної об'ємної деформації визначалася амплітудою зміщення поршню, який створює коливання в об'ємі маси, при величинах 0,25; 0,5 та 1,0 мм відповідно складала 0,062; 0,125 та 0,249. Як показали досліди, навіть при таких незначних амплітудах деформації характер процесу релаксації значно змінюється, як наведено на рисунку 7.28. Криві релаксації описуються рівнянням:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - A_p \cdot 10^{-3} t^n\right), \quad (7.33)$$

де σ - напруження у момент часу t , кПа; σ_0 - початкове напруження, кПа; t - поточний час, с; A_p та n - емпіричні коефіцієнти, значення яких наведені у таблиці 7.50.

При накладанні коливань зменшується кінцеве напруження, збільшується швидкість релаксації, особливо на початку процесу (таблиця 7.51). Накладання періодичних деформацій оказало значне діяння і на процес повзучості. Якщо без вібрації змінення об'єму маси за 300 с склало 0,74% (при напруженні 0,2 МПа), то з вібрацією – 13%. Підвищення напруження до 0,4 МПа декілька зменшує процес повзучості. Наприклад, за 300 с об'єм зменшився на 0,28%, а при вібрації – на 1,05%.

Оскільки багато основних виробничих операцій здійснюються при всебічному стиску матеріалу, то його структурно – механічні характеристики повинні відображати вплив тиску. Значення характеристик, отримані без урахування надлишкового тиску, не можуть бути використанні в інженерних розрахунках технологічних процесів.

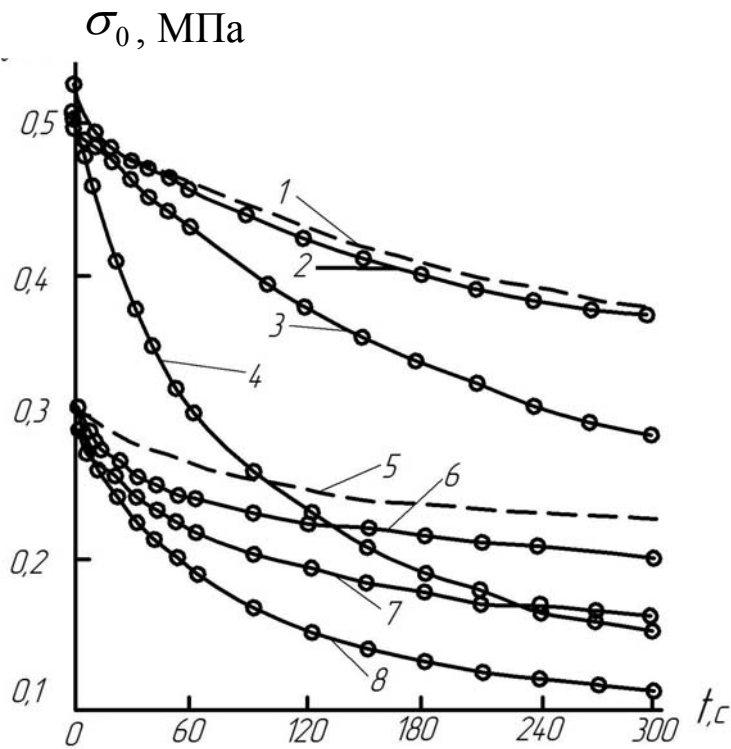


Рисунок 7.28 – Криві релаксації цукерної маси «Таганай» при $\sigma_0=0,5$ МПа (криві 1 – 4) та $\sigma_0=0,3$ МПа (криві 5 – 8) при частоті 24 Гц та амплітуді коливань (мм):

1, 5 – без вібрації;
 2, 6 – 0,25; 3, 7 – 0,5;
 4, 8 – 1,0

Таблиця 7.50 – Залежність коефіцієнтів рівняння (7.33) від параметрів коливань

Частота, Гц	Амплітуда, мм	Початкове напруження, МПа	n	A_p
0	0	0,305	0,90	3,2
		0,500		1,8
8	0,5	0,304	0,67	6,8
		0,507		8,0
16	0,5	0,301	0,67	14,5
		0,520		7,0
24	0,25	0,293	0,78	8,0
		0,515		5,2
24	1,0	0,306	0,63	29,4
		0,507		29,4

Таблиця 7.51 – Залежність швидкості релаксації від часу, частоти f (Гц) та амплітуди коливань A (мм)

Час, с	$f=0, A=0$	$f=8, A=0,5$	$f=16, A=0,5$	$f=24, A=0,25$	$f=24, A=0,5$	$f=24, A=1,0$
0	1,01	0,95	2,92	1,82	2,82	7,35
60	0,46	0,45	0,58	0,48	0,71	1,06
120	0,28	0,28	0,34	0,24	0,41	0,50
180	0,16	0,18	0,25	0,14	0,22	0,30
240	0,09	0,10	0,18	0,12	0,14	0,22
300	0,05	0,09	0,13	0,12	0,08	0,14

Питання для самоконтролю

1. Які константи пружно – пластично – в'язких властивостей мас з практично незруйнованою структурою найбільш повно оцінюють їх технологічні властивості?
2. Як залежать основні пружно – пластично – в'язкі характеристики мас праліне від температури?
3. Яку залежність описують криві пресування?
4. Якими характеристиками оцінюють міцність цукерок?
5. Які коефіцієнти застосовують для оцінки деформаційних властивостей виробів при динамічному навантаженні?
6. Який коефіцієнт характеризує процес пресування в умовах всебічного стиску?
7. Як залежить щільність цукерних мас від тиску?
8. Який характер має релаксації напружень у цукерних масах при постійної об'ємної деформації?
9. Охарактеризуйте процес повзучості цукерних мас при всебічному стиску?
10. Як впливає вібрація на процеси релаксації та повзучості?

7.4 Поверхневі характеристики кондитерських продуктів

Дослідження властивостей адгезії шоколадних мас, мас праліне, помадних та інших цукерних мас здійснювали стосовно до процесу їх формування [30].

При вивченні властивостей адгезії кондитерських мас були встановлені залежності адгезійного тиску від напруження та тривалості попереднього контакту, швидкості відриву, марки матеріалу, який контактує та технологічних параметрів маси. Експерименти проводили на адгезіометрі методом відриву пластини. Для досліджень застосовували пластини зі сталі Ст.3, неіржавної сталі ІХІ8Н9Т, бронзи БрАЖЗ-5-5, латуні Л59, алюмінію АЛ1, текстоліту ПТ, вініпласту та фторопласту-4. Всі матеріали мали робочу поверхню, оброблену по 5 – му класу чистоти. Пластини вводили з визначеним зусиллям. Після витримки необхідної тривалості контактування поверхонь здійснювали відрив пластини від маси. Для випробувань брали цукерні маси, виготовленні у виробничих умовах за стандартною рецептурою. Після кожного досліду поверхневий шар відновлювався.

При вивченні впливу тривалості та напруження контакту експе-

рименти проводили з пластиною зі сталі IX18H9T з «Вершковою помадкою» жирністю 0,197 кг/кг та вологістю 0,096 кг/кг при температурі 24⁰С. Отримані дані наведені у таблиці 7.52.

Досліджений також вплив тривалості контакту на адгезійний тиск маси праліне «Теніс» при температурі 34⁰С.

Таблиця 7.52 – Залежність адгезійного тиску $p_0 \cdot 10^{-3}$ (Па) «Вершкової помадки» від тривалості та тиску контакту

Тривалість контакту, с	Тиск контакту, Па				
	1960	3920	5890	7840	9800
5	1,2	1,3	1,65	3,2	3,8
10	1,7	2,3	2,5	3,6	4,0
20	2,3	2,4	2,6	3,7	4,2
30	2,4	2,5	2,7	3,8	4,2
60	2,4	2,5	2,7	3,8	4,3

Дані таблиці 7.52 свідчать, що при змінненні тривалості від 0 до 30 с адгезійний тиск маси праліне або незначно збільшується, або практично не змінюється. Подібна картина спостерігається також при випробуванні пластини з фторопласту-4.

Пояснення характеру отриманих залежностей для цукерних мас, які досліджувалися, будь – якою теорією адгезії викликає труднощі.

На процес адгезії, очевидно, накладаються також і релаксаційні явища, які протікають у масі при контактуванні поверхонь: заповнення масою мікронерівностей рельєфу площадки відбувається у результаті її поступової повільної течії, що у свою чергу викликає збільшення поверхні контакту, тобто і адгезійного тиску.

Зі збільшенням тривалості та напруження контакту відбувається більш інтенсивне утворення зв'язків. При цьому навіть при високих тисках в'язки розвиваються у часі, що узгоджується з теорією П. А. Ребіндера. У той же час під дією напруження контакту на границі контакту через деякий час з'являється жирова плівка, яка сприяє адгезійному відриву.

На рисунку 7.29 наведені графіки залежності адгезійного тиску маси праліне «Теніс» від швидкості відриву пластини, виготовленої з сталі Ст.3, при двох напруженнях контакту; температура 34⁰С.

Результати досліджень показали, що зі збільшенням швидкості адгезійний тиск зростає [30]. При цьому під мікроскопом було помітно змінення характеру відриву зі змінням швидкості; при швидкості пластини до 0,006 м/с відрив можна віднести до когезійного, при швидкості від 0,006 до 0,01 м/с спостерігається змішаний адгезійно – когезійний відрив, при швидкості від 0,01 до 0,02 м/с переважним є

адгезійний відрив, а при швидкості більш, ніж 0,02 м/с – чисто адгезійний. Оскільки маса праліне при температурі 34⁰С має невелику міцність, то її адгезійні властивості близькі до когезійних.

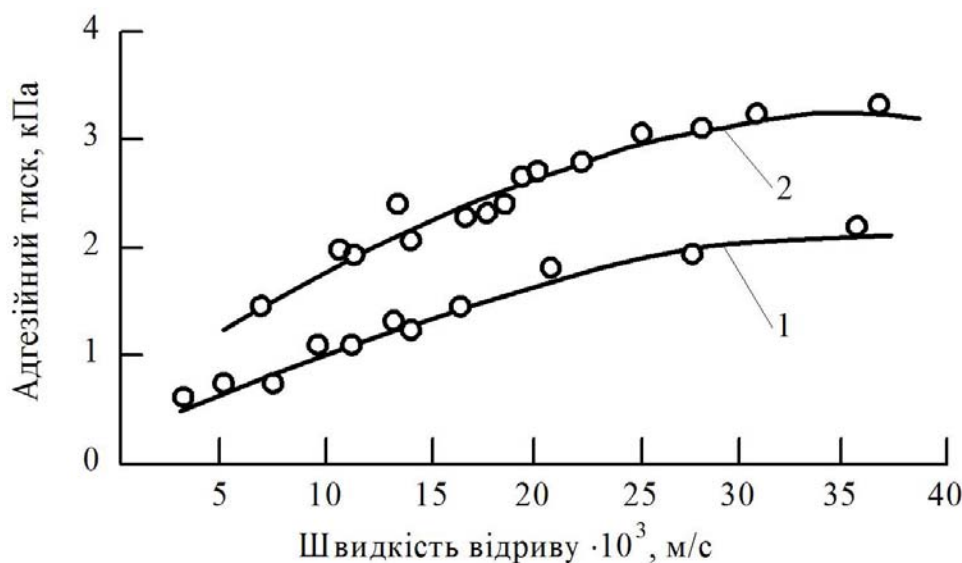


Рисунок 7.29 – Вплив швидкості відриву на адгезійний тиск маси праліне при напруженні контакту (кПа):

1 – 1,87;
2 – 14,96

При порівняно повільному відриві встигають відбуватися процеси релаксації, маса поводить ся як в'язка рідина, що володіє малою міцністю. При високих швидкостях цукерна маса поводить ся як достатньо пружне тіло з великою границею міцності, тому порушення контакту відбувається чітко по границі двох тіл. За результатами обробки експериментальних даних побудовані графіки (рисунок 7.30).

З кривих бачимо, що при зміненні тривалості контакту від 5 до 15 с адгезійний тиск «Вершкової помадки» до всіх матеріалів різко зростає, при подальшому збільшенні часу адгезійний тиск збільшується незначно. Якщо при тривалості контакту 5 с та напруженні контакту 5,88 кПа адгезійний тиск дорівнює 1,66 кПа, то при тривалості контакту 10 с воно складає 2,62 кПа, а при 120 с – 3,76 кПа.

Залежність адгезійного тиску маси праліне від тривалості та напруження контакту наведена у таблиці 7.53. Аналогічна картина спостерігається при всіх напруженнях контактування. На рисунку 7.31 наведені дані за результатами обробки 10 - 15 дослідів, які характеризують адгезійний тиск «Вершкової помадки» до різних матеріалів у залежності від напруження контакту при температурі 24⁰С та тривалості контакту 30 с.

Матеріали пластин, які випробувалися можна розташувати в ряд, складений у порядку зменшення адгезійного тиску: алюміній АЛ1, вініпласт, сталь ІХІ8Н9Т, бронза БрАЖ3-5-5, сталь Ст.3, фто-

ропласт-4. Такий ряд дозволяє правильно обрати матеріал для робочих органів машин, виходячи з їх функціонального призначення.

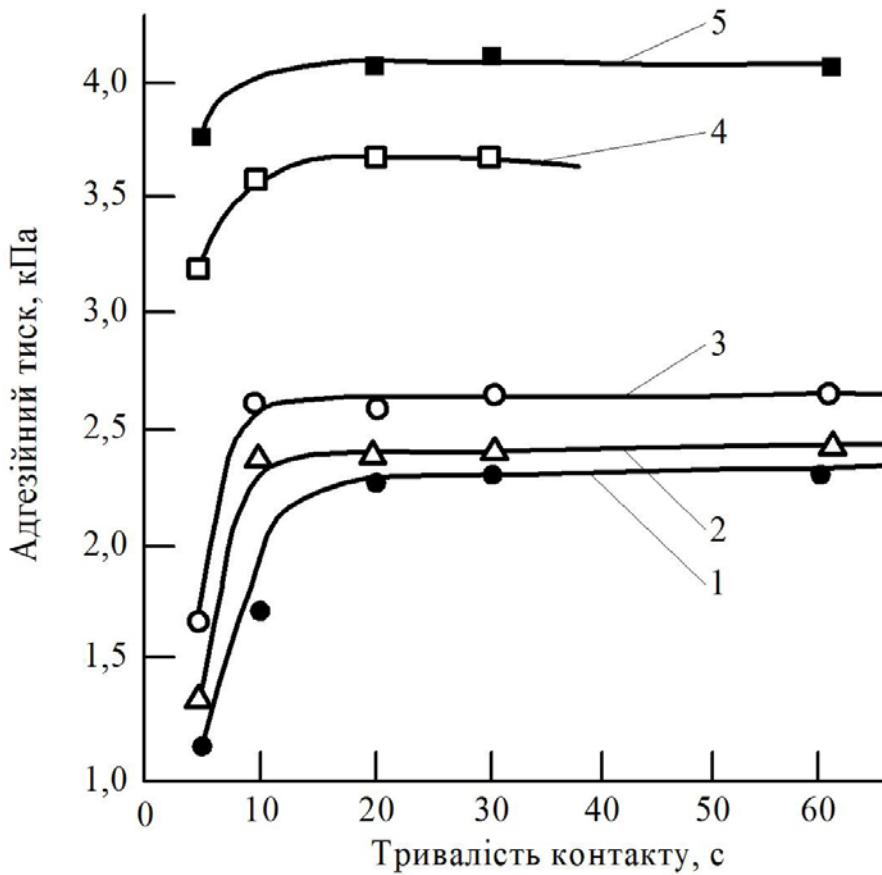


Рисунок 7.30 – Залежність адгезійного тиску «Вершкової помадки» від тривалості контакту при напруженні контактування (кПа):

1 – 1,96; 2 – 3,92; 3 – 5,89; 4 – 7,84; 5 – 9,80

Таблиця 7.53 – Залежність адгезійного тиску $p_0 \cdot 10^{-3}$ (Па) маси праліне від тривалості та напруження контакту для сталі Ст.3

Тривалість контакту, с	Тиск контакту, кПа				
	1,87	3,74	7,48	11,22	14,96
0	1,13	1,69	2,61	2,82	4,21
10	1,25	1,75	2,64	3,03	4,10
20	1,43	1,85	2,60	3,21	4,39
30	1,64	2,00	2,98	3,20	4,10

При змінній температурі від 19 до 22⁰С адгезійний тиск «Вершкової помадки» зростає незначно, при подальшому підвищенні температури тиск різко збільшується. При змінній температурі від 22 до 26⁰С при напруженні контакту 7,85 кПа адгезійний тиск збільшився у 2,6 рази. Така залежність показує, що з підвищенням температури адгезійна міцність зменшується внаслідок теплового руху молекул, але адгезійне зчеплення значно збільшується внаслідок інтенсифікації процесу дифузії. Таблиця 7.54 ілюструє вплив температури маси на адгезійний тиск при різному тиску контакту.

Для цукерної маси праліне «Парус» при температурі від 34 до

40⁰С отримане емпіричне рівняння [30]:

$$p_0 = p_{00} + at_k + bp_k, \quad (7.34)$$

де p_0 - адгезійний тиск, Па; t_k - тривалість контакту, с;

p_{00} , a , b – емпіричні коефіцієнти, які наведені у таблиці 7.55.

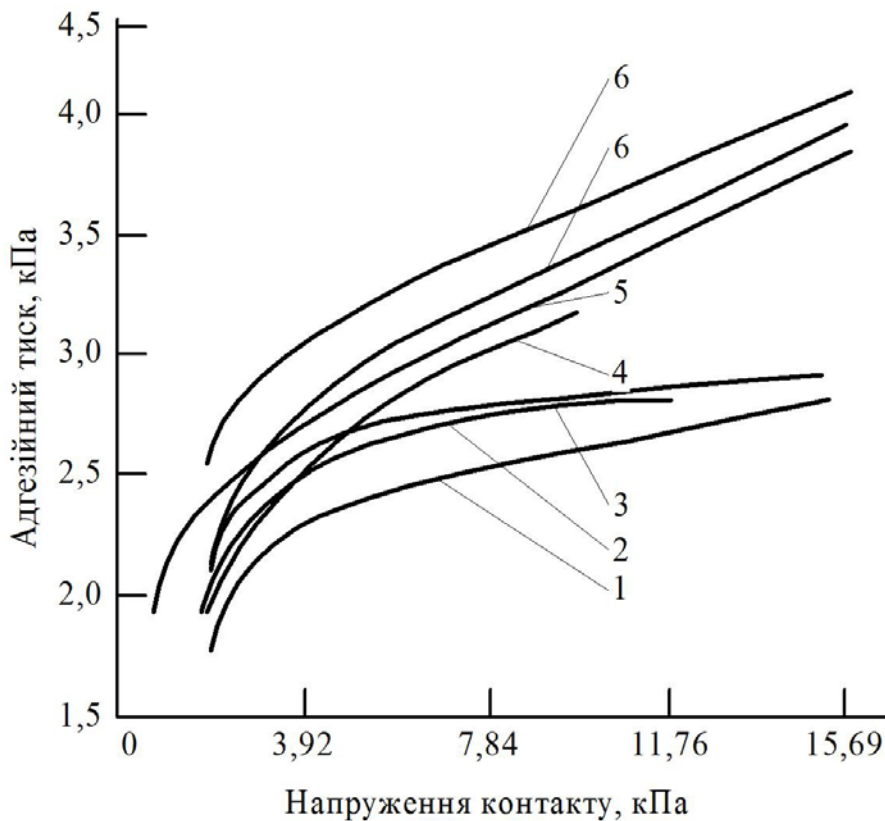


Рисунок 7.31 - Залежність адгезійного тиску «Вершкової помадки» від тривалості контакту до різних матеріалів:

- 1 – фторопласт-4; 2 – сталь Ст.3; 3 – текстоліт ПТ;
- 4 – бронза БрАЖ3-5-5;
- 5 – сталь ІХІ8Н9Т;
- 6 – вініпласт;
- 7 – алюміній АЛ-1

Таблиця 7.54 – Вплив температури та тиску контакту на адгезійний тиск $p_0 \cdot 10^{-3}$ (Па) «Вершкової помадки»

Температура, °С	Тиск контакту, Па						
	1960	2940	3920	5880	7850	11760	15700
Матеріал пластини – фторопласт-4							
19	-	-	1,27	-	1,33	1,47	1,99
22	1,15	-	1,43	1,60	1,68	1,64	-
23	2,17	2,23	2,40	2,27	2,57	2,67	-
24	2,43	-	2,65	2,83	3,16	3,73	4,12
26	3,35	3,37	3,47	3,85	4,37	3,25	5,67

При вивченні адгезійних властивостей цукерних мас «Руський узор» та «Космічні» використанні конструктивні матеріали: Сталь Ст.3, Бронза БрАЖ 3-5-5, Сталь ІХІ8Н9Т, Алюміній АЛ1, Вініпласт, Фторопласт-4. Обробка поверхонь зразків по 5-му класу чистоти [30].

Для маси цукерок «Руський узор» жирністю

0,197 кг/кг та вологістю 0,096 кг/кг при температурі 28⁰С отримана залежність адгезійного тиску від тиску контакту з пластиною зі сталі ІХІ8Н9Т.

Таблиця 7.55 – Коефіцієнти до рівняння (7.34) (швидкість відриву пластини 10 мм/с)

Матеріал пластини	p_{00} , Па	a , Па/с	b
Сталь Ст.3	1030	8,345	0,18
Текстоліт	1226	8,363	0,18
Алюміній АЛ1	1360	8,426	0,19
Фторопласт-4	1484	8,465	0,19
Вініпласт	1632	8,542	0,20

Були проведені дослідження по визначенню впливу тривалості контакту при постійному напруженні на адгезійний тиск цукерних мас «Космічні», «Руський узор» (таблиця 7.56), виготовлених у виробничих умовах. Найбільш різке збільшення

адгезійного тиску відбувається при змінній тривалості контакту від 5 до 10 с, при підвищенні тривалості від 20 до 90 с адгезійний тиск мало зростає. Закономірність нерівномірного збільшення адгезійного тиску з підвищенням тривалості контакту спостерігається по даним цієї таблиці. Така поведінка характерна для мас, які досліджувалися, незалежно від матеріалу підкладки.

Пояснити такий характер отриманої залежності якою – небудь теорією адгезії не можливо, але можна вважати, що в процесі приймають участь два механізми: релаксаційний та дифузійний.

Таблиця 7.56 – Вплив тривалості контакту на адгезійний тиск $p_0 \cdot 10^{-3}$ (Па) цукерних мас «Космічні» та «Руський узор» при температурі 29⁰С

Матеріал пластини	Тривалість контакту, с					
	5	10	20	30	60	90
«Космічні» ($p_k = 5,45 \cdot 10^3$ Па)						
Фторопласт-4	0,56	0,97	1,28	1,30	1,35	1,39
Вініпласт	0,69	1,50	1,59	1,60	1,61	1,75
Сталь Ст.3	1,03	1,89	1,96	1,97	1,99	2,04
«Руський узор» ($p_k = 25,2 \cdot 10^3$ Па)						
Фторопласт-4	18,7	20,0	21,4	21,5	21,9	23,0
Алюміній АЛ1	23,0	24,1	24,2	24,6	24,9	25,8

Контакт адгезиву та субстрату в багатьох системах не може бути абсолютним, оскільки на границі між тілами завжди залишаються незаповнені адгезивом порожнини та інші дефекти мікрорельєфу. У ви-

падку, який розглядається, вказані механізми сприяють розвитку поверхні контакту наступним чином: при контактуванні двох тіл площа взаємодії з часом збільшується завдяки релаксаційним процесам та пластичній течії, які відбуваються в масі продукту в зоні контакту. Цим пояснюється значне підвищення адгезійного тиску у початковий період процесу. Вплив дифузійних явищ виявляється при достатньо великій тривалості контакту (вище 120 с).

Великий вплив на адгезійний тиск оказує температура маси. Наприклад, для маси «Руський узор» при тривалості контакту 30 с, напруженні 17,2 кПа, контактуванні з пластиною зі сталі ІХІ8Н9Т спостерігали залежність,

Таблиця 7.57 – Залежність адгезійного тиску від температури маси

Температура маси, °С	27	28	28	30
Адгезійний тиск, кПа	1,70	1,91	2,36	2,86

яка наведена у таблиці 7.57 [30]. Таким чином, при підвищенні температури маси від 27 до 30°С тиск зростає у

1,68 разів. Збільшення адгезійного тиску з підвищенням температури цукерної маси можна пояснити з позиції різних теорій. Відповідно дифузійній теорії адгезійне зчеплення збільшується завдяки інтенсифікації процесу дифузії.

При дослідженні адгезії цукерних помадних мас до сталі було показано, що найбільший вплив на адгезійний тиск оказує температура маси, декілька менше – температура підкладки.

Результати експериментів з цукерною масою «Руський узор» при температурі 29°С та тривалості контакту 30 с з різними матеріалами пластин наведені у таблиці 7.58.

Таблиця 7.58 – Залежність адгезійного тиску цукерної маси «Руський узор» (кПа) від матеріалу субстрату та напруження контакту

Матеріал пластини	Напруження контакту, кПа						
	1,55	3,49	5,45	11,27	17,10	24,85	36,5
Бронза БрАЖ3-5-5	0,59	1,33	1,69	2,01	2,72	3,58	4,00
Сталь ІХІ8Н9Т	0,53	0,92	1,20	1,87	2,46	3,00	3,73
Сталь Ст.3	-	0,85	1,16	1,65	2,36	-	3,68
Алюміній АЛ – 1	0,40	0,55	1,11	1,60	2,22	2,91	3,54
Вініпласт	-	0,68	0,93	1,49	2,00	2,54	3,26
Фторопласт-4	-	0,31	0,56	1,17	1,76	2,22	2,84

Для матеріалів, які досліджувалися, адгезійний тиск підвищується зі збільшенням напруження контакту. Випробування показали,

що по зменшенню адгезійного тиску матеріали можна розташувати у порядку, наведеному у таблиці 7.58. Мінімальну адгезійну взаємодію фторопласту-4 з харчовими матеріалами пояснюють його гідрофобними властивостями. При випробуванні виявлене виділення жиру на поверхні маси, що визначило адгезійний характер відриву пластин.

Адгезійний тиск цукерних помадних мас було визначено методом відриву отформованого корпусу від підкладки у вигляді диску, виготовленого з матеріалу, який випробується [30]. Зразки готували відповідно уніфікованим рецептурам на цукерки при температурі помади 70⁰С, температурі підкладки 20⁰С, тривалості контакту адгезиву та субстрату 2 години. Результати вимірювань показали, що адгезійний тиск слабомолочної, цукрової, молочної помадних мас та помади крем – бруле до визначеного конструкційного матеріалу виражається співвідношенням 1:0,82:0,91:0,57.

Значення адгезійного тиску (кПа) слабомолочної помади до різних конструкційних матеріалів наведені у таблиці 7.59.

Результати досліджень дозволили вважати, що адгезія помадних цукерних мас може бути поясненна електрорелаксаційною теорією склеювання, оскільки ці маси, являючись пружно – в'язкими тілами, при деформуванні проявляють релаксаційні властивості.

З пониженням температури помадних цукерних мас адгезійний тиск значно зменшується (таблиця 7.60).

Методом кореляційного аналізу знайдене рівняння, яке встановлює залежність адгезійного тиску слабомолочної помадки цукерної маси «Вікторія» до підкладки зі сталі 45, обробленої по 6 – му класу чистоти, від температури маси, підкладки та швидкості відриву:

$$\sigma_{ад} = -1799 + 233T_{п} + 471T_{м} + 607v, \quad (7.35)$$

де $\sigma_{ад}$ - адгезійний тиск, Па; $T_{п}$, $T_{м}$ - відповідно температура підкладки та маси, ⁰С; v - швидкість відриву маси від підкладки, м/с.

Рівняння (7.35) справедливе при змінній температурі підкладки від 0 до 70⁰С, температурі маси – від 12 до 70⁰С та швидкості відриву – від 1 до 30м/с.

Результати впливу на адгезійний тиск тривалості контакту різних матеріалів з помадними цукерними масами при напруженні кон-

такту 5450 Па наведені у таблицях 7.61 та 7.62.

Таблиця 7.59 – Значення адгезійного тиску (кПа) слабомолочної помади до різних конструкційних матеріалів

Матеріали	Адгезійний тиск (кПа)
Метали	
Сталь	
Хромована	53,6
Ст.3	53,4
45	38,4
У8	45,0
ХН78Г	43,8
Бронза БрАМЦ9-2А	41,8
Дюралюміній Д-1Т	40,0
Титан	40,0
Полімери	
Амінопласт	48,4
Поліетилен високого тиску	34,0
Поліетилен низького тиску	29,2
Полістирол	35,4
Поліпропілен	24,0
Фторопласт-4	16,2
Гума пориста харчова	29,0

Таблиця 7.60 – Залежність адгезійного тиску до сталі 45 (чисельник) та фторопласту-4 (знаменник) (кПа) від температури помадних цукерних мас

Вид помади	Температура маси, °С			
	70	40	20	12
Цукрова	35,5/21,0	15,2/14,2	12,2/11,0	11,3
Слабомолочна	38,4/16,8	17,4/12,2	13,0/10,6	11,6
Молочна	36,0/19,2	16,8/13,8	11,8/10,2	10,3
Крем-брюле	28,4/16,8	13,6/11,0	11,2/9,4	10,5

Були дослідженні властивості цукерної маси «Стратосфера», виготовленої у виробничих умовах [30].

Встановлено, що адгезійний тиск залежить від температури маси (T_M), температури під підкладки (T_{II}), тривалості контакту (t_K) та швидкості відриву ($v_{ВІД}$).

При вивченні залежності адгезійного тиску від температури маси в інтервалі від 21 до 35⁰С при постійності решти параметрів ($t_{II}=21,5^0\text{C}$; $v_{ВІД}=1$ мм/с; $\tau_K=30\text{c}$) був визначений її нелінійний характер, як наведено на рисунку 7.32.

Зменшення адгезійного тиску зі зростанням температури викликане зниженням в'язкості та міцності маси.

Таблиця 7.61 – Вплив тиску та тривалості контакту на адгезійний тиск

Тривалість контакту, с	Тиск контакту $p_k \cdot 10^{-3}$, Па		
	1,67	2,52	3,69
5	1,68	1,88	2,04
10	1,85	2,14	2,74
15	1,88	2,21	3,00
30	1,89	2,21	3,18
60	1,89	2,18	3,18
90	2,01	2,30	3,31
120	2,09	2,57	3,50

Таблиця 7.62 – Залежність адгезійного тиску (Па) помадних мас від тривалості контакту та матеріалу пластин

Тривалість контакту, с	«Буревісник»		«Красна квітка»		«Весна»	
	Фторопласт-4	Сталь ІХ18Н9Т	Фторопласт-4	Сталь ІХ18Н9Т	Фторопласт-4	Сталь ІХ18Н9Т
10	1700	2220	2265	1090	2100	2410
30	2265	2550	1485	4950	2280	2870
60	2335	2940	1600	5430	2760	3890
120	2380	2960	1670	5945	2840	4330

Була визначена залежність адгезійного тиску від тривалості контакту при постійній температурі маси та підкладки, а також швидкості відриву ($t_M = 29^0\text{C}$; $t_{II} = 20,8^0\text{C}$; $v_{ВІД} = 1$ мм/с). В інтервалі тривалості контакту від 0 до 120 с ця залежність нелінійна (рисунок 7.33). Зі збільшенням тривалості контакту адгезійний тиск збільшується.

Вивчення впливу окремих факторів на адгезійний тиск виявило нелінійний характер залежності. Запропоноване нелінійне рівняння множинної регресії:

$$\sigma_{АД} = a_0 + a_1 T_M + a_2 T_M^2 + a_3 T_{II} + a_4 T_{II}^2 + a_5 t_k + a_6 t_k^2 + a_7 v_{ВІД} + a_8 v_{ВІД}^2, \quad (7.36)$$

де t_k - тривалість контакту, с; T_{II} , T_M - відповідно температура підкладки та маси, ^0C ; $v_{ВІД}$ - швидкість відриву, мм/с; a_0, a_1, \dots, a_8 - розрахункові коефіцієнти, наведені у таблиці 7.63.

Аналіз частинних коефіцієнтів кореляції показав, що на адгезійний тиск у більшій ступені впливає температура маси, потім тривалість контакту та швидкість відриву, в меншій ступені – температура підкладки. Порівняння отриманих даних дозволило розташувати конструкційні матеріали по зростанню адгезійного тиску (Па) до зби-вних цукерних мас у наступний ряд (при $t_M = 29^0\text{C}$; $t_{II} = 20,8^0\text{C}$;

$U_{ВД} = 1 \text{ мм/с}$; $\tau_K = 30 \text{ с}$): фторопласт-4 - 905, чавун - 940, сталь Ст.3 - 980, Сталь Х18Н9Т - 990, дерматин – 997.

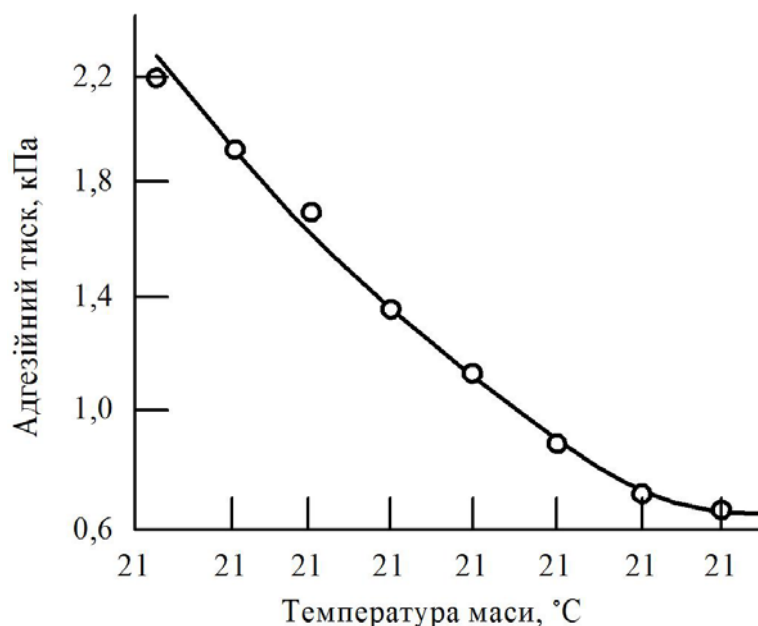


Рисунок 7.32 – Залежність адгезійного тиску цукерної маси «Стратосфера» від температури маси

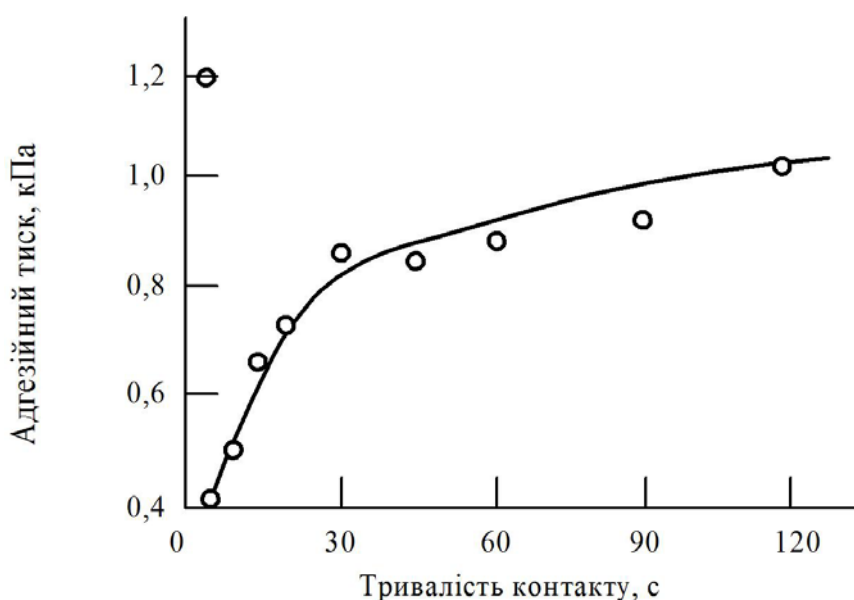


Рисунок 7.33 – Залежність адгезійного тиску цукерної маси «Стратосфера» від тривалості контакту

від швидкості та нормального тиску [30].

Таким чином, у результаті вивчення відношення адгезійних властивостей збивних цукерних мас до деяких конструкційних матеріалів встановлений нелінійний характер залежності адгезійного тиску від температури маси та тривалості контакту.

Взаємодія силючого продукту з поверхнею, вздовж якої він рухається, оцінюється коефіцієнтом опору, що визначається як відношення сили опору у напрямку руху до сили нормального тиску.

Були проведені дослідження з праліне різних сортів для визначення коефіцієнтів опору при встановленому русі вздовж сталі Ст.3, обробленої по різним класам чистоти, у залежності

Таблиця 7.63 – Значення коефіцієнтів рівняння (7.36)

Матеріал підкладки	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	Коефіцієнт регресії
Сталь Ст.3	912000	-304,7	3,32	-85500	2019	11,98	-0,065	614	-91,6	0,98
Сталь X18H9T	317000	202,5	-5,12	29300	-678	5,45	-0,040	386	-57,3	0,98
Фторопласт-4	4129000	-210,0	2,45	-390400	9230	16,93	-0,115	729	-89,6	0,96
Чавун	137000	-516,0	6,65	13700	-321	13,4	-0,072	472	54,0	0,98
Дерматин	890000	-540,0	7,33	-8300	1958	12,5	-0,079	368	-37,7	0,97

Як видно з даних таблиці 7.64, зі збільшенням швидкості поверхні коефіцієнт опору підвищується; підвищення нормального тиску веде до зросту опору при русі вздовж поверхні, яка оброблена по 8-му класу чистоти, та до падіння опору при русі вздовж поверхні, обробленої по 4-му класу.

Коефіцієнти зовнішнього тертя сипучої кондитерської маси праліне знаходили при змінненні куту нахилу поверхні, яка була виготовлена зі сталі Ст.3 та оброблена по 4 – му класу чистоти [30].

Статичний коефіцієнт тертя визначали по тангенсу куту нахилу поверхні, при якому матеріал приходить до руху, динамічний коефіцієнт – по траєкторії вільного падіння маси, яку скидали з похилої площини. Експерименти проводили з чотирма сортами праліне: «Маска» (жирність 0,251 кг/кг, вологість 0,01 кг/кг, температура 28⁰С), батончики «Спортивні» (жирність 0,202 кг/кг, вологість 0,012 кг/кг та 32⁰С), батончики «Рот Фронт» (жирність 0,26 кг/кг, вологість 0,01 кг/кг, температура 28⁰С) та «Антракт» (жирність 0,22 кг/кг, вологість 0,014 кг/кг, температура 29⁰С).

Отримані дані наведені у таблиці 7.65. Коефіцієнти тертя дозволяють визначити опір руху робочих органів технологічних машин, та

проводити розрахунок та конструювання транспортуючих приладів для кондитерських матеріалів.

Таблиця 7.64 – Залежність коефіцієнтів опору праліне від нормального тиску, швидкості та чистоти сталюї поверхні

Швидкість поверхні, м/с	Нормальний тиск, Па			
	40	250	360	740
8-й клас чистоти поверхні				
0,2	0,34	0,33	0,36	0,34
0,5	0,31	0,35	0,36	0,36
0,8	0,32	0,36	0,38	0,37
1,2	0,34	0,38	0,39	0,38
1,6	0,35	0,38	0,39	0,40
2,0	0,39	0,40	0,40	0,44
4-й клас чистоти поверхні				
0,2	0,45	0,38	0,37	0,37
0,5	0,49	0,42	0,41	0,39
0,8	0,53	0,44	0,43	0,43
1,2	-	0,48	0,47	0,44
1,6	0,59	0,47	0,46	0,44
2,0	0,61	0,47	0,46	0,46

Таблиця 7.65 – Значення коефіцієнтів тертя праліне

Сорт праліне	Статичний	Динамічний
«Маска»	0,466	0,435
Батончики «Спортивні»	0,625	0,434
Батончики «Рот Фронт»	0,555	0,532
«Антракт»	0,577	0,518

7. Якою теорією пояснюють адгезію помадних цукерних мас?
8. Яким коефіцієнтом оцінюється взаємодія сипучого продукту з поверхнею, по який він рухається?
9. Як визначають статичний коефіцієнт тертя?

Таким чином, знання фрикційних властивостей та адгезії кондитерських матеріалів і виробів дає можливість правильно обирати конструкційні матеріали та кінематичні схеми машин.

Питання для самоконтролю

1. Як залежить адгезійний тиск мас праліне від тривалості та тиску контакту?
2. Як впливають релаксаційні явища, які протікають у масі при контактуванні поверхонь, на процес адгезії?
3. Як змінюється адгезійний тиск маси праліне при змінній швидкості відриву та напруження контакту?
4. Чим пояснюється, що з підвищенням температури адгезійна міцність зменшується?
5. Як пояснюють закономірність нерівномірного збільшення адгезійного тиску з підвищенням тривалості контакту?
6. Який вплив оказує температура маси та температура підкладки на адгезійний тиск?

Розділ 8

ТЕЧІЯ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ ПО КАНАЛАМ. ВИКОРИСТАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ОБЛАД- НАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ

8.1 Течія неньютонівських матеріалів по каналам різної форми

Інженерні розрахунки процесів, які протікають у різних технологічних машинах та пристроях, а також кінематичні та енергетичні розрахунки і розрахунки на міцність самих агрегатів базуються на знаннях про залежності швидкості матеріалу від тиску, реологічних властивостей продукту, форми та розмірів робочих каналів. Питання течії харчових мас у каналах різного профілю мають практичний та теоретичний сенс, оскільки знання закономірностей течії в каналах обладнання для переробки продуктів необхідні для вибору найбільш раціональних його параметрів.

Оскільки реальні процеси течії складні та викликають значні математичні труднощі, то отримані аналітичні розв'язання цієї задачі з застосуванням ряду припущень з успіхом використовується в інженерній практиці.

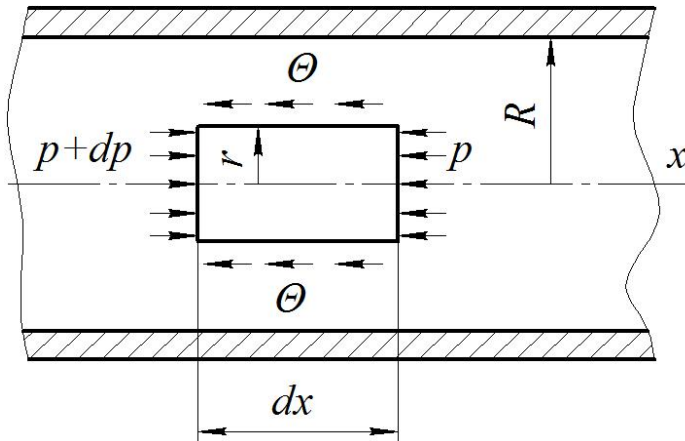
При розрахунку реального процесу течії застосовуються наступні основні обмеження: розглядається тільки ламінарний потік; процес вважається ізотермічним; швидкість часток матеріалу, які прилягають до стінок, дорівнює нулю; матеріал розглядається таким, що практично не стискується; реологічні властивості матеріалу не залежать від часу, тобто на течію не впливають процеси релаксації, тиксотропії та реопексії.

8.1.1 Течія в круглому каналі

Розглянута усталена ламінарна течія в циліндричному каналі постійного радіусу R у додатному напрямку осі x (рисунок 8.1) [2].

Сума сил, які діють на елемент рідини довжиною dx , повинна дорівнювати нулю:

$$\pi r^2(p + dp) - \pi r^2 p - 2\pi r dx \theta, \quad (8.1)$$



де P - тиск, звідкіля:

$$\theta = r dp / 2 dx, \quad (8.2)$$

При $r = R$ дотичне напруження на стінці каналу дорівнює:

$$\theta_{CT} = R dp / 2 dx. \quad (8.3)$$

Рисунок 8.1 – Схема сил, які діють на елемент рідини

Тобто,

$$\theta = \theta_{CT} r / R. \quad (8.4)$$

Рівняння (8.4) показує лінійну залежність дотичних напружень в рідині від поточного радіусу незалежно від режиму потоку.

Об'ємна витрата рідини через елементарне кільце радіусами r та $r + dr$

$$dQ = u \cdot 2\pi r dr,$$

де u - швидкість рідини на відстані r від осі каналу, м/с.

Загальна витрата рідини в каналі

$$Q = \pi \int_0^R u \cdot 2r dr,$$

але $d(r^2) = 2r dr$, тому

$$Q = \pi \int_0^{R^2} u dr^2.$$

Інтегруючи, отримали:

$$Q = \pi \left[ur^2 - \int r^2 du \right]_0^{R^2}. \quad (8.5)$$

Було припущене, що проковзання рідини відносно стінки каналу відсутнє, тому $ur^2 = 0$. Ламінарність потоку, який розглядається, та постійність параметрів рідини у часі дозволяють отримати залежність

$$du = -f(\theta) dr.$$

З виразу (8.4)

$$r^2 = R^2 \theta^2 / \theta_{CT}^2; \quad dr = R d\theta / \theta_{CT}.$$

Підставивши ці значення у рівняння (8.5), отримали:

$$Q = \pi \int_0^{\theta_{CT}} R^2 \theta^2 / \theta_{CT}^2 f(\theta) R d\theta / \theta_{CT}$$

або

$$Q / \pi R^3 = 1 / \theta_{CT}^3 \int_0^{\theta_{CT}} \theta^2 f(\theta) d\theta. \quad (8.6)$$

Це рівняння було отримане незалежно Рабиновичем, Муні та Шоффільдом та використовується для знаходження залежності об'ємної витрати рідини від напору при використанні відповідної функції $f(\theta) = -du/dr$ з наступним інтегруванням.

Наприклад, для ньютонівської рідини

$$\theta = \eta(-du/dr) \text{ або } -du/dr = \theta/\eta = f(\theta).$$

Підставивши значення $f(\theta)$ у рівняння (3.6), отримали відоме рівняння Пуазейля:

$$Q = \pi R^4 \Delta p / 8\eta L, \quad (8.7)$$

де Δp - перепад тиску, Па; L - довжина циліндричного каналу, м.

Підставивши у рівняння (8.6) вираз $f(\theta) = (\theta - \theta_0) / \eta_{пл}$, який справедливий для течії бінгамовського реологічного тіла, та проінтегрувавши, отримали формулу Букінгема:

$$\begin{aligned} Q / \pi R^3 &= 8Q / \pi D^3 = (1/4)(8\nu/D) = \\ &= (\theta_{СТ} / 4\eta_{пл}) \cdot [1 - (4/3)(\theta_0 / \theta_{СТ})] + (1/3)(\theta_0 / \theta_{СТ})^4. \end{aligned} \quad (8.8)$$

де ν - швидкість потоку рідини, м/с.

У консистентних змінних Рейнера P та V рівняння (8.8) можна записати у вигляді:

$$V = (P / \eta_{пл}) \cdot [1 - (4/3)(\theta_0 / P)] + (1/3)(\theta_0 / P)^4. \quad (8.9)$$

Якщо не враховувати доданок $(1/3)(\theta_0 / \theta_{СТ})^4$ рівняння 3.8, що значно полегшує розв'язання задачі, то помилка складає 5,9% при $(\theta_0 / \theta_{СТ}) = 0,5$ та 1,5% при $(\theta_0 / \theta_{СТ}) = 0,4$. Тоді наближена формула Букінгема набуває вигляд:

$$8\nu/D = (1/\eta_{пл})(\theta_{СТ} - 4\theta_0/3). \quad (8.10)$$

За експериментальною кривою залежності $8\nu/D$ від $\theta_{СТ}$ можна визначити значення $\eta_{пл}$ та θ_0 .

Рівняння Букінгема застосовується тільки для ламінарного потоку, який для бінгамовських матеріалів характеризується наступною умовою:

$$N_{Re} = D\nu\rho / \eta_{ЕФ} < 2100, \quad (8.11)$$

де N_{Re} - число Рейнольдса; ρ - щільність рідини, кг/м³; $\eta_{ЕФ}$ - ефективна в'язкість, Па·с.

$$\eta_{E\Phi} = \theta_0 D / 6\nu + \eta_{ПЛ} , \quad (8.12)$$

Об'ємна витрата рідини за законом Оствальда де Віля, виражається формулою:

$$Q = \left[n \pi R^3 \dot{\gamma} / (3n + 1) \right] (R \Delta p / 2 \eta \dot{\gamma} L)^{1/n} , \quad (8.13)$$

де Q - витрата матеріалу, м³/с; n - індекс течії; R , L - радіус і довжина каналу, м; Δp - перепад тиску, Па; η - в'язкість матеріалу, Па·с.

У рівнянні (8.13) не врахований вплив опору на вході в канал та виході з нього, що особливо важливо враховувати при розрахунку течії вздовж коротких каналів. Наявність цього ефекту пояснюють різницею швидкості часток матеріалу на ділянках входу та виходу від швидкості усталеної течії в самому каналі.

Запропоноване повний перепад тиску при течії матеріалу, який описується степеневим законом, з урахуванням поправок на витрати тиску при вході та виході, розраховувати за формулою:

$$\Delta p = \left[Q(3n + 1) / (\pi n R^3 \dot{\gamma}) \right]^n 2 \eta \dot{\gamma} (L + N \cdot 2R) / R , \quad (8.14)$$

де N - поправка на місцеві опори, яка дорівнює кількості діаметрів каналу (визначається експериментально за методом Беглі).

Досліди з цукерними масами показали, що кінцеві витрати значно зростають зі зростанням швидкості зсуву до 4 с⁻¹, при подальшому зростанні швидкості витрати змінюються незначно [29]. Поправка на опір при вході в канал матриці для формування в діапазоні значень швидкості зсуву від 2 до 14 с⁻¹ змінюється в межах 1,2 – 2,1. Опір на виході з каналу при збільшенні швидкості зсуву зростає незначно. Тобто, отримані дані підтверджують той факт, що кінцеві витрати тиску оказують значний вплив на результати розрахунків каналів, які мають порівняно невелике відношення довжини до діаметру.

Необхідною умовою справедливості наведених формул для розрахунку течії вздовж каналів аномально в'язких дисперсних систем є ізотермічність та стійкість процесу, а також прилипання шару матері-

алу до стінок. Пристінні явища, які відмічені при течії великої групи дисперсних систем різної природи, викликані специфічними властивостями цих мас та вносять суттєві поправки в методику розрахунку. Наявність та величина пристінного ковзання залежить як від реологічних властивостей матеріалу, його жирності, вологості та температури, так і від умов процесу течії, швидкості потоку, діаметру каналу.

Об'ємні витрати псевдопластичної маси при течії її вздовж каналу круглого перерізу з ковзанням визначається за формулою:

$$Q = \pi R^2 \left\{ K_{OK} (R/2) (\partial p / \partial z) + [R \dot{\gamma} / (3n + 1)] [(R/2 \eta \dot{\gamma}) (\partial p / \partial z)]^{1/n} \right\}, \quad (8.15)$$

де K_{OK} - коефіцієнт опору ковзанню, м/(с·Па); $(\partial p / \partial z)$ - градієнт тиску по довжині каналу, Па/м.

Рівняння (8.15) отримане при умові, що матеріал при течії вздовж каналу проковзає по його стінкам зі швидкістю, яка дорівнює:

$$v_{OK} = K_{OK} \theta. \quad (8.16)$$

Для реологічної моделі Гершеля – Балклі витрати можна визначити за рівнянням:

$$\begin{aligned} Q / \pi R^3 = & \left[(\theta_{CT} - \theta_0)^{m+1} / K \theta_{CT}^3 \right] \times \\ & \times \left[(\theta_{CT} - \theta_0)^2 / (m + 3) + 2 \theta_0 (\theta_{CT} - \theta_0) / (m + 2) + \theta_0^2 / (m + 1) \right], \quad (8.17) \end{aligned}$$

де $m = 1/n$ - коефіцієнт, оборотний індексу течії; K - коефіцієнт консистенції.

8.1.2 Течія між плоскими паралельними пластинами

Був розглянутий потік неньютонівської рідини у напрямку осі x між плоскими взаємно паралельними нескінченно широкими пластинами (рисунок 8.2) [2]. Прийняті наступні припущення: рідина знаходиться в усталеному ламінарному русі; реологічні властивості рідини не змінюються у часі; рідина не проковзує відносно поверхні пластин; крайовими ефектами зневажаємо.

Рівняння, аналогічні (8.2) – (8.4), дозволяють встановити, що

$$\theta_{CT} = H\Delta p/2L$$

та

$$(8.18)$$

$$\theta_{yx} = h\Delta p/L = \theta_{CT}h/(H/2).$$

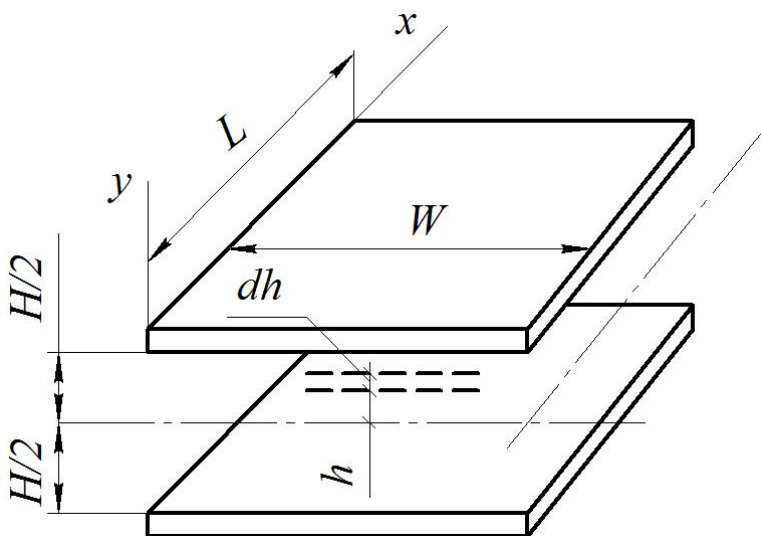


Рисунок 3.2 – Схема потоку рідини між плоскими пластинами

Залежності (8.18) показують лінійний розподіл напружень по товщині потоку від нуля у серединній площині до θ_{CT} на поверхні пластины при $H/2$ незалежно від режиму течії.

Об'ємні витрати знаходять аналогічно розв'язанню задачі течії рідини в круглому каналі. У загальному вигляді вони дорівнюють:

$$Q/WH^2 = [1/(2\theta_{CT}^2)] \int_0^{\theta_{CT}} \theta_{yx} f(\theta_{yx}) d\theta_{yx}. \quad (8.19)$$

За рівнянням (8.19) можна знайти залежність між Q та Δp для будь-яких рідин, якщо підставити в нього відповідну функцію $f(\theta_{yx}) = -du/dh$ (де u - швидкість рідини на висоті h , м/с).

Наприклад, для бінгамовської рідини:

$$Q/WH^2 = (\theta_{CT}/6\eta_{пл}) [1 - 3/2(\theta_0/\theta_{CT}) + 1/2(\theta_0/\theta_{CT})^3]. \quad (8.20)$$

Для реологічного тіла Гершеля – Балклі:

$$Q/WH^2 = \left\{ (\theta_{CT} - \theta_0)^{m+1} / [2(m+1) \times K \theta_{CT}] \right\} \times \left\{ 1 - (\theta_{CT} - \theta_0) / [(m+2)\theta_{CT}] \right\}. \quad (8.21)$$

8.1.3 Течія у прямокутному каналі

Для визначення витрат рідини через канали прямокутного перерізу шириною W та висотою H використовують рівняння Буссинеска, яке являє собою розв'язання диференційного рівняння Нав'є – Стокса, застосовуючи його до ньютонівської рідини [2].

$$Q = WH^3 \Delta p F_p / 12 \eta L . \quad (8.22)$$

Коефіцієнт форми F_p визначається виразом:

$$F_p = \left[1 - \frac{192 H/W}{\pi^5} \sum_{g=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{g^5} \times th \left(\frac{g\pi}{2H/W} \right) \right] . \quad (8.23)$$

Таблиця 8.1 - Значення F_p

H/W	0	0,2	0,4	0,6	0,8
F_p	1	0,88	0,75	0,63	0,42

У таблиці 8.1 наведені значення F_p у залежності від H/W .

Застосувавши метод ефективної в'язкості, можна записати

$$\Delta p = 12 \eta_{E\Phi} L Q / WH^3 F_p . \quad (8.24)$$

Ефективну в'язкість при наявності реологічного рівняння можна визначити, якщо знайти ефективну швидкість зсуву за формулою:

$$\dot{\gamma}_{E\Phi} = 6Q / WH^2 . \quad (8.25)$$

Для мас, течія яких описується рівнянням Бінгама, ефективна в'язкість дорівнює:

$$\eta_{E\Phi} = \eta_{ПЛ} + \theta_0 / \dot{\gamma}_{E\Phi} . \quad (8.26)$$

Перетворюючи рівняння (8.24), отримали:

$$\Delta p = 12 \eta_{E\Phi} L Q / WH^3 F_p + 2L \theta_0 / F_p H . \quad (8.27)$$

За формулою 8.27 розраховують витрати тиску вздовж прямокутного каналу.

Квазітверде ядро перерізу потоку в'язко – пластичного матеріалу Бінгама обмежене лінією, еквідінсантною контуру каналу [19]. Якщо вздовж каналу (ось z) рухається жорстке ядро прямокутного перерізу зі сторонами W_0 та H_0 , тоді зону жорсткого ядра знаходять за виразом:

$$W_0 = 1/2 \left[-(C_0 - 4A) + \sqrt{(C_0 - 4A)^2 + 8AC_0} \right], \quad (8.28)$$

де $C_0 = H - W$; $H_0 = C + W_0$; $A = \theta_0 (\partial p / \partial z)$.

Закон змінення швидкості потоку визначається розв'язанням диференціального рівняння одномірного руху при граничних умовах: $y = H_0/2$; $\partial v / \partial y = 0$; $y = H/2$; $v = v_{ков}$, де v - швидкість матеріалу у напрямку осі z , м/с; $v_{ков}$ - швидкість ковзання матеріалу відносно стінки каналу, м/с.

Загальний вираз швидкості в'язко – пластичної маси:

$$v_0 = v_{ков} + (1/\eta_{пл}) (\partial p / \partial z) (H - H_0)^2 / 8. \quad (8.29)$$

Витрати бінгамовського матеріалу крізь поперечний переріз прямокутного каналу:

$$Q = v_0 W_0 H_0 + v_{ков} (WH - W_0 H_0) + (1/12 \eta_{пл}) (\partial p / \partial z) \left\{ W (H_0^3 - H^3) + H_0 (W_0^3 - W^3) + 3H_0 W [W_0 (W - W_0) + H (H - H_0)] \right\}. \quad (8.30)$$

Витрати матеріалу, течія якого описується рівнянням Гершеля – Балклі:

$$Q = v_{ков} WH + \frac{1}{K(m+1)} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^m \times \left\{ \left(\frac{H - H_0}{2} \right) W_0 H_0 + 2W \left[\left(\frac{H - H_0}{2} \right)^{m+2} - \frac{1}{m+2} \left(\frac{H}{2} - H_0 \right)^{m+2} \right] + 2H_0 \left[\left(\frac{H - H_0}{2} \right)^{m+1} \left(\frac{W - W_0}{2} \right) - \frac{1}{m+2} \left(\frac{W - W_0 - H_0}{2} \right)^{m+2} \right] \right\}. \quad (8.31)$$

Оскільки питання течії неньютонівських матеріалів у каналах прямокутного перерізу є складними, то наведені рівняння дозволяють розв'язати задачу тільки у першому наближенні, що дає можливість з достатньою для практики точністю проводити розрахунки.

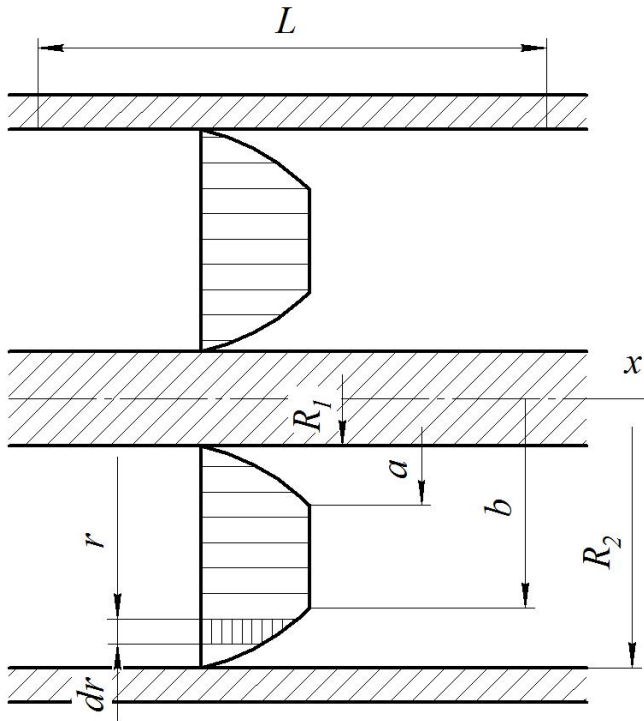


Рисунок 8.3 – Схема потоку матеріалу в кільцевому перерізі каналу

8.1.4 Течія в каналі кільцевого перерізу

Розглянута течія бінгамовського матеріалу у кільцевому просторі між двома концентричними циліндрами без ковзання відносно стінок каналу (рисунок 8.3) [55]. В зоні, яка обмежена радіусами a та b , матеріал рухається подібно твердому тілу (при $\theta < \theta_0$). В зонах при $R_1 < r < a$ та $b < r < R_2$ відбувається в'язка течія. Загальні витрати Q при заданому Δp визначають як суму витрат у трьох кільцевих перерізах між R_1 та a , b і R_2 , a та b :

$$Q = 2\pi \int_{R_1}^a r u dr + 2\pi \int_b^{R_2} r u dr + 2\pi u_T \int_a^b r dr, \quad (8.32)$$

де u - поточна швидкість матеріалу в зонах в'язкої течії, м/с;

u_T - швидкість квазітвердого потоку, м/с.

Підставивши значення швидкостей у рівняння (8.32) та інтегруючи, отримали:

$$Q = (2\pi/\eta_{\text{пл}}) [(\Delta p/16L)(R_2^4 - R_1^4) + (\Delta p/16L)(b^4 - a^4)] (2\pi\theta_0/\eta_{\text{пл}}) \times \quad (8.33) \\ \times [(a^3 + b^3)/6 - (R_1^3 + R_2^3)/6] + [(2\pi/\eta_{\text{пл}})/\ln(aR_2/bR_1)] [(\Delta p/16L)(R_2^2 - R_1^2)^2 + \\ + (\theta_0/8)(a+b)(b^2 - a^2) + (\theta_0/4)(R_1 + R_2)(R_2^2 - R_1^2) - (\theta_0/4)(R_1 + R_2)(b^2 - a^2)].$$

Вираз (8.33) дозволяє побудувати графік залежності Q від Δp для даного бінгамовського матеріалу. Для цього спочатку задаються відношенням a/b та виражають a через b . Потім підставляють ці значення разом з R_1 та R_2 у рівняння

$$ab = [1/\ln(aR_2/bR_1)] \times \left[(R_2^2 - R_1^2/2) + (b^2 - a^2)/2 - (b-a)(R_1 + R_2) \right] \quad (8.34)$$

та розв'язують його відносно a та b .

Перепад тиску Δp визначається за формулою:

$$\Delta p = 2L\theta_0/(b-a). \quad (8.35)$$

Об'ємні витрати Q по знайденим значенням a , b та Δp можна визначити за рівнянням (8.33). Таким же чином знаходиться Q для інших значень відношення a/b . Після чого будується графік залежності Q від Δp .

При високих значеннях Δp зона квазітвердої течії стає настільки малою, що нею можна знехотити, прийнявши $b = a$.

Тоді вираз (8.34) буде мати вигляд:

$$r_0^2 = (R_2^2 - R_1^2)/[2\ln(R_2/R_1)]. \quad (8.36)$$

Для цього випадку витрати дорівнюють:

$$Q = (\pi/8\eta_{III}) \left\{ (\Delta p/L) \left[(R_2^4 - R_1^4) - (R_2^2 - R_1^2)/\ln(R_2/R_1) \right] - (8\theta_0/3) \left[R_1^3 + R_2^3 + 4r_0^3 - 3r_0^2(R_1 + R_2) \right] \right\}. \quad (8.37)$$

Для ньютонівських матеріалів при $\theta_0 = 0$ та $\eta_{III} = \eta$ рівняння (8.37) має вигляд:

$$Q = (\pi\Delta p/8\eta L) \left[(R_2^4 - R_1^4) - (R_2^2 - R_1^2)^2/\ln(R_2/R_1) \right]. \quad (8.38)$$

8.1.5 Течія у віскозиметричних системах

Найбільш часто в експериментальній практиці для зібрання інформації про реологічні властивості харчових мас використовуються три типи віскозиметрів. Більш докладний опис теорії та практики вимірювань з використанням віскозиметрів наведений в роботах [4]. Для ньютонівських рідин реометрія обмежується простими експериментами, для неньютонівських матеріалів експерименти достатньо складні. Реологічна поведінка ньютонівських рідин, які не стискаються, визначається одним параметром – в'язкістю, яка для даного матеріалу є функцією тільки температури і тиску та визначається за законом Хагена – Пуазейля. Головною задачею реометрії неньютонівських матеріалів, до яких відносяться майже всі харчові маси, є вимірювання швидкості зсуву (напруження) у залежності від напруження зсуву (швидкості) та побудова кривих течії.

У капілярних віскозиметрах для усталеного ламінарного потоку матеріалу напруження на стінці каналу дорівнює [186]:

$$\theta_{CT} = D\Delta p/4L, \quad (8.39)$$

де D - діаметр каналу, м; L - довжина каналу, м; Δp - перепад тиску на довжині L , Па.

Швидкість зсуву у стінці каналу при відсутності проковзування визначається за рівнянням Рабіновича – Муні:

$$\dot{\gamma}_{CT} = (8\nu/D)(3n' + 1)/4n' = \dot{\gamma}(3n' + 1)/4n', \quad (8.40)$$

де $n' = \partial \ln(D\Delta p/4L)/\partial \ln(8\nu/D)$ та $\dot{\gamma} = 8\nu/D$.

Для ньютонівського матеріалу $n' = 1$.

За вимірюваними величинами θ_{CT} і $\dot{\gamma}$ будується графік залежності θ_{CT} від $\dot{\gamma}$ у логарифмічних координатах та визначається n' . Показник n' характеризує тип течії. Якщо n' є величиною постійною, то він співпадає з показником n степеневого закону. Рівняння (8.40) використовується для знаходження істинної швидкості на стінці $\dot{\gamma}_{CT}$, ефективна в'язкість визначається за формулою:

$$\eta_{E\Phi} = \theta_{CT} / \dot{\gamma}_{CT}, \quad (8.41)$$

При відсутності ковзання матеріалу відносно стінок каналу швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ є однозначною функцією θ_{CT} , тобто криві залежності θ_{CT} від $\dot{\gamma}$, які отримані для капілярів різного радіусу, співпадають. При наявності ковзання криві будуть зсунуті відносно одна однієї. Швидкість ковзання дорівнює:

$$v_{ков} = v \left[(1/n') - \partial \ln \dot{\gamma} / \partial \ln \theta_{CT} \right], \quad (8.42)$$

де $v_{ков}$ - швидкість ковзання на стінці капіляру, м/с; v - середня швидкість потоку, м/с.

Наведені рівняння справедливі для дуже довгих капілярів (при $L/D \gg 100$), оскільки вони не враховують можливих крайових ефектів. Окрім цього похибки у вимірюваннях виникають у результаті ефективного ковзання матеріалу відносно стінок капіляру, виникненню турбулентного режиму, впливу кінетичної енергії.

Крайові ефекти обумовлені збурювальною дією кінців капіляру, різким змінням площі перерізу потоку на вході у канал та виході з нього, що змінює швидкості часток матеріалу на цих ділянках. Беглі запропонував вводити корегування на довжину капіляру. При цьому розрахункова довжина капіляру збільшується на $\Delta L = NR$.

Для визначення N необхідно провести ряд вимірювань перепаду тиску Δp та витрат Q у капілярах з різним відношенням L/R .

Ці вимірювання дозволяють побудувати графік залежності L/R від Δp при $8v/D = const$, яка повинна мати лінійний характер при відсутності ковзання біля стінок та тиксотропного ефекту (рисунок 8.4). N - відрізок, який пряма $L/R = f(\Delta p)$ відсікає від осі ординат. При наступних розрахунках θ_{CT} використовують величину $(L + NR)$.

У деяких неньютонівських матеріалах швидкість біля вимірювальної поверхні віскозиметру викликає особливу орієнтацію часток, внаслідок якої в двофазних системах дисперсійне середовище утворює мастильний шар між рідиною та твердою стінкою, оскільки частки дисперсійного середовища прямують відійти від твердої стінки.

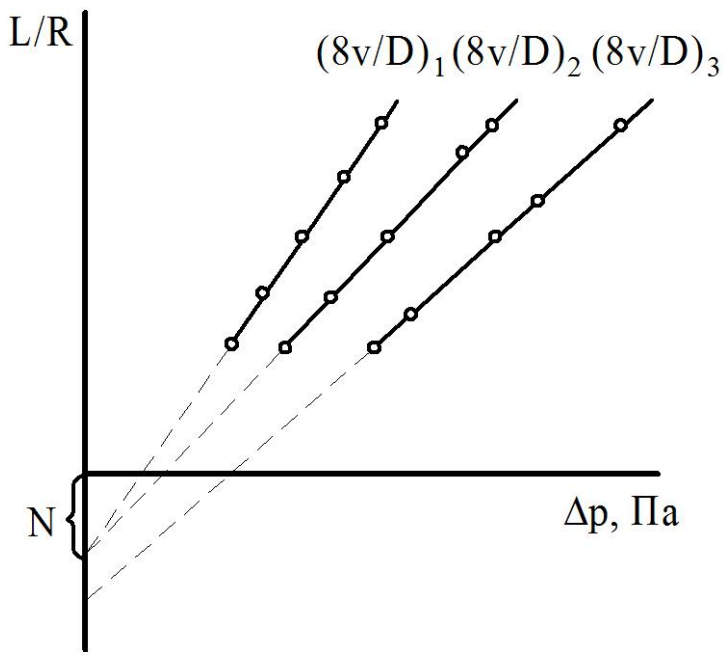


Рисунок 8.4 – Залежність L/R від перепаду тиску при постійній швидкості зсуву

В наслідок цього на приборі у дійсності визначається в'язкість дисперсійного середовища замість в'язкості матеріалу, який досліджується. Тому цей ефект викликає зменшення в'язкості аналогічно тому, як відбувається при дійсному ковзанні. Це явище відомо як або пристінне ковзання. При наявності пристінного ковзання криві течії будуть залежати від розмірів прибору. Пристінне ковзання визначається швидкістю, яка розраховується за формулою (8.42).

Тоді дійсні об'ємні витрати (в $\text{м}^3/\text{с}$) будуть дорівнювати:

$$Q_D = Q_E - \beta \theta_{CT} \pi R^2, \quad (8.43)$$

де Q_E - об'ємні витрати з урахуванням пристінного ковзання $\text{м}^3/\text{с}$, які отримані експериментально; β - коефіцієнт ковзання, що дорівнює:

$$\beta = d \ln v_{ков} / d \ln \theta_{CT}, \quad (8.44)$$

Швидкість зсуву визначається аналогічно виразу (8.40):

$$\dot{\gamma}_{CT} = [(3n' + 1)/4n'] 32 Q_D / \pi D^3. \quad (8.45)$$

Таким чином, знаючи θ_{CT} та $\dot{\gamma}_{CT}$, можна отримати криву течії та визначити ефективну в'язкість матеріалу навіть при наявності його ковзання відносно стінки капіляру.

Для побудови кривих течії та визначення в'язкості необхідні експерименти в умовах ламінарного режиму течії. Критерієм визначення ламінарного режиму являється число Рейнольдса.

У класичної гідромеханіці є співвідношення між коефіцієнтом гідравлічного опору та числом Рейнольдса:

$$f = \Delta p R / \rho v^2 L = 8 / \text{Re}, \quad (8.46)$$

звідкіля критичне число Рейнольдса дорівнює

$$\text{Re}_{кр} = \rho v^{2-n'} D^{n'} / K' \cdot 8^{n'-1}, \quad (8.47)$$

де $K' = K[(3n+1)/4n]^n$, K - коефіцієнт консистенції; n - індекс течії.

Встановлене, що при $n \rightarrow 1$ турбулентний режим настає для значень $\text{Re} > 2100$.

На вході у капіляр матеріал набуває деяку кількість кінетичної енергії за рахунок енергії тиску, тому при розрахунках необхідно враховувати цю втрату енергії тиску. Дійсний перепад тиску:

$$\Delta p = \Delta p_B - \rho Q^2 / \alpha' \pi R^4, \quad (8.48)$$

де Δp , Δp_B - відповідно дійсний та виявлений перепади тиску, Па;

α' - коефіцієнт кінетичної енергії потоку, який залежить від закону розподілу швидкостей вздовж перерізу.

Для ньютонівських рідин, які мають параболічний розподіл швидкості, при ламінарній течії α' дорівнює одиниці. Для рідин, що підпорядковані степеневому закону, при течії вздовж труби круглого перерізу коефіцієнт α' визначається за формулою:

$$\alpha' = (4n+2)(5n+3)/3(3n+1)^2, \quad (8.49)$$

для бінгамовських рідин

$$\alpha' = 2/(2 - \theta_0/\theta). \quad (8.50)$$

Для приборів з коаксіальними циліндрами напруження θ та швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ визначаються виразами [39]:

$$\theta = M/2\pi R_1^2 h; \quad \dot{\gamma} = 2\omega/(1 - S^2), \quad (8.51)$$

де M - крутячий момент, Н·м; R_1 - радіус ротору, м; h - висота рідини у ротора, м; ω - кутова швидкість ротора с^{-1} ; $S = R_2/R_1$ - відношення радіусу зовнішнього циліндру до радіусу внутрішнього циліндру ротору.

У виразах (8.51) немає параметрів, які характеризують природу рідини, оскільки вони отримані для ньютонівських рідин та залежать тільки від розмірів циліндрів віскозиметру. Але, якщо розглядати течію неньютонівських матеріалів, тоді в'язкість, як відомо, при заданих температурі та тиску не залишається незмінною, а залежить від швидкості зсуву та деформації матеріалу.

При вивченні реологічних властивостей неньютонівських матеріалів використовують вирази (8.51) для визначення не дійсної, а ефективної в'язкості, оскільки це буде ньютонівська в'язкість при визначених значеннях напруження та швидкості зсуву. Окрім того, наявність неоднорідного напруженого стану в зазорі між циліндрами (особливо при значному зазорі) ускладнює обробку дослідних даних, оскільки невідоме дійсне значення швидкості зсуву в коаксіально – циліндричних шарах неньютонівських матеріалів. Тому в задачу дослідників входить знайдення величини швидкості зсуву у будь – якому коаксіально – циліндричному шарі, що тече, радіусу r при різних значеннях кутової швидкості ω .

Отримане асимптотичне розв'язання для визначення швидкості зсуву в ротаційному віскозиметрі:

$$\dot{\gamma} = (\omega/\ln S) \left\{ 1 + m \ln S + (1/3)(m \ln S)^3 + [(\ln S)^2/2] (dm/d \ln \theta) + \dots \right\}, \quad (8.52)$$

де $m = d \ln \omega / d \ln \theta$.

При умові $m \ln S = 0,2$ третій та наступні члени ряду можна відкинути, похибка у цьому випадку не перевищить 1%.

При $S \leq 1,75$ справедливе рівняння:

$$\dot{\gamma} = 4\pi C_R / (1 - S^{-2}), \quad (8.53)$$

$$\text{де } C_R = 1 + \left[\frac{S^2 - 1}{2S^2} \right] \left[\frac{1}{n''} - 1 \right] \times \\ \times \left[1 + \frac{2}{3} \ln S + \frac{1}{3} \gamma - \frac{1}{45} \gamma^3 + \frac{2}{945} \gamma^5 - \frac{1}{4725} \gamma^7 + \dots \right]; \\ \gamma = \left[\frac{1}{n''} - 1 \right] \ln S; \quad n'' = d \ln M / d \ln \omega.$$

Значення коефіцієнта C_R для деяких S та n'' наведені в таблиці 8.2. Визначивши \mathcal{U} та знаючи θ , можна отримати криву течії.

Якщо зазор між циліндрами віскозиметру дуже маленький (при $S \rightarrow 1$, тоді

$$\dot{\gamma} = 2\pi R \omega / (R_2 - R_1). \quad (8.54)$$

Для випадку течії матеріалу, який підкоряється степеневому закону

$$\omega = (n/2) \dot{\gamma} \left[1 - (r/R)^{2/n} \right], \quad (8.55)$$

де r - поточний радіус, м.

Для побудови кривих течії прийнято визначати θ та $\dot{\gamma}$ на поверхні внутрішнього ротору, що обертається. З рівняння (8.55) при

$$r = R_1 \text{ отримали:}$$

$$\dot{\gamma} = 2\omega/n \left[1 - S^{2/n} \right]. \quad (8.56)$$

Таблиця 8.2 – Залежність коефіцієнта C_R від S та n''

n''	Значення S					
	1,07	1,15	1,166	1,25	1,4	1,746
0,05	2,722	4,999	5,435	-	-	-
0,10	1,708	2,617	2,801	3,735	5,184	-
0,20	1,287	1,622	1,689	2,031	2,593	3,615
0,30	1,162	1,342	1,377	1,554	1,843	2,382
0,40	1,102	1,213	1,234	1,340	1,511	1,826
0,60	1,045	1,091	1,100	1,144	1,212	1,335
0,80	1,017	1,034	1,037	1,053	1,077	1,119
1,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2,00	-	-	0,929	-	0,857	0,785
3,00	-	-	0,906	-	0,812	0,720
4,00	-	-	0,894	-	0,791	0,689

Рівняння (8.55) та (8.56) показують, що змінення швидкості зсуву в зазорі залежить від індексу течії n даного матеріалу. При $n = 1$ рівняння (8.56) перетворюється у вираз (8.51), який застосовується для ньютонівських рідин.

Для того, щоб при побудові кривих течії використовувати рівняння (8.56), необхідно знати величину індексу течії, але безпосередньо визначити її неможливо. Тому на віскозиме-

трах визначають $\dot{\gamma}$ за виразом (8.51), оскільки невідомо, до якого класу тіл відноситься даний матеріал.

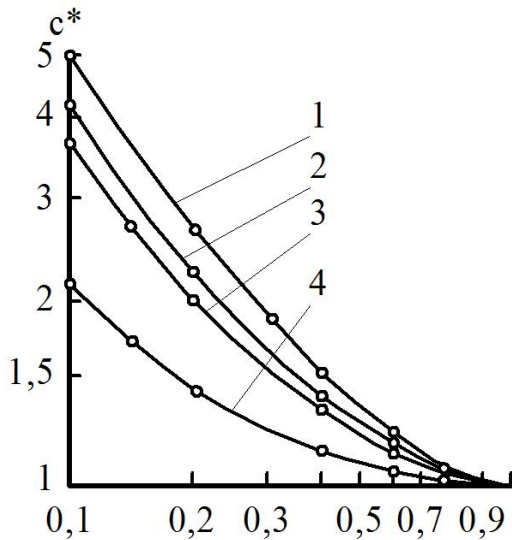


Рисунок 8.5 – Залежність коефіцієнту c^* від індексу течії при S :
 1 – 1,43; 2 – 1,32;
 3 – 1,25; 4 – 1,11

Відомо, що у логарифмічних координатах криві течії псевдопластичних матеріалів мають лінійний вигляд. З цього можна вважати, що тангенс кута нахилу кривих течії, отриманих з виразів (8.51) та (8.56), однаковий, тобто

$$\dot{\gamma}_d = c^* \dot{\gamma}, \quad (8.57)$$

де $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, знайдена за рівнянням (3.51), c^{-1} ; $\dot{\gamma}_d$ – дійсна швидкість зсуву для даного неньютонівського матеріалу, c^{-1} ; c^* – коефіцієнт пропорційності, який залежить від індексу течії та відношення радіуса зовнішнього циліндру до внутрішнього (рисунок 8.5).

Таким чином, спочатку визначають величину n по нахилу кривої течії, яка побудована у логарифмічних координатах за допомогою виразу (8.51). Потім, підставивши знайдене значення n у рівняння (8.56), визначають величину $\dot{\gamma}$ у залежності від ω та будують дійсну криву течії матеріалу, який досліджується.

Рівняння, яке описує поведінку бінгамовського тіла в ротаційному віскозиметрі:

$$\omega = (1/2)(\theta/\eta_{пл}) \left[(1/R_1^2) - (1/R_2^2) \right] - (\theta_0/\eta_{пл}) \ln(R_2/R_1). \quad (8.58)$$

Подібне рівняння отримують і для моделі Гершеля-Балклі, тільки замість $\eta_{пл}$ підставляють K .

Якщо зазор між циліндрами дуже маленький ($S \rightarrow 1$), тоді швидкість зсуву можна визначити за спрощеною формулою:

$$\dot{\gamma} = 2\pi R \omega / (R_2 - R_1). \quad (8.59)$$

Віскозиметри з малим зазором не можуть застосовуватися для матеріалів, розмір часток якого сумірний з зазором.

Різновидністю ротаційного віскозиметру є прибор зі значно меншим ротором, ніж діаметр сосуду з матеріалом, тобто ротор обертається нібито у «нескінченному середовищі».

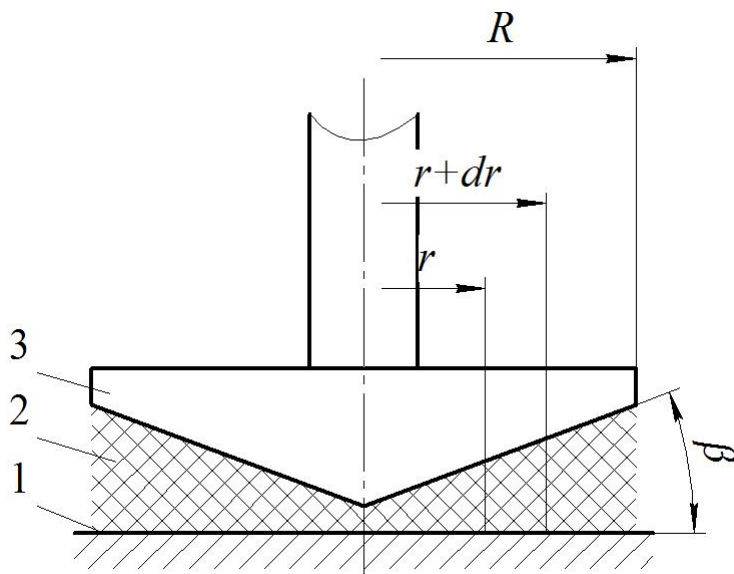


Рисунок 8.6 – Схема віскозиметра «конус – площина»

обертається, вершина якого майже лежить на пластині. Матеріал 2, що досліджується, знаходиться у просторі між конусом та пластиною, кут між якими малий та знаходиться в межах від 1 до 5°.

Якщо конус обертається з постійною швидкістю ω , то швидкість зсуву та напруження в матеріалі дорівнюють:

$$\dot{\gamma} = \omega/\beta ; \quad \theta = 3M/2\pi R^3 . \quad (8.61)$$

По різним значенням θ та $\dot{\gamma}$ отримують криву течії, за якою знаходять ефективну в'язкість матеріалу.

Перевагою віскозиметрів типу «конус – площина» в тому, що при достатньо малих кутах β напруження та швидкість зсуву залишаються незмінними по всьому об'єму матеріалу. Це особливо важливо при вивченні реологічних властивостей харчових матеріалів, в'язкість яких залежить від швидкості зсуву.

Іншим типом віскозиметру є система взаємно паралельних співвісних дисків, між якими виникає зсувна течія. Швидкість зсуву в

Напруження зсуву визначається за рівнянням (8.51), а швидкість зсуву - за формулою:

$$\dot{\gamma} = 4\pi\omega/n'' . \quad (8.60)$$

Рівняння (8.60) справедливе для всіх рідин, властивості яких не залежать від часу.

Основними деталями віскозиметру «конус – площина», схема якого наведена на рисунку 8.6, є горизонтальна пластина – основа 1 та конус 3, що

будь-якої точці матеріалу є заданою функцією кутової швидкості ω диску, що обертається, та відстані a між дисками, тобто $\dot{\gamma} = \omega r/a$.

Питання для самоконтролю

1. На яких факторах базуються інженерні розрахунки процесів, що протікають в технологічних машинах?
2. Які основні обмеження застосовуються при розрахунку реального процесу течії?
3. Які рівняння використовують при розрахунках усталеної ламінарної течії в циліндричному каналі постійного радіусу?
4. Які припущення вводять при розгляданні потоку неньютонівської рідини між плоскими взаємно паралельними нескінченно широкими пластинами?
5. Як визначаються витрати рідини через канали прямокутного перерізу?
6. Які характеристики визначають при розгляданні течії бінгамовського матеріалу у кільцевому просторі між двома концентричними циліндрами без ковзання відносно стінок каналу?
7. Які характеристики використовують для розрахунків течії у віскозиметричних системах?

8.2 Течія харчових мас по коротким каналам.

Розрахунок пристрою для формування

Тиск, який має бути створений нагнітачем для здійснення процесу формування маси, знаходять за наступним рівнянням:

$$\Delta p_H = -\Delta p_{GP} + \sum \Delta p_{B.TEP} + \sum \Delta p_{M.O} + \Delta p_{OB} + \Delta p_{KIH} + \Delta p_{IH} + \Delta p_{PEL} \quad (8.62)$$

Перший член правої частини рівняння Δp_{GP} - складова гідростатичного тиску, яка враховує гравітаційний ефект стовпу маси. Вплив Δp_{GP} на процес течії особливо помітний при формуванні харчових мас, які володіють невеликою в'язкістю і відповідно великою текучістю.

Другий член рівняння $\sum \Delta p_{B.TEP}$ являє собою суму витрат тиску

на переборювання в'язкого тертя при течії маси, що формується, по ділянкам камери та каналам матриці.

Третій член рівняння $\sum \Delta p_{M.O}$ характеризує витрати тиску в місцях різкого змінення геометричних розмірів каналу або напрямку потоку. Витрати в місцевих опорах при течії конкретної пружно – пластично – в'язкої рідини можливо визначити тільки експериментально. Аналітичний розрахунок проводиться за спрощеними формулами для небагатьох випадків течії ньютонівських рідин.

Четвертий член рівняння Δp_{OB} залежить від об'ємної течії (стиску) маси, що формується, яку неминуче супроводжує зсувна течія:

$$\Delta p_{OB} = \eta \dot{\epsilon}_V, \quad (8.63)$$

де η - об'ємна в'язкість маси, Па·с; $\dot{\epsilon}_V$ - швидкість об'ємної деформації, с⁻¹.

П'ятий член рівняння $\Delta p_{КИН}$ характеризує витрати тиску на збільшення кінетичної енергії часток маси

$$\Delta p_{КИН} = \rho_{сер} (\alpha_2 \bar{V}_{z_2}^2 - \alpha_1 \bar{V}_{z_1}^2) / 2. \quad (8.64)$$

Величина α залежить від закону розподілу швидкостей V_z по перерізу. Для рідин, які підкоряються степеневому закону, при течії вздовж каналу круглого перерізу коефіцієнт α визначається рівнянням:

$$\alpha = 3(3n + 1)^2 / [(4n + 2)(5n + 3)]. \quad (8.65)$$

Шостий член рівняння Δp_{IH} характеризує інерційний напір

$$\Delta p_{IH} = \pm \rho_{сер} \sum L d \bar{V}_z / dt. \quad (8.66)$$

Δp_{IH} необхідно враховувати для процесів неусталеного руху, коли середня швидкість потоку є функцією часу. Величина Δp_{IH} залежить від змінення у часі кінетичної енергії маси рідини, яка розташована між перерізами потоку, які розглядаються.

Сьомий член рівняння Δp_{PEL} враховує втрати тиску в результаті процесу релаксації напружень. Ця величина залежить від властивостей матеріалу, що формується, які визначають швидкість релаксації, та часу знаходження матеріалу в приладі для формування t :

$$\Delta p_{PEL} = p_0 - f(p_0, t). \quad (8.67)$$

де p_0 - початковий тиск, Па.

При формуванні маса знаходиться під тиском, величина якого змінюється вздовж осі потоку в приладі, тому визначення дійсних втрат тиску в результаті релаксації викликає труднощі. Для практичних розрахунків за p_0 пропонується приймати середній тиск у приладі $p_H/2$ та вважати, що цей тиск релаксує на величину Δp_{PEL} .

Підставивши (8.67) у (8.62), можна записати, вважаючи під знаком суми доданки правої частини рівняння (8.62) без Δp_{PEL} :

$$p_H/2 = \sum \sum \Delta p - f(p_H/2, t). \quad (8.68)$$

Вирішивши рівняння (8.68) відносно p_H , можна визначити тиск, який необхідний для руху маси по камері та каналам матриці для формування. Течія мас у робочих каналах машин для формування ламінарна, оскільки маса має велику в'язкість та малу швидкість. При розв'язанні диференціальних рівнянь руху харчової маси вздовж каналів для формування використовують граничні умови, які відображають відсутність відносного проковзання матеріалу по стінкам каналів.

З'ясоване, що при течії вздовж коротких каналів (відношення довжини до діаметру менш, ніж п'ять) витрати тиску на кінцеві ефекти (вхід та вихід з каналу) складають суттєву долю загальних витрат на продавлення маси крізь відтвори для формування. Ці втрати враховують за допомогою емпіричних коефіцієнтів.

Розрахункова формула для визначення тиску формування в'язко-пластичних матеріалів в циліндричних каналах круглого перерізу має вигляд:

$$p = (2l\eta_{пл}/R + D)4Q/\pi R^3 + 8l\theta_0/3R + C, \quad (8.69)$$

де l та R - довжина та радіус каналу, м; Q - витрата маси, м³/с;

$\eta_{пл}$ -- пластична в'язкість, Па·с; θ_0 - граничне напруження зсуву, Па; D та C - емпіричні коефіцієнти, які враховують втрати тиску на вході в канал (таблиця 8.3).

Таблиця 8.3 – Емпіричні коефіцієнти для пресів при формуванні в кондитерському виробництві

Вид цукерок	Емпіричні коефіцієнти		Вид цукерок	Емпіричні коефіцієнти	
	C , Па	D , Па·с		C , Па	D , Па·с
«Батончики»	63700	2570,0	«Колос»	29400	77,0
«Московські»	17700	128,5	«Маска»	8630	82,1
«Чудесниця»	7850	102,8	«Хвиля»	9810	641,0
«Кара – Кум»	37300	1180,0	«Теніс»	2750	218,0

При розрахунку матеріалів, течія яких описується степеневим законом, запропоноване опір на вході та виході знаходити за методом Беглі. Повний перепад тиску при течії псевдопластичного матеріалу вздовж циліндричного каналу розраховується за формулою:

$$p = \left[Q(3n + 1) / \pi n R^3 \dot{\gamma}^0 \right]^n \cdot \left[2\eta_{\text{ЕФ}}^0 \dot{\gamma}^0 \cdot (l + N \cdot 2R/R) \right]. \quad (8.70)$$

Експериментально встановлено, що для кондитерських пресів у діапазоні швидкостей зсуву від 2 до 14 с⁻¹ величина поправки N змінюється від 1,57 до 2,7 діаметру каналу. Загальні втрати тиску в прямокутному каналі для формування при течії в'язко – пластичних мас складаються з суми лінійних втрат, та втрат на вході, тобто

$$p = \left[12l\eta_{\text{пл}} / (WH^3 F_p) + D \cdot 4\pi^2 / (H + W)^3 \right] Q + 2l\theta_0 / F_p + C. \quad (8.71)$$

де W та H - ширина та висота каналу, м; D та C - емпіричні коефіцієнти (як для формули (8.69)); F_p - коефіцієнт форми каналу, який залежить від відношення H/W (таблиця 8.5).

Вивчення руху в'язко – пластичною харчової маси у камері, що знаходиться перед матрицею, є однією зі складних та практично важливих задач. Ця задача пов'язана з необхідністю проведення розрахунків інструменту для формування, визначення його конфігурації.

Призначення камери, що знаходиться перед матрицею, в тому, щоб володіючи мінімальним опором, надати збуреному потоку прямолінійний рух та здійснити формування виробів визначених розмірів.

Розглянута течія в'язко – пластичної маси в циліндричній камері, що знаходиться перед матрицею, (рисунок 8.7) [30].

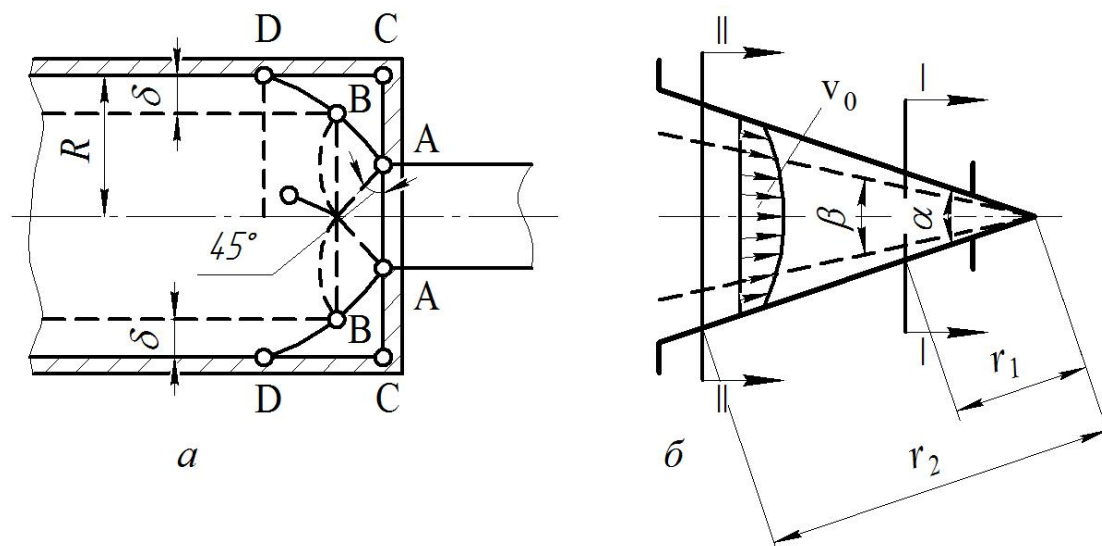


Рисунок 8.7 – Схеми течії в'язко – пластичної маси по циліндричній камері (а) та конічному каналу (б)

Видавлювання маси здійснюється у напрямку осі Z з редукування товщини в 50%. Змінення редукації товщини потоку не порушує загальності вирішення. На стінці камери виникає пограничний шар товщиною δ , де маса тече подібно в'язкій рідині, залишкова частина рухається як ідеально пластично тіло.

$$\delta = \eta_{пл} u / \theta_0, \quad (8.72)$$

де u - швидкість зовнішнього потоку, м/с.

Задачу вирішували за методом класичної теорії пограничного шару, тобто спочатку визначали течію у зовнішньому потоці, потім – течію у пограничному шарі; при цьому сполучали розв'язання на границі зовнішнього потоку з пограничним шаром.

На рисунку 8.7,а наведено пластичне поле напружень, яке припускається та складається з центрованих віял OAB та $OA'B'$, при виконанні умови, що лінії ковзання перетинають стінки камери та ось симетрії під кутом 45° . Маса, розташована поза віями, знаходиться

у жорсткому стані. Напруження, які відповідають цим лініям ковзання, визначаються з умов, що рівнодіюча напружень, які передаються через AOA' , дорівнює нулю.

Питома сила, яка повинна бути прикладена у напрямку осі z , для того, щоб здійснити видавлювання маси дорівнює:

$$p = (1 + \pi/2)/\theta_0 . \quad (8.73)$$

При розгляді течії маси необхідно враховувати, що швидкість внутрішнього потоку буде дорівнювати швидкості на зовнішній границі пограничного шару. Розв'язання рівняння руху маси в пограничному шарі для випадку плоскої течії при граничних умовах $y = R$ $\delta V_z = u$, при $y = R$ $V_z = 0$ має вигляд:

$$V_z = (1/\eta_{пл}) (\partial p / \partial z) [(y^2 - R^2)/2] - (y - R) \{u/\delta + (1/\eta_{пл}) (\partial p / \partial z) \times [(2R - \delta)/2]\}. \quad (8.74)$$

Епюра розподілу швидкостей від стінки камери до циліндричної поверхні радіусу ($R \rightarrow \delta$) має вигляд параболоїду обертання.

Тоді функція току має вигляд:

$$\psi = (1/\eta_{пл}) (\partial p / \partial z) (y^3/6 - R^2 y/2) - (y^2/2 - Ry) \times \{u/\delta + (1/\eta_{пл}) (\partial p / \partial z) [(2R - \delta)/2]\}. \quad (8.75)$$

Таким чином, при течії в'язко – пластичної маси у камері функція току описується прямим лініями ковзання $A'B'$ та AB , які переходять у кубічні параболу $B'D'$ та BD .

Вивчення роботи приладу для формування у виробничих умовах показало, що нерівномірність швидкості випресування джгутів маси обумовлена характером її течії у камері. На характер течії оказують вплив як робота нагнітачу, так і тертя в пограничному шарі, який прилягає до стінок камери.

На рисунку 8.7,а видно, що в циліндричній камері існують зони ($ABDC$ та $A'B'D'C'$), в яких маса застоюється. Ці мертві зони при формуванні мас значної в'язкості, а також при високому тиску можуть оказувати великий опір течії.

Була розглянута ізотермічна течія в'язко – пластичного середовища в конусі з кутом α , який наведено на рисунку 8.7,б. Вважали, що відбувається радіальна течія, тобто

$$v_\varphi = 0; \quad v_z = 0; \quad v_r = v(r, \varphi),$$

де v_φ , v_z , v_r - окружна, осьова та радіальна швидкості, м/с.

Диференціальне рівняння руху в циліндричних координатах у цьому випадку має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} -\partial p / \partial r + \eta_{пл} \left[\partial^2 v / \partial r^2 + (1/r^2) (\partial^2 v / \partial \varphi^2) + (1/r) (\partial v / \partial r) - v / r^2 \right] &= 0; \\ (1/r) (\partial p / \partial \varphi) + 2\eta_{пл} (1/r^2) (\partial v / \partial \varphi) &= 0; \quad \partial v / \partial r + v / r = 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.76)$$

Після перетворень отримали розв'язання рівнянь (8.76):

$$u = C_1 \cos 2\varphi + C_2 \sin 2\varphi + C_3 / 4. \quad (8.77)$$

Постійні інтегрування визначенні з граничних умов: при $\varphi = \alpha/2$ $u = 0$; при $\varphi = \beta/2$ $\partial u / \partial \varphi = 0$.

Секундна витрата середовища через будь-який поперечний переріз має постійне значення:

$$q = 2\pi r^2 \int_0^{\beta/2} u_0 \sin \varphi \cos \varphi d\varphi + 2\pi r^2 \int_{\beta/2}^{\alpha/2} u(\varphi) \sin \varphi \cos \varphi d\varphi, \quad (8.78)$$

де u_0 - швидкість жорсткого ядра при $\varphi = \beta/2$, м/с.

Визначивши постійні C_1 , C_2 , C_3 та підставивши в формулу (8.77), отримали:

$$u = q \cos(\beta - 2\varphi) / [B \sin \beta + A \cos \beta - 4k \cos(\alpha - \beta)], \quad (8.79)$$

де $A = \pi r^2 [\cos \beta \sin^2 \beta/2 + \sin^2 [(\alpha - \beta)/2]] \cos^2 [(\alpha - \beta)/2]$;

$B = \pi r^2 \sin \beta \sin^2 \beta/2 + 2\pi r^2 \{5/8(\alpha - \beta) + \sin(\alpha - \beta)[1/8 \cos(\alpha - \beta) - 1]\}$;

$k = (1/4)\pi r^2 \{\sin^2(\beta/2) + \sin^2 [(\alpha - \beta)/2]\}$.

Загальний вираз закону розподілення швидкості матеріалу в конусі має вигляд:

$$v(r, \varphi) = (q/r) \cos(\beta - 2\varphi) / [B \sin \beta + A \cos \beta - 4K \cos(\alpha - \beta)]. \quad (8.80)$$

Значення куту β визначене з умови рівноваги сил, які діють на грані суцільного твердого тіла в центрі конусу, оскільки можна вважати, що у центрі конусу рухається суцільне жорстке ядро з кутом β . Тоді:

$$\beta = 2 \arcsin \left[\theta_0 (r_2^2 - r_1^2) / (p_2 r_2^2 - p_1 r_1^2) \right]. \quad (8.81)$$

де θ_0 - граничне напруження зсуву маси, Па; r_1 та r_2 - радіуси перерізів I-I і II-II, м; p_1 та p_2 - тиск у перерізах I-I і II-II, Па.

При розрахунках течії неньютонівських рідин в каналах складної конфігурації іноді використовують формули, які отримані для ньютонівських рідин, з підстановкою значень ефективної в'язкості, що визначаються за дійсними кривими течії матеріалу [1].

Схеми каналів наведені на рисунку 8.8. Формули витрати при течії вздовж каналів різноманітної форми наведені у таблиці 8.4.

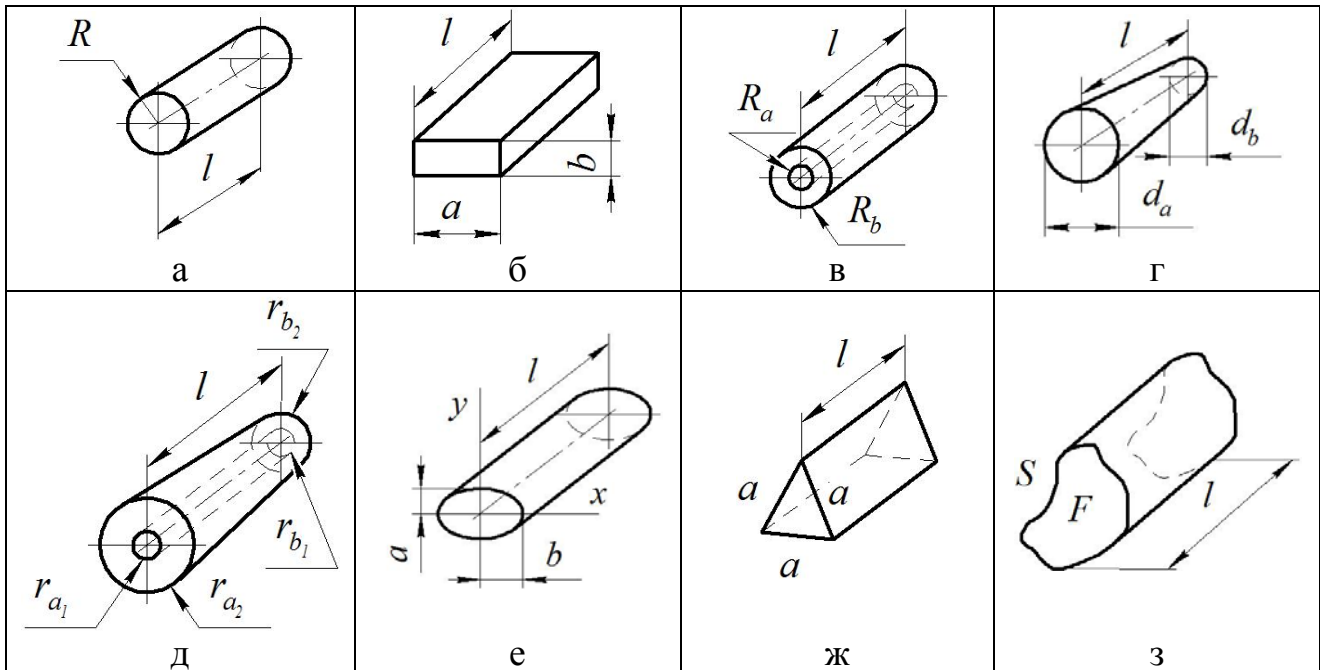


Рисунок 8.8 – Схеми каналів

Таблиця 8.4 – Формули витрати при течії по каналах

Вид каналу	Формула
Круглий циліндричний Рисунок 8.8,а	$Q = \pi R^4 \Delta p / (8\eta_{\text{ЕФ}} \cdot l). \quad (8.82)$
Прямокутний Рисунок 8.8,б	$Q = ab^3 \Delta p / (12\eta_{\text{ЕФ}} \cdot l). \quad (8.83)$
	При $0,1 \leq b/a \leq 1$, $Q = ab^3 \Delta p (1 - 0,578b/a) / (12 \times \eta_{\text{ЕФ}} \cdot l). \quad (8.84)$
Кільцевий циліндричний Рисунок 8.8,в	$Q = \pi R_b^4 \Delta p \left[(\beta^4 - 1)\beta^4 - (\beta^2 - 1)^2 / \beta^2 \lg \beta \right] / (8\eta_{\text{ЕФ}} \cdot l), \quad (8.85)$ де $\beta = R_b / R_a$.
Конічний Рисунок 8.8,г	$Q = 3\pi d_a^3 \cdot d_b^3 \Delta p / (128\eta_{\text{ЕФ}} \cdot l) / (d_a - d_b) / (d_a^3 - d_b^3). \quad (8.86)$
Кільцевий конічний Рисунок 8.8,д	За формулою (3.86) при $d_a = r_{a1} + r_{a2}$, $d_b = r_{b1} + r_{b2}$.
Еліптичний Рисунок 8.8,е	$Q = \pi a^3 b^3 \Delta p / \left[(4\eta_{\text{ЕФ}} \cdot l) (a^2 + b^2) \right]. \quad (8.87)$
Трикутний Рисунок 8.8,ж	$Q = a^4 \sqrt{3} \Delta p / (320\eta_{\text{ЕФ}} \cdot l). \quad (8.88)$
Загальної форми Рисунок 8.8,з	$Q \approx F^3 \Delta p / (2\eta_{\text{ЕФ}} \cdot S^2 l). \quad (8.89)$ де F, S - відповідно площа та периметр перерізу.

Питання для самоконтролю

1. За яким рівнянням визначається тиск, що повинен бути створений нагнітачем для здійснення процесу формування маси; які складові має це рівняння?
2. Які фізичні величини впливають на тиск формування в'язко – пластичних матеріалів у циліндричних каналах круглого перерізу?
3. З застосуванням якої теорії вирішується задача течії в'язко – пластичної маси у циліндричній камері, розташованій перед матрицею?
4. Які фактори оказують вплив на характер течії маси в приладі для формування у виробничих умовах?
5. При яких умовах розглядається ізотермічна течія в'язко – пластичного середовища в конусі з кутом α ?
6. Який вигляд має загальний вираз закону розподілення швидкості матеріалу в конусі?

8.3 Розрахунок шнекових нагнітачів

Шнекові преси, які є машинами безперервної дії, отримали широке розповсюдження в харчовій промисловості. Загальні признаки у всіх типів шнекових пресів наступні [30]:

- один або декілька шнеків встановлені (як правило, консольне) у відповідному корпусі; цей корпус має мінімум один отвір для завантаження матеріалу та один вихідний отвір, до якого примикає пристрій для формування (камера, що розташована перед матрицею);

- у шнековому пресі відбуваються наступні процеси: подача маси з воронки для завантаження до шнеків за допомогою приладу для живлення у вигляді конічного шнеку або валкової пари, просування матеріалу, що переробляється, до зони, розташованої перед матрицею, та видавлювання через отвори матриці для формування;

- на шнекових пресах можуть формуватися маси, які значно розрізняються за фізичним станом та консистенцією.

На роботу пресу впливає робота зони для завантаження, призначена для безперервної подачі маси від воронки для живлення до шнеку. Оскільки харчові маси володіють значною в'язкістю, то прилад для живлення пресу повинен створювати тиск у масі, забезпечуючи добре заповнення каналу шнеку і високу продуктивність пресу.

Тиск у зоні, розташованій перед матрицею та продуктивність пресу залежать від сукупності факторів: реологічних властивостей матеріалу, роботи частини для завантаження, характеристики шнеків, опору зони, розташованої перед матрицею, параметрів технологічного процесу. Тиск, який створюється, діє у двох протилежних напрямках: у бік матриці для формування та реактивно у бік завантаження.

У «плоскопаралельній» моделі гвинтового каналу шнековий канал приймається прямокутної форми нескінченної довжини; верхня сторона каналу пересувається, створюючи рух маси. Використовується прямокутна система координат, ось Z спрямована вздовж осі каналу.

Течію маси вздовж шнекового каналу можна уявити такою, що складається з прямого потоку в бік матриці та оборотного потоку в бік зони для завантаження. Оборотний рух відбувається як вздовж осі шнекового каналу, так і через кільцевий зазор між виступами нарізки шнеку та циліндром. Не можна розглядати процес течії як два розділених процесів, оскільки вони накладаються один на одного та отримується потік, який відповідає продуктивності шнекового пресу.

Відсутність загальної математичної теорії течії неньютонівських рідин, до яких відноситься більшість харчових мас, у шнековому каналі пресу не дозволяє теоретично достовірно розрахувати продуктивність шнекового пресу. Необхідно експериментально корегувати залежності, отримані на основі спрощеної математичної моделі.

Рівняння, яке пов'язує продуктивність шнеку з його геометричними параметрами, частотою обертання, протитиском та реологічними властивостями маси, що формується, має вигляд

$$Q = \left[(\pi^2 D^2 n H \sin \varphi \cos \varphi) / 2 \right] F_d \psi - \left(\pi D H^3 \sin^2 \varphi / 12 \eta_{E\Phi} \right) [(p_2 - p_1) / L] F_p, \quad (8.90)$$

де D - зовнішній діаметр шнека, м; n - частота обертання шнеків, об/с; H - глибина нарізки, м; φ - кут підняття нарізки, град.; P_1 - тиск у зоні завантаження, Па; P_2 - тиск у камері, розташованій перед матрицею, Па; L - довжина шнеку вздовж осі, м; F_d - коефіцієнт форми нарізки шнеку для змушеного потоку; F_p - коефіцієнт форми потоку під тиском; ψ - поправочний коефіцієнт, який враховує неньютонівську течію маси.

Таблиця 8.5 – Значення коефіцієнтів рівняння (8.90)

H/W	F_d	F_p	ψ
0,1	0,92	0,91	0,707
0,2	0,87	0,87	0,702
0,3	0,83	0,83	0,699
0,4	0,78	0,74	0,697
0,5	0,72	0,69	0,695
0,6	0,67	0,63	0,672
0,7	0,63	0,57	0,667
0,8	0,59	0,51	0,617

Коефіцієнти до рівняння (8.90) наведені у таблиці 8.5.

Ефективна в'язкість розраховується за формулою за отриманими віскозиметричними даними:

$$\eta_{E\Phi} = \eta_{ПЛ} + \theta_0 / \dot{\gamma}_{E\Phi}, \quad (8.91)$$

де $\dot{\gamma}_{E\Phi} = \pi D n / 60 (D - d)$; d - внутрішній діаметр шнеку, м.

Формула (8.90), отримана на основі математичної моделі процесу течії матеріалу вздовж шнекового каналу, наведена у відповідності з експериментальними даними з урахуванням емпіричного поправочного коефіцієнту ψ , введенням ефективної в'язкості, може бути використана для інженерних розрахунків.

При розгляді моделі гвинтового руху матеріалу було встановлено, що при обертанні шнеку закручується тільки частина в'язко – пластичної маси, яка знаходиться в робочій камері. Для знаходження зони в'язко – пластичної деформації запропоноване трансцендентне рівняння:

$$\ln(r/r_{ш}) = (r/r_{ш}) - [1 + \chi(r_{ш})/m], \quad (8.92)$$

де r - змінний радіус, м; $r_{ш}$ - радіус валу шнеку, м; $m = 1/\eta_{пл}$; $\chi(r_{ш}) = \omega\sqrt{1 + \lambda^2/r_{ш}^2}$; $\lambda = h/2\pi$; h - шаг шнеку, м; ω - кутова швидкість шнеку, c^{-1} .

Таким чином, знаючи швидкість обертання шнеку, радіус валу, пластичну в'язкість та тиск пресування, можна визначити зону пластично – в'язкої течії.

Продуктивність одношнекового нагнітачу дорівнює:

$$Q = h \int_{r_{ш}}^r x \{ m \ln(x/r) + r_{ш}(r-x)/[x(r-r_{ш})] [\chi(r_{ш}) + m \ln(r/r_{ш})] \omega \} dx. \quad (8.93)$$

Вивчення роботи двохшнекового нагнітачу зі шнеками, які зчіплюються, показало, що його продуктивність практично не залежить від опору інструменту для формування.

Наявність жорсткої характеристики у цих нагнітачів дозволяє отримати стабільний режим випресування харчової маси, а також використовувати їх у якості насосів при перекачці високов'язких мас по трубопроводам.

Продуктивність пресу визначається за формулою:

$$Q = n(2\pi - \alpha')(\pi D \operatorname{tg} \varphi - b')(D - h)h - (2\pi - \alpha')D\delta^3 \operatorname{tg} \varphi (p_1 - p_2)/(12\eta_{E\varphi} b'). \quad (8.94)$$

де n - частота обертання шнеків, об/с; α' - центральний кут, град; D - діаметр шнека, м; φ - кут піднімання нарізки, град; b' - ширина виступу нарізки; h - глибина нарізки, м; δ - радіальний зазор, м; p_1 та p_2 - тиск маси з різних боків виступу вітка, Па.

Кут α' можна знайти з наступного рівняння:

$$\cos \alpha' = 1 - 2h / (D - h) + h^2 / [2(D - h)^2].$$

Формула продуктивності повністю не відображає картини робочого пресу зі шнеками, які зчіплюються, це приводить до деякого розходження між розрахунковими та дослідними даними, але її можна використовувати в інженерних розрахунках.

Питання для самоконтролю

1. Які загальні признаки мають всі типи шнекових пресів?
2. Які складові має течія маси вздовж шнекового каналу?
3. Який вигляд має рівняння, яке пов'язує продуктивність шнеку з його геометричними параметрами, частотою обертання, протитиском та реологічними властивостями маси?
4. Які величини повинні бути відомими для визначення зони пластично – в'язкої течії?

8.4 Розрахунок продуктивності та потужності трибових нагнітачів

Трибові нагнітачі знаходять застосування в харчовій промисловості у якості основних робочих органів машин для формування продуктів, а також насосів для перекачки різноманітних в'язких продуктів. У першому випадку головною вимогою, яка пред'являється до нагнітачів, є забезпечення стабільної та рівномірної подачі маси в орган для формування. У другому випадку – створення достатньо високих тисків. Цим вимогам трибовий нагнітач відповідає у рівному ступені, маючи, окрім того, переваги у порівнянні з іншими нагнітачами: простота конструкції, мала металоємність, дешевизна та надійність.

Експерименти дозволили встановити, що внаслідок специфічних структурно – механічних властивостей харчових мас розрідження, яке створюється трибовим нагнітачем у зоні усмоктування, недостатньо для заповнення простору між зубцями шестерень, тому подача маси повинна здійснюватися примусово [30].

Робочий діапазон частот обертання шестерень нагнітачу знаходиться у межах 5 – 20 об/хв. Перевищення їх веде до значного зменшення коефіцієнту об'ємної подачі. Це пояснюється тим, що, по пер-

ше, при великій частоті обертання зменшується імовірність захвату зубцями шестерень маси, яка перекачується, внаслідок її високої в'язкості; по друге, цьому сприяють відцентрові сили. Ті самі причини, імовірно, сприяють тому, що застосування шестерень меншого модулю дає декілька більш високий коефіцієнт об'ємної подачі.

Використання в нагнітачах машин для формування відносно невеликих модулів (0,004 – 0,01 м) обґрунтоване також тим, що при невеликій частоті обертання особливо помітною стає нерівномірність подачі. Якщо в насосах, які використовуються для транспортування мас по трубах, фактор рівномірності не є суттєвим, то в машині для формування він відіграє важливу роль. Нерівномірність подачі зростає зі зменшенням кількості зубців або зі збільшенням модулю.

Основним показником якості роботи нагнітачів є коефіцієнт об'ємної подачі, або об'ємний коефіцієнт корисної дії, який визначається формулою:

$$\varphi = 1 - (Q_{UT} + Q_{UC}) / Q_T, \quad (8.95)$$

де Q_{UT} - витрата рідини на утечі, тобто об'ємні витрати насосу, кг/хв.; Q_{UC} - втрати на усмоктування, кг/хв.; Q_T - теоретична продуктивність, кг/хв.

Вивчення залежності коефіцієнту об'ємної подачі від частоти обертання шестерень нагнітачу цукерних мас дозволило запропонувати формулу [30]:

$$\varphi = 0,8 + 0,017n - 0,0009n^2, \quad (8.96)$$

де n - частота обертання шестерень, об/хв.

Теоретична продуктивність розраховується за формулою [30]:

$$Q_T = 2\pi\rho b n m^2 (z + \sin^2 \alpha) \cdot 10^{-6}, \quad (8.97)$$

де ρ - щільність маси, кг/м³; b - ширина шестерні, мм; n - частота обертання об/хв.; m - модуль, мм; Z - кількість зубців; α - кут зчеплення передачі, град.

Аналіз рівняння (8.89) показав, що оптимальним (з точки зору найбільшого φ) є діапазон швидкостей обертання від 8 до 15 об/хв. Найбільше значення коефіцієнт об'ємної подачі має при $n=9,5$ об/хв.

З великої кількості факторів, які визначають опір обертанню шестерень насоса, можна виділити основні: момент, що створюється силами тиску внаслідок різності площі, на які ці сили діють в області нагнітання (M_1); моменти сил внутрішнього тертя, що виникають при зсуві шарів рідини в радіальних (M_2) та торцевих (M_3) зазорах. Тоді сумарний момент дорівнює:

$$M = M_1 + M_2 + M_3. \quad (8.98)$$

По крутячому моменту можна розрахувати потрібну потужність N (Вт):

$$N = M\omega, \quad (8.99)$$

де M - крутячий момент, Н·м; ω - кутова швидкість обертання шестерні, с^{-1} .

Моменти M_1 , M_2 , M_3 запропоноване розраховувати за формулами:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \Delta p b (R_l^2 - r^2 - K t_0^2 / 12); \\ M_2 &= A z b R^2 [\theta_0 + \Delta p \delta_R / (A z R) + \eta_{\text{ПЛ}} \omega R / \delta_R]; \\ M_3 &= (8 \pi \theta_0 / 3) (R_l^3 - R_{\text{Ц}}^3) + (2 \pi \eta_{\text{ПЛ}} \omega / \delta_T) (R_l^4 - R_{\text{Ц}}^4), \end{aligned} \right\} \quad (8.100)$$

де Δp - різниця тисків у зонах нагнітання та всмоктування, Па; b - ширина шестерень, м; R_l - радіус окружності головок, м; r - радіус початкової окружності, м; K - коефіцієнт; $K = 4 - 6\varepsilon + 3\varepsilon^2$ [ε - коефіцієнт (ступінь) перекриття]; t_0 - основний шаг, м; R - внутрішній радіус окружності корпусу насоса, м; δ_R та δ_T - радіальний та торцевий зазори, м; ω - кутова швидкість обертання, с^{-1} ; $R_{\text{Ц}}$ - радіус цапфи, м; A - функція, яка залежить від кількості зубців (Z).

Таблиця 8.6 - Значення функції A

Z	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20
A	0,0997	0,0939	0,0853	0,0813	0,0779	0,0748	0,0716	0,0687	0,0662	0,0639

Значення функції A наведені у таблиці 8.6. Експериментальні дані довели, що на переборювання сил в'язкості опору

ру витрачається від 20 до 60% енергії двигуна.

Питання для самоконтролю

1. Які переваги мають трибові нагнітачі у порівнянні з іншими типами нагнітачів?
2. Яка величина є основним показником якості роботи трибових нагнітачів?
3. Від яких величин залежить теоретична продуктивність трибових нагнітачів?
4. Які основні фактори визначають опір обертанню шестерень насоса?

8.5 Розрахунок валкових приладів

Аналіз роботи машин для формування безперервної дії зі шнековими та шестерними нагнітачами виявив ряд недоліків: перегрів матеріалу в процесі нагнітання в результаті інтенсивного тертя о стінки камери та перемішування; менша продуктивність та більші витрати енергії; неможливість забезпечення рівномірної подачі продукту по всьому об'єму матриці для формування при достатньо великій її довжині [30]. Останній недолік викликає необхідність створення складних за конструкцією камер, які розташовані перед матрицею.

Валкові нагнітачі здійснюють нагнітання маси по всій ширині матриці при високій продуктивності та економічності процесу. Процес нагнітання валками буває двох видів: без протитиску при безперервному формуванні шару великої ширини та з протитиском при формуванні нескінченних джгутів за допомогою матриці.

Встановлено, що коефіцієнт об'ємної подачі валків при нагнітанні без протитиску зменшується зі збільшенням окружної швидкості валків та величини зазору між ними, а також зі зниженням температури маси, яка переробляється.

У процесі нагнітання валки однакового розміру нагнітають масу

в камеру, обмеженою знизу щілиною матрицею. Ножі, які зчищають масу, знаходяться на рівні лінії центрів валків, тобто кут нагнітання дорівнює нулю. Робоча поверхня валків знаходиться між зазорами H та h_0 , де H - відстань між твірними поверхнями валків, які знаходяться на відстані від площини осей валків на кут захвату; h_0 - мінімальний зазор між валками. Рівняння витрати продукту на одиницю довжини валка [30]:

$$Q = \nu h - (dp/dx)h^3/(12\eta), \quad (8.101)$$

де ν - окружна швидкість валків, м/с; η - в'язкість тіста, Па·с;
 dp/dx - градієнт тиску, Па/м; h - поточне значення зазору, м.

Для валкового нагнітачу продуктивність дорівнює:

$$Q = \nu h_0 K, \quad (8.102)$$

де h_0 - мінімальний зазор між валками, м; K - коефіцієнт подачі нагнітачу.

$$K = Q_{\Pi} / Q_T, \quad (8.103)$$

де Q_{Π} , Q_T - практична та теоретична продуктивність, м³/(м·с).

Були введені наступні позначення: $\mu = h/h_0$ та $\mu' = H/h_0$.

Порівнюючи вирази (8.93), (8.94) та здійснивши перетворення, отримали:

$$p = 6\eta\nu\sqrt{r}h_0^{-1,5} \left\{ \left(\sqrt{\mu' - 1} / \mu' \right) \left[1 - (3\mu + 2) / 4\mu \right] - \left(\sqrt{\mu - 1} / \mu \right) \times \right. \\ \left. \times \left[1 - (3\mu + 2) / 4\mu \right] - (1 + 0,75K) \left(\arctg \sqrt{\mu' - 1} - \arctg \sqrt{\mu - 1} \right) \right\} \quad (8.104)$$

У загальному вигляді крутячий момент та реакції у вертикальній та горизонтальній площинах визначаються за формулою:

$$M = p_0 r^2 L f (\alpha_1 + \alpha^2)^2 / 2\alpha_1, \quad (8.105)$$

де P_0 - тиск у зазорі між валками, Па; α_1 - кут захвату маси валками, град; α_2 - кут нагнітання.

Реакції, виходячи з рівності куту захвату тіста куту тертя тіста о матеріал валку ($\operatorname{tg} \alpha_1 = f$), розраховуються за формулами:

$$H = [p_0 d L / (\alpha_1 \cos \alpha_1)] \times [\delta \sin(\alpha_1 + \alpha_2) - \sin \gamma \sin(\alpha_1 + \delta) - \alpha_1 \sin \alpha_1], \quad (8.106)$$

$$R = [p_0 d L / (\alpha_1 \cos \alpha_1)] \times [\sin \gamma \cos(\alpha + \delta) - \delta \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \alpha_1 \cos \alpha_1], \quad (8.107)$$

де d - діаметр валку, м; $\delta = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$; $\gamma = (\alpha_2 - \alpha_1)/2$.

Експериментально визначені залежності продуктивності, коефіцієнту подачі, крутячого моменту, розпірних зусиль на валки, тиск на валок та в камері від змінних параметрів: зазору між валками, діаметру, частоти обертання, кутів живлення та нагнітання.

Дослідження проводилися з бубликовим та хлібопекарним тістом. Результати дослідів показали, що максимальна продуктивність нагнітання забезпечується при визначеному зазорі між валками, який дорівнює 10 мм для бубликового тіста та 15 мм для хлібопекарного тіста, і куті нагнітання – $60-70^\circ$ для бубликового та $50-55^\circ$ для хлібопекарного тіста. Вплив зазору, частоти обертання та ширини матриці для бубликового тіста може бути описаний наступними формулами:

$$A = c_1 h_0 e^{-c_2 h_0}; \quad A = b_1 + b_2 n; \quad A = m_1 + m_2 l, \quad (8.108)$$

де A - крутячий момент (Н·м), тиск (Па) або продуктивність (кг/хв.); c , b , m - емпіричні коефіцієнти (таблиця 8.7).

Таблиця 8.7 - Емпіричні коефіцієнти до рівняння (8.108)

Показники	c_1	c_2	b_1	b_2	m_1	m_2
Крутячий момент	18,6	0,85	131	-1,4	45,0	1,4
Тиск	2,7	0,09	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$0,29 \cdot 10^{-4}$	$11,5 \cdot 10^{-4}$	$-17 \cdot 10^{-6}$
Продуктивність	13,4	0,10	1,75	0,056	0	0,12

Як показали результати досліджень, коефіцієнт подачі нагнітачу залежить від зазору між валками; є критичне значення зазору, оскільки незначне його збільшення веде до різкого зниження коефіцієнту.

Формування збитих цукерних мас, які володіють високою текучістю, доцільно здійснювати на валкових машинах. Принципова схема валкової машини для формування наведена на рисунку 8.9.

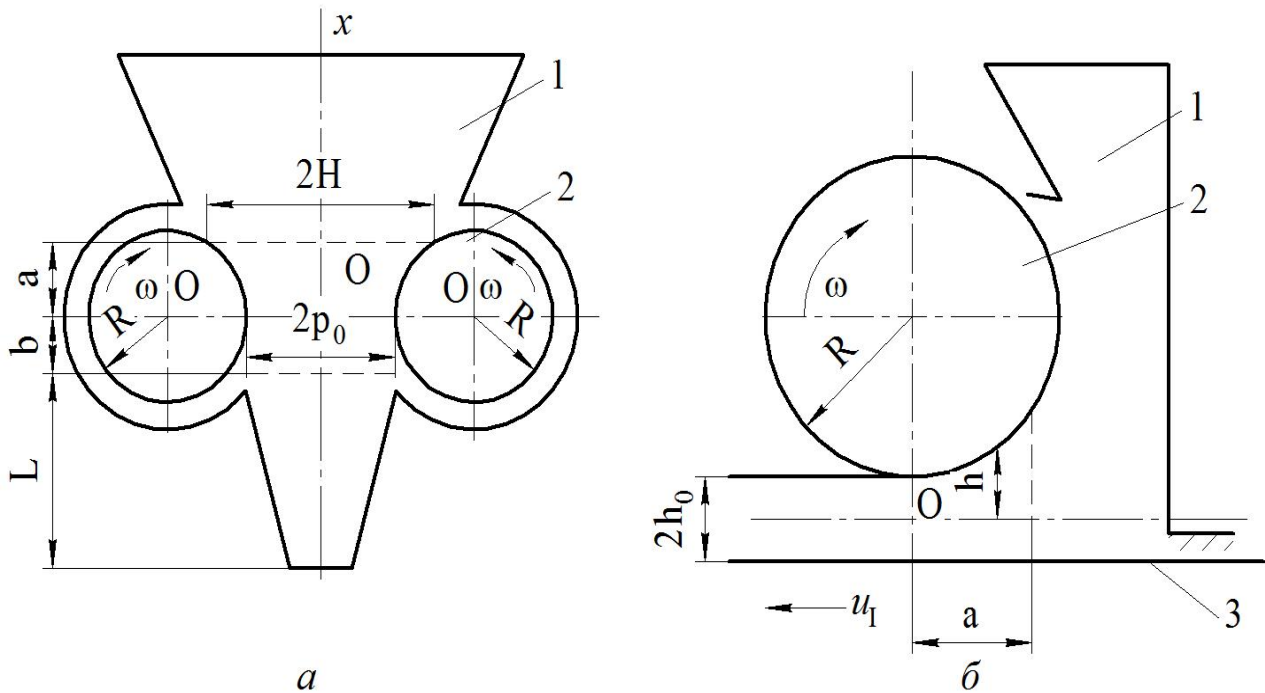


Рисунок 8.9 – Схеми валкових приладів для витискування (а) та прокатки (б) цукерних мас

Масу завантажують у бункер 1, звідкіля вона захоплюється валками 2 та протискується через канал для формування 3. Оскільки кут конусності каналу для формування малий, то вважають, що течія в каналі аналогічна течії в зазорі між двома паралельними пластинами.

Вивчаючи ізотермічну, усталену течію цукерних мас між двома безграничними нерухомими площинами, віддаленими одна від одної на відстань $2H$, визначили тиск, необхідний для маси, яка протискується крізь канал для формування:

$$p_2 = L/H \left\{ K [2(2n+1)/n]^n \left\{ Q / [B(2H)^2] \right\}^n - \rho g H \right\}, \quad (8.109)$$

де L , B - довжина та ширина каналу, м; K , n - реологічні константи степеневого закону; Q - об'ємні витрати, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ - щільність маси, $\text{кг}/\text{м}^3$; g - прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$.

У випадку стаціонарної, ізотермічної течії цукерних мас у зазорі між двома валками, які обертаються назустріч один одному, слід враховувати вплив маси продукту та зневажити інерційними силами у порівнянні з в'язкими. Тоді вираз для визначення тиску в зазорі між валками по координаті x має вигляд:

$$p(x) = \rho g x + \frac{K \omega^n}{m} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n \int \left[C_1 + \frac{2R(h-h_0) - h^2}{2} \right] \frac{dh}{h^{2n+1}} + C_2, \quad (8.110)$$

де $m = (H_* - h_0)/a$; $dx = dh/m$; $2H_*$ - товщина шару продукту, який поступає в зазор між валками, м; $2h$ - поточний зазор, м.

Постійні інтегрування C_1 та C_2 розраховуються з граничних умов: при $x = a$ $p = p_1$; при $x = 0$ $p = p_2$, де p_1 тиск маси в бункері, Па. Експериментальні дослідження на валкових нагнітачах підтвердили правильність запропонованих залежностей.

Вибір способу формування цукерних мас залежить від урахування як геометричних та кінематичних параметрів обладнання, так і структурно – механічних властивостей продукту. Дослідження довели, що цукерні маси, які збитті, доцільно формувати прокаткою. Цукерна маса завантажується у бункер 1 (рисунок 8.9.б), звідкіля поступає в зазор між валком 2 та транспортерною стрічкою 3, що рухається горизонтально. Даний спосіб дозволяє при мінімальному тиску на масу формувати шар продукту визначеної товщини.

Для прокатки шару продукту за схемою, що наведена на рисунку 8.9,б, поточний зазор дорівнює

$$h = R + h_0 - \sqrt{R^2 - x_2}. \quad (8.111)$$

Вважається, що валок обертається з частотою ω , а стрічка рухається рівномірно зі швидкістю u_1 . Були введені позначення v_x та v_y швидкості вздовж осей x та y відповідно, при тому $v_x \geq v_y$, окрім того $\partial v_x / \partial x \leq \partial v_x / \partial y$.

З урахуванням прийнятих припущень диференціальні рівняння, які описують стаціонарну, ізотермічну течію в'язких середовищ у за-

зорі між валками та стрічною, мають вигляд:

$$\partial\theta/\partial y = \partial p/\partial x; \quad \partial v_x/\partial x + \partial v_y/\partial y = 0; \quad p = p(x), \quad (8.112)$$

де θ - дотичне напруження, Па; $p(x)$ - тиск, Па.

Для степеневого реологічного рівняння стану цукерних мас

$$\theta = K(\partial v_x/\partial y)^n \quad (8.113)$$

були введені граничні умови:

$$\begin{aligned} y = -h \quad v_x = -u_1, \quad v_y = 0; \quad y = h \quad v_x = -\omega(R + h_0 - h), \quad v_y = -\omega x; \\ y = 0 \quad x = a, \quad p(a) = 0, \end{aligned} \quad (8.114)$$

де a - координата входу продукту в зазор, м.

З сумісного розв'язання рівнянь (8.112) та (8.113) з урахуванням граничних умов (8.114) отримали:

$$\begin{aligned} v_x = u_1/2 \left[(y/h)^{1/n} - 1 \right] + n/(n+1) \left[(1/K)(\partial p/\partial x) \right]^{1/n} \times \\ \times \left[(y)^{(n+1)/n} - h(y)^{1/n} \right] - (1/2)\omega(R + h_0 - h) \left[1 + (y/h)^{1/n} \right]. \end{aligned} \quad (8.115)$$

Продуктивність приладу

$$Q = 2 \int_0^{h_0} v_x dy, \quad (8.116)$$

або після підстановки значення v_x

$$\begin{aligned} Q = u_1 h_0 / (n+1) + n^3 (h_0)^{(1+2n)/n} / \left[(n+1)^2 (2n+1) \right] \times \\ \times \left[(1/K)(\partial p/\partial x) \right]^{1/n} + h_0 \omega R (1+2n)/(n+1). \end{aligned} \quad (8.117)$$

Для визначення тиску було проінтегроване рівняння нерозрив-

ності від 0 до h , та з урахуванням граничних умов отримали

$$\omega x = \int_0^h \partial v_x / \partial x \partial y, \text{ звідкіля}$$

$$2 \int_0^{h_0} v_x dy - \omega [h^2 + x^2 - 2(R + h_0)h] = const. \quad (8.118)$$

Після підстановки у рівняння (8.118) значення v_x з виразу (8.115), отримали:

$$p(x) = K \int_0^x \left\{ \frac{(n+1)^2(1+2n)}{2n^3(h)^{\frac{2n+1}{n}}} \left[C + \frac{u_1 h}{n+1} + \frac{2n+1}{n+1} h \omega (R + h_0 - h) + \omega (h^2 - x^2 - 2(R + h_0)h) \right]^n dx \right\}. \quad (8.119)$$

Постійна C визначається з граничної умови $p(a) = 0$.

Запропоновані залежності були перевірені на приладі, схема якого наведена на рисунку 8.9,б. Формували масу «Трюфелі екстра» при температурі 23°C ; реологічних константах $n=0,37$, $K=131$; швидкості стрічки транспортеру 1м/хв. ; мінімальному зазору $2h_0=14\text{ мм}$; радіусі валку $R=65\text{ мм}$. При цих умовах експериментальна продуктивність на одиницю довжини валка дорівнює $2,22 \cdot 10^{-4}\text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м})$, що підтвердило справедливість запропонованої залежності [30].

На результат розклатки заготовок з тіста великий вплив оказує пружна післядія, в результаті якої товщина шару h після розклатки стає більш зазору між валками h_0 . Досліди проводили з тістом, виготовленим з борошну I та II сортів на валковому приладі, який дозволяє змінювати зазор між валками від 5 до 19 мм.

Збільшення шару характеризують коефіцієнтом $K_B = h/h_0$, який залежить від ряду технологічних факторів (таблиця 8.8).

Вивчення розклатки тіста показало, що найкраще розкочування тіста спостерігали, коли товщина заготовки з тіста перед валками була в 3 рази більш зазору між ними.

Таблиця 8.8 – Залежність коефіцієнта K_B від зазору між валками, сорту тіста та кратності розкочування

Зазор між валками, мм	Кратність розкочування									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Тісто з борошна I сорту					Тісто з борошна II сорту				
5	4,2	3,6	2,4	2,2	2,2	3,2	2,8	2,1	1,9	1,9
7	3,3	2,7	2,1	1,9	1,9	3,0	2,3	2,0	1,7	1,7
9	2,9	2,5	1,9	1,8	1,8	2,7	2,2	1,8	1,6	1,6
13	2,5	2,0	1,8	1,7	1,7	2,1	1,8	1,6	1,5	1,5
15	2,3	1,9	1,7	1,6	1,6	1,9	1,7	1,5	1,4	1,4
17	2,2	1,8	1,6	1,5	1,5	1,8	1,6	1,4	1,3	1,3
19	2,1	1,7	1,5	1,4	1,4	1,7	1,5	1,3	1,2	1,2

Питання для самоконтролю

1. Які існують види процесу нагнітання харчових мас валками?
2. Від яких факторів залежить коефіцієнт об'ємної подачі валків при нагнітанні маси?
3. Від чого залежать продуктивність, коефіцієнт подачі, крутячий момент, тиск на валок при нагнітанні хлібопекарного тіста?
4. Які величини впливають на значення тиску, необхідного для протискування маси крізь канал для формування?
5. Від яких факторів залежить вибір способу механічного формування цукерних мас?

8.6 Розрахунок процесу течії харчових мас вздовж довгих каналів (трубопроводів)

Для розрахунку ізотермічної ламінарної течії харчових матеріалів вздовж прямих горизонтальних труб круглого перерізу достатньо часто використовують формули, які наведені у таблиці 8.9.

Епюри швидкостей ступеневої рідини в круглому каналі при різному індексі течії розподіляються за законом [13]:

$$u/v_{cp} = [(1 + 3n)/(1 + n)] [1 - (r/R)^{(n+1)/n}], \quad (8.120)$$

де u - локальна швидкість шару, який розташований на відстані r від осі каналу, м/с; v_{cp} - середня швидкість потоку, м/с; R - внутрішній радіус труби.

Таблиця 8.9 – Формули для розрахунку степеневі та ньютонівської рідин

Реологічна величина	Формула для степеневі рідини	Формула для ньютонівської рідини
Напруження зсуву біля стінки каналу	$\theta_{CT} = (R/2)(\partial p/\partial x)$	$\theta_{CT} = (R/2)(\partial p/\partial x)$
Напруження зсуву	$\theta = \theta_{CT}(r/R)$	$\theta = \theta_{CT}(r/R)$
Швидкість у центрі труби	$v_{x\max} = [n/(n+1)] \times [(1/2K)(\partial p/\partial x)]^{1/n} R^{(n+1)/n}$	$v_{x\max} = (R^2/4\eta)(\partial p/\partial x)$
Швидкість у будь-якої точці потоку	$v_x = v_{x\max} [1 - (r/R)^{(n+1)/n}]$	$v_x = v_{x\max} [1 - (r/R)^2]$
Середня швидкість	$v_{xcp} = v_{x\max} [(n+1)/(3n+1)]$	$v_{xcp} = v_{x\max} \cdot 0,5$
Швидкість зсуву	$dv_x/dr = (2v_{x\max}/R) \times [(n+1)/n](r/R)^{1/n}$	$dv_x/dr = (2v_{x\max}/R)(r/R)$
Швидкість зсуву біля стінки каналу	$(dv_x/dr)_{CT} = [(3n+1)/n][Q/(\pi R^3)]$	$(dv_x/dr)_{CT} = 4Q/(\pi R^3)$
Об'ємна витрата	$Q = [\pi R^3 n/(3n+1)] \times [(R/2K)(\partial p/\partial x)]^{1/n}$	$Q = [\pi R^4/(8\eta)](\partial p/\partial x)$

При відсутності проковзання продукту вздовж поверхні каналу значення u та v_{cp} визначаються за формулами:

$$u = [1 - (r/R)^{(n+1)/n}] [R\dot{\gamma}_n/(1+n)] [(\partial p/\partial l)R/(2\dot{\gamma}_1\eta_1)]^{1/n}, \quad (8.121)$$

$$v_{cp} = [R\dot{\gamma}_n/(1+3n)] [(\partial p/\partial l)R/(2\dot{\gamma}_1\eta_1)]^{1/n},$$

де $\partial p/\partial l$ - градієнт тиску по довжині, Па/м; η_1 - ефективна в'язкість при градієнті швидкості $\dot{\gamma}=1 \text{ с}^{-1}$, Па·с; R - внутрішній радіус каналу; r - поточний радіус; K, n - реологічні константи степеневого закону.

Витрати тиску визначають за емпіричною залежністю для випадку течії багатьох м'ясних та молочних продуктів вздовж каналу [13]:

$$\Delta p d / l = a W^n, \quad (8.122)$$

де Δp - витрата тиску, Па; $\Delta p d / l$ - величина, пропорційна напруженню на стінці, Па; a - емпіричний коефіцієнт.

Коефіцієнти до рівняння (8.122) наведені у таблиці 8.10.

Таблиця 8.10 – значення коефіцієнтів до рівняння (4.122)

Сирий фарш	$a \cdot 10^{-2}$	n	Ковбаса	$a \cdot 10^{-2}$	n
Яловичина, яка оброблена на кутері з водою	160	0,27	Любительська	130	0,21
			Докторська	110	0,25
Свинина напівжирна, яка оброблена на кутері з водою	155	0,26	Чайна	91	0,21
			Сосиски свинячі	80	0,23
			Котлети	91	0,24

Була запропонована та експериментально перевірена інженерна методика розрахунку трубопровідних транспортуючих ліній для перекачки кондитерських мас високої в'язкості [30].

Розроблена методика розрахунку падіння тиску при течії в'язко – пластичних матеріалів по трубах. Рівняння Букінгема наведено у вигляді:

$$Q = \left[\pi \Delta p d^4 / (128 \eta_{пл} l) \right] \left[1 - (4/3)(d_0/d) + (1/3)(d_0/d)^4 \right] = \left(\pi \Delta p d^4 / 128 \eta_{пл} l \right) f(d_0/d), \quad (8.123)$$

де d_0/d - відношення діаметру квазітвердої течії до діаметру труби.

Вибір розв'язання повинен давати найменшу похибку при розрахунках. При цьому розв'язання справедливе у визначеному діапазоні змінення відношення d_0/d .

Дослідження епюр швидкостей течії цукерних мас показало, що відношення діаметру ядра потоку до діаметру труби дорівнює не менше 0,75. У цьому випадку найкращі результати дає введення наступної лінійної функції:

$$f(d_0/d) = 0,32(1 - d_0/d). \quad (8.124)$$

Враховуючи вираз (8.124), а також те, що середня об'ємна швидкість дорівнює $V = 4Q/\pi d^2$, рівняння (8.123) приймає вигляд:

$$\Delta p = (K/\text{Re}^*)(l/d)\rho V^2/2. \quad (8.125)$$

де $K = 64/0,32 = 200$; Re^* - узагальнений критерій Рейнольдса

$$\text{Re}^* = V d \rho / \{ \eta_{\text{ПЛ}} [(1 + 0,32 d \theta_0 / (8 \eta_{\text{ПЛ}} V))] \} = V d \rho / \eta_{\text{ЕФ}}. \quad (8.126)$$

Позначивши

$$\eta_{\text{ЕФ}} = \eta_{\text{ПЛ}} + d \theta_0 / (25V); \quad (8.127)$$

$$200/\text{Re}^* = \lambda^*. \quad (8.128)$$

де λ^* - узагальнений коефіцієнт лінійного опору.

Отримали

$$\Delta p/l = \lambda^*(\rho/d)(V^2/2). \quad (8.129)$$

При дослідженні течії по трубах цукерних мас розраховували значення Re^* за формулою (8.123) та λ^* - за виразом

$$\lambda^* = 2\Delta p d / (l \rho V^2). \quad (8.130)$$

Результати деяких експериментів наведені у таблиці 8.11 [30].

У логарифмічних координатах $\lg \lambda^* - \lg \text{Re}^*$ експериментальні точки з достатньою точністю знаходяться на прямій, яка не співпадає з прямою, що описана рівнянням (8.126). Розходження між ними стає більш помітним зі зменшенням швидкості маси та збільшенням діаметру трубопроводу. За експериментальними даними отримане рівняння

$$\lambda^* = 220/(\text{Re}^*)^{0,92}. \quad (8.131)$$

Відхилення залежності (8.131) від теоретичної (8.128) пояснюється наявністю пристінного ковзання, яке зростає зі зменшенням об'ємної швидкості та збільшенням діаметра трубопроводу.

Таблиця 8.11 – Значення λ^* та Re^* для цукерних мас

Діаметр труби, мм	Швидкість зсуву, c^{-1}	Ефективна в'язкість, Па·с	Падіння тиску на одиницю довжини, Па/м	Узагальнений коефіцієнт лінійного опору	Узагальнений критерій Рейнольдса
Маса для цукерок «Колос» (жирність 29,7%, вологість 2,3%)					
69	0,68	600	0,82	164200	0,000731
	0,82	632	0,92	12300	0,000965
	1,81	260	1,04	29400	0,00482
	4,07	200	1,42	7940	0,02285
54	1,468	440	1,28	70100	0,0017
	3,78	193	1,64	13530	0,0143
	6,83	95	1,84	4650	0,039
	8,56	82	2,0	3200	0,062
Маса для цукерок «Батончики» (жирність 31,3%, вологість 2,0%)					
54	1,47	333	0,9	49200	0,00254
	3,78	164	1,44	11850	0,01143
	6,83	120	2,0	5040	0,039
	8,56	100	2,8	4490	0,032
42	2,9	199	1,1	18850	0,0095
	3,72	159	1,42	15550	0,0103
	7,98	93	2,7	6330	0,0244
	2,9	199	1,1	2890	0,060
Маса для цукерок «Чудесниця» (жирність 27,8%, вологість 2,0%)					
69	0,723	560	0,43	76000	0,0016
	0,9	450	0,53	59900	0,00205
	1,63	380	0,64	24350	0,0052
	3,17	210	0,87	7990	0,0195

На основі (8.131) отримане рівняння для розрахунку падіння тиску на одиницю довжини труби:

$$\Delta p/l = 91,6 \eta_{EF}^{0,92} V^{1,08} \dot{\gamma}^{0,08} / d^{1,92} \quad (8.132)$$

Рівняння (8.132) справедливе при зміненні середньої швидкості в межах від 0,01 до 0,2 м/с, θ_0 - від 100 до 1000 Па, $\eta_{ПЛ}$ - від 10 до 200 Па·с, діаметру трубопроводу – від 0,03 до 0,08 м.

Експерименти, які були проведені з косинцями різних розмірів, показали, що падіння тиску в них можна вважати дорівнюючим падінню тиску на лінійній ділянці, довжина якої дорівнює розгорнутої

довжині середньої лінії косинця. При розрахунку падіння тиску при течії мас вздовж вертикальних трубопроводів окрім лінійного опору та гідростатичного тиску треба враховувати також додаткові витрати, величина яких залежить від діаметру труби та витрати маси. Запропонована емпірична формула для розрахунку додаткових витрат:

$$\Delta p_B = K_B \gamma H, \quad (8.133)$$

де K_B - коефіцієнт, який залежить від середньої швидкості потоку.

$$K_B = 1,08 + 0,563v^{0,6}. \quad (8.134)$$

У таблиці 8.12 наведені закони розподілення швидкостей та вирази для визначення об'ємної витрати Q [1].

Була розв'язана задача течії при раптовому розширенні труби для рідини, яка підлягає закону Оствальда [48] :

$$\Delta p = [\rho v_{cp}^2 (3n + 1)/(2n + 1)] \times \\ \times [(F_1/F_2)^2 (n + 3)/(10n + 6) - (F_1/F_2) + 3(3n + 1)/(10n + 6)]. \quad (8.135)$$

де v_{cp} - середня швидкість потоку рідини в узькому перерізі труби, м/с; F_1, F_2 - площі поперечного перерізу потоку до та після розширення, м².

Для розрахунку місцевих опорів течії рідини Шведова – Бінгама запропоноване використовувати формулу Дарсі – Вейсбаха [30]:

$$\Delta p = \lambda_M \rho v_{cp1}^2 / 2, \quad (8.136)$$

де $\lambda_M = A/Re^*$ - коефіцієнт місцевого опору; A - коефіцієнт пропорційності, який залежить від виду опору: раптове розширення – $A = 210$, раптове звуження $A = 320$, поворот труби на 90° - $A = 400$, засувка - $A = 4400$.

При визначенні місцевого опору течії рідини Шведова – Бінгама вентилю, засувки та повороту на 90° користуються формулою

$$\lambda_M = A/\text{Re}^{*b}, \quad (8.137)$$

де A та b - коефіцієнти, значення яких наведені у таблицях 8.13, 8.14.

Таблиця 8.12 – Характеристики потоків у трубі

Реологічне рівняння	Формули розподілення швидкостей та витрати
Ньютона $\theta = \eta \dot{\gamma}$	$v_z = (1/4\eta)(\partial p/\partial z)(r^2 - R^2);$ $Q = \pi R^4 \Delta p/8\eta L \text{ (по Пуазейлю);}$
Шведова – Бінгама $\theta = \theta_0 + \eta_{\text{ПЛ}} \dot{\gamma}$	$v_z = (1/4\eta)(\partial p/\partial z)(r^2 - R^2) - (\theta_0/\eta_{\text{ПЛ}})(r - R);$ $R \geq r \geq r_0; r_0 = 2\theta_0 (\partial p/\partial z)^{-1}$ - границя жорсткого ядра $Q = (\pi R^4 \Delta p/8\eta L) [1 - (4/3)2\theta_0 L/(\Delta p R) + (1/3)(2\theta_0 L)^4/(\Delta p R)^4]$ (по Букінгему – Рейнеру)
Оствальда $\theta = K \dot{\gamma}^n$	$v_z = [n/(n+1)](1/2K)^{1/n} (\partial p/\partial z)^{1/n} \times [r^{(1+n)/n} - R^{(1+n)/n}];$ $Q = [n\pi R^3/(3n+1)](\Delta p R)^{1/n}/(2KR)^{1/n};$
Касона $\theta = (K_0 + K_1 \sqrt{\dot{\gamma}})^2$	$v_z = (1/2K_1^2) [(1/4)(\partial p/\partial z)(r^2 - R^2) - (2K_0/3)(2\partial p/\partial z)^{1/2}(r^{3/2} - R^{3/2}) + K_0^2(r - R)];$ $Q = (\pi R^3/K_1^2) [\Delta p R/(8L) - (4K_0/7)((\Delta p R)^{1/2}/(2KL)^{1/2} + K_0^2/8 - (K_0^8/84)(2L^3)/(\Delta p LR)^3]$
Гершеля – Балклі $\theta = \theta_0 + K \dot{\gamma}^n$	$v_z = [2nK/(n+1)](\partial p/\partial z)^{-1} \{ [(\partial p/\partial z)r/(2K) - \theta_0/K]^{(n+1)/n} - [(\partial p/\partial z)R/(2K) - \theta_0/K]^{(n+1)/n} \};$ $R \geq r \geq r_0; r_0 = 2\theta_0 (\partial p/\partial z)^{-1}$ - границя жорсткого ядра $Q = (\pi n R^3/K^{1/n}) [2L/(\Delta p R)]^3 \times \{ 1/(3n+1) [\Delta p R/(2L) - \theta_0]^{(3n+1)/n} + 2\theta_0/(2n+1) [\Delta p R/(2L) - \theta_0]^{(2n+1)/n} + \theta_0^2/(n+1) [\Delta p R/(2L) - \theta_0]^{(n+1)/n} \}$

Таблиця 8.13 – Значення до рівняння (8.137)

Елемент	Степінь відчинення	Коефіцієнт A		Критичне число Re^*_{KP}
		$Re^* < Re^*_{KP}$	$Re^* > Re^*_{KP}$	
Вентиль	1/4	4100	76,4	250
Засувка	1/2	2880	51,3	350
	1	2030	30,5	550
	1/3	695	12,3	250
	2/3	540	9,8	250
	1	355	1,8	400

При $Re^* < Re^*_{KP}$ $b=1$, при $Re^* > Re^*_{KP}$ $b=0,27$

Таблиця 8.14 – Значення A , b та Re^* до рівняння (8.137)

Зона	Плавний поворот на 90^0			Різкий поворот на 90^0		
	Re^*	A	b	Re^*	A	b
I (ламінарна течія)	100-850	840	1	100-350	980	1
II (перехідна область)	850-1300	1	-	-	-	-
III (перехідна область)	1300-2500	1350	1	350-2000	6,9	0,123
IV (перехідна область)	2500-5000	3,2	0,223	2000-5000	2,74	0,367
V (турбулентна течія)	5000	0,47	-	5000	2	-

Опір зміяків течії неньютонівської рідини при змінненні індексу течії від 0,854 до 0,785 може бути описаний формулою

$$\lambda_{ЗМ} / \lambda_{ПР} = 1 - 0,026 Re'^{0,675}, \quad (8.138)$$

де $\lambda_{ЗМ}$, $\lambda_{ПР}$ - коефіцієнти опору вздовж довжини зміяка та прямолинійної труби; Re' - число Рейнольдса для зміяка.

При розрахунку колекторів має місце змінна витрата вздовж осі каналу, при цьому відбувається зміннення кінематичних та динамічних характеристик потоку. Розрахунки проводяться за класичними диференціальними рівняннями руху тіла зі змінною масою. Для випадку ступеневої рідини, коли вся витрата, що проходить через початковий переріз, рівномірно розподіляється вздовж каналу, отриманий вираз

$$p_x / (\rho g) = p_0 / (\rho g) + 16(4n + 2)(5n + 3)Q_0^3 x(2 - x/2) / (\pi^2 g G^4) - [4KL / (\rho g D)] [8Q_0 (3n + 1) / (\pi D^3 n)]^n [1 / (n + 1)] [1 - (1 - x/2)^{n+1}], \quad (8.139)$$

де p_0 - гідростатичний тиск на вході в канал, Па; Q_0 - витрата рідини, яка проходить крізь початковий переріз, м³/с; x - координата перерізу, який розглядається по осі каналу від вхідного перерізу, м.

Таблиця 8.15 – Залежність критичного числа Рейнольдса від індексу течії

N	1	0,38	0,2
Re^*	2100	3100	5000

Критичним числом Рейнольдса для ньютонівських рідин при ламінарній течії є 2320. Для неньютонівських рідин, які підкоряються закону Оствальда де Віля, критичне число Re^* зі зменшенням індексу течії зростає, що наведено у таблиці 8.15.

Питання для самоконтролю

1. Від яких величин залежать локальна швидкість шару та середня швидкість потоку при течії харчових мас вздовж довгих каналів?
2. Чи можна за одним законом визначити витрати тиску для різних харчових мас?
3. Які величини впливають на кількісні значення узагальненого коефіцієнту лінійного опору та узагальненого критерію Рейнольдса?
4. За якими показниками характеризують потоки маси в трубі та які реологічні рівняння при цьому використовують?

8.7 Канали змінного перерізу.

Формування тістових заготовок конусоподібної форми

При розрахунках каналів змінного перерізу, вони розбиваються по довжині на зони, в яких переріз має однакову форму: круг, круг змінної площі; кільце, кільце змінної площі і т. д. У зонах, що мають конічну поверхню, її замінюють циліндром, діаметр якого дорівнює середньому арифметичному між діаметрами входу та виходу конуса. Складаючи змінення зони, отримуємо спрощену робочу схему каналу складної конфігурації. В залежності від форми перерізу течія продукту може бути описана одним з наступних виразів.

Кільцевий канал:

$$Q_C = \pi(dp/dx)(R_2 + R_1)^2(R_2 - R_1) \times [R_2 - R_1 - 2\theta/(dp/dx)]^2 / [4\eta(\sqrt{R_2} + \sqrt{R_1})^2], \quad (8.140)$$

де R_1, R_2 - відповідно внутрішній та зовнішній радіус труби, м;
 dp/dx - градієнт тиску, Па.

Розв'язувати рівняння (8.140) відносно dp/dx для того, щоб визначити перепад тиску на початку та в кінці труби, у загальному вигляді не має сенсу, оскільки це вирішення громіздке та незручне для застосування. Після підстановки чисельних значень всіх відомих величин dp/dx визначається достатньо легко.

Круглий канал:

$$Q_c = \pi(dp/dx)R^2 [R - 2\theta/(dp/dx)]^2 / 4\eta, \quad (8.141)$$

де R - радіус каналу.

Конічний дифузор:

$$Q_c = [9\pi tg^2 \varphi / (32\eta\theta)] [\Delta p - (2\theta/tg\varphi) \lg r_2/r_1]^2 \times \\ \times [r_2^3 - r_1^3 / (r_2^{3/2} - r_1^{3/2})], \quad (8.142)$$

де Δp - перепад тиску у вхідному та вихідному перерізах, Па;

r_2, r_1 - радіуси великого та малого перерізів, м; φ - кут розчину дифузора, град.

Формула (8.142) може застосуватися, коли $\varphi^2 \ll 1$, тобто при малих кутах розчину, та при величині в квадратних дужках значно менш, ніж Δp .

Для орієнтувальних розрахунків перепадів тиску при роботі з масою, яка має малу в'язкість (нижче $5 \cdot 10^3$ Па·с), можна рекомендувати емпіричні формули.

Перепад тиску по довжині каналу

$$\Delta p = Q_c \eta / K, \quad (8.143)$$

де Q_c - об'ємна швидкість (продуктивність), м³/с; η - в'язкість маси, яка формується, Па·с; K - константа опору.

Найбільш близькі для мас тіста є константи, які визначаються наступним чином:

Для круглого перерізу $K = 0,38 R^4 / l$; $\dot{\gamma} = 1,27 Q_c / R^3$.

Для кільцевого перерізу $K = 0,26 (R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^3 / l$;
 $\dot{\gamma} = 1,87 Q_c / [(R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^2]$.

За наведеними формулами розраховують перепад тиску в робочих каналах складної геометричної форми, розбиваючи його на ряд елементарних ділянок. Тоді загальна витрата тиску дорівнює:

$$\Delta p = Q_c \sum \eta_i / K_i, \quad (8.144)$$

де K_i , η_i - відповідно константа опору та в'язкість на кожній ділянці.

Такий спосіб дозволяє не тільки отримувати абсолютне значення тиску, але також обирати оптимальну форму робочого каналу, при якій величина перепаду тиску буде найменшою.

Для створення стаканчиків конусоподібної форми конічні матриці, які закріплені на конвеєрі агрегату, зупиняються над ванною з рідким тістом, що має оборотне – поступовий рух. При піднятті ванни матриці занурюються у тісто, при її опусканні на матрицях залишається шар тіста. Товщина шару залежить від реологічних властивостей тіста, швидкості ванни, форми та матеріалу матриці.

Експерименти показали, що товщина заготовки по твірній конусу постійна; це дозволяє масу тіста при постійній щільності та визначених розмірах конусу виразити через товщину шару. При переміщенні матриці усередині ванни утворюється деформований шар тіста, товщина якого значно менше твірної конусу ($H \leq L$). Процес течії вздовж твірної приймали ламінарним, усталеним, ізотермічним. Впливом поверхневого натягу тіста зневажували.

Для вивчення процесу обирали прямокутну систему координат. Ось OX розташовували паралельно твірній конуса на відстані H від неї, ось OY - вздовж нормалі до поверхні конуса, ось OZ - перпендикулярно площині XOY . Пів кута розчину конуса позначали α , швидкість переміщення матриці відносно ванни - v_M .

Вважали, що безмежна стінка, яка співпадає з віссю OX , є неру-

хомою, а паралельна стіна, розташована на відстані H від неї, переміщується з постійною швидкістю $v_M \cdot \cos \alpha$. Проектування вектору середньої швидкості на її твірну враховує геометрію матриці.

Виділяли в межах деформованого шару елементарний об'єм dV зі сторонами dx , dy , dz , який знаходиться під дією сили тяжіння dG та сили тертя в'язкості dF .

$$dF = d\theta_{yx} dx dz, \quad (8.145)$$

де $d\theta_{yx}$ - напруження зсуву, яке діє на площадці, нормальній до осі Y та спрямоване вздовж осі X .

Умова рівноваги об'єму dV :

$$\sum_x = 0; \quad d\theta_{yx} dx dz = dG \cos \alpha \quad (8.146)$$

або

$$d\theta_{yx} / dy = \rho g \cos \alpha, \quad (8.147)$$

де ρ - щільність тіста; g - прискорення вільного падіння.

Крива течії тіста, яке було використане, описується степеневим законом Оствальда де Віля $\theta_{yx} = K (du/dy)^n$.

Після математичних перетворень отримали вираз для швидкості течії тіста.

$$u = \left\{ (y \rho g \cos \alpha / K + C_1)^{(n+1)/n'} [(n+1) \rho g \cos \alpha / n K] \right\} + C_2, \quad (8.148)$$

Рівняння (8.148) виражає залежність початкової швидкості u деформованого шару від координати y , реологічних параметрів K та n , щільності тіста ρ та кута α . Після визначення постійних інтегрування C_1 та C_2 рівняння (8.148) розв'язували відносно H :

$$H = [K / (\rho g \cos \alpha)] [v_M \cos^2 \alpha (n+1) \rho g / n K]^{n/(n+1)}. \quad (8.149)$$

Знаючи товщину H та розміри матриці, можна знайти масу тіста на конусі.

Експерименти якісно підтвердили отримані результати [30].

Питання для самоконтролю

1. Який принцип використовують при розрахунках каналів змінного перерізу?
2. Які величини враховують вирази для опису течії продуктів для різних форм перерізу?
3. Як визначається загальна витрата тиску?
4. За якою методикою розраховується процес створення стаканчиків конусоподібної форми?

8.8 Течія матеріалу вздовж похилої поверхні та в полі відцентрових сил. Різання шару в'язко – пластичного продукту

При розгляді задачі течії вздовж похилої площині були прийняті наступні позначення: φ - кут нахилу площини до горизонту; a - ширина площини; h - товщина шару рідини, яка стікає. Осі координат прийняли за напрямками: ось x вздовж вільної поверхні та ось y перпендикулярно напрямку течії (донизу). Формула для розрахунку витрати рідини, яка стікає [27]:

$$Q_c = a \int_0^h u du \quad (8.150)$$

Інтегруючи рівняння за правилом Лейбница та вводячи нову змінну θ , отримали:

$$Q_c \theta_c^2 / (ah^2) = - \int_0^{\theta_c} (\partial u / \partial y) \theta d\theta \quad (8.151)$$

Величина $\partial u / \partial y$ для різних реологічних рівнянь має значення, які наведені у таблиці 8.16.

Для рідини, яка підлягає закону Оствальда, отриманий вираз для визначення товщини плівки рідини, яка стікає:

$$h = [K/(\rho g)]^{1/(2n+1)} [\nu((1+n)/n)]^{n/(2n+1)} (Q_c/a)^{n/(2n+1)}, \quad (8.152)$$

Таблиця 8.16 – Значення величини du/dy

Реологічне рівняння	Рівняння витрати
$\theta = K(\partial u/\partial y)^n$	$Q_c = [n a h^2 / (2n + 1)] (\rho g h \sin \varphi / K)^{1/n}$
$\theta = \theta_0 + K(\partial u/\partial y)^n$	$Q_c = [n a h^2 / (2n + 1)] (\rho g h \sin \varphi / K)^{1/n} (y - 1)^{n(n+1)} \times$ $\times [1 + n/(1 + n)] y$
$\partial u/\partial y = \varphi_0 \theta + \varphi_1 \theta^2$	$Q_c = \varphi_0 a h^3 \rho g \sin \varphi / 3 + (\varphi_1 a h^2 / 4) (\rho g \sin \varphi)^2$
$\partial u/\partial y = \varphi_0 \theta + \varphi_1 \theta^3$	$Q_c = \varphi_0 a h^3 \rho g \sin \varphi / 3 + (\varphi_1 a h^2 / 5) (\rho g \sin \varphi)^3$

Був розглянутий процес течії тіста по диску в результаті його обертання. Вважали, що течія строго радіальна. На диску знаходиться заготовка у вигляді пластини з буртом, висота H якого значно більше товщини h . Оскільки $H \gg h$, то тіло обертання умовно вважається таким, яке складається з кільцевого зазору диску зовнішнього радіусу R_2 та внутрішнього R_1 висотою H , а також суцільного диску висотою h і радіусу R_1 .

Процес руху маси тіста до периферії складається з двох етапів. На першому етапі під дією відцентрових сил у масі тіста виникають пружно – пластичні деформації, які переходять у пластичні. На другому етапі відбувається течія пластичної області, яка утворилася. Виникнення пластичної деформації швидше досягається в області, яка має форму кільцевого диску.

При обертанні відцентрові сили інерції:

$$F_{IH} = \rho \omega^2 r, \quad (8.153)$$

де ρ - щільність маси; ω - частота обертання; r - поточне значення радіусу.

Вважали, що дія сил інерції подібна дії внутрішнього тиску, який рівномірно розподілений по окружності радіусу R_1 .

Вводили циліндричну систему координат r, φ, z , ось z якої

проходе через центр диску. Внаслідок симетрії компоненти дотичних напружень рівні між собою.

Тиск p_0 , при якому на внутрішньому контурі вперше з'являються пластичні деформації, дорівнює [30]:

$$p_0 = \left[\sqrt{3} \theta_0 (R_2^2 - R_1^2) / \sqrt{3R_2^4 + R_1^4} \right], \quad (8.154)$$

де θ_0 - граничне напруження зсуву.

Критична швидкість обертання нижнього диску, при якій вперше з'являється пластична деформація в масі тіста,

$$\omega_{KP} = \left\{ \left[\sqrt{3} \theta_0 (R_2^2 - R_1^2) \right] / \left[\rho R_1 \sqrt{3R_2^4 + R_1^4} \right] \right\}^{0,5}. \quad (8.155)$$

У результаті виникнення пластичної деформації в кільцевому диску утворюється пластична зона радіусом R , поза неї матеріал залишається пружним. Зі збільшенням внутрішнього тиску пластична течія розповсюджується на весь матеріал.

Була розглянута течія пластичної області. При обертанні нижнього диска в обертання захоплюються шари маси, які під дією відцентрової сили починають рухатися до периферії диску, одночасно відбувається переміщення маси вздовж осі z донизу. Вважали, що течія маси радіальна та $u_r \gg u_z$.

З урахуванням того, що матеріал не стискується, диференціальне рівняння рівноваги при ізотермічному процесі приймає вигляд:

$$\partial \theta_{rz} / \partial z + \rho \omega^2 r = 0, \quad (8.156)$$

звідкіля

$$\theta_{rz} = \rho \omega^2 r (l - z), \quad (8.157)$$

де l - значення висоти шару маси в поточний момент.

Оскільки в пластичній області напруження перевищило граничне напруження зсуву, то течія в пластичній області аналогічна течії в'язко – пружного матеріалу.

Швидкість радіальної течії

$$h_r = z(l - z)\rho\omega^2 r \left[(1/\eta_{III}) + (1/\eta_2)e^{(-t/\lambda)} \right], \quad (8.158)$$

де λ - тривалість релаксації; η_{III} - пластична в'язкість; η_2 - коефіцієнт в'язкості; t - поточний час.

Витрата через циліндричну поверхню радіуса r

$$Q = \pi\rho\omega^2 r^2 l^3 \left[(1/\eta_{III}) + (1/\eta_2)e^{(-t/\lambda)} \right]. \quad (8.159)$$

Поточне значення висоти заготовки визначається за формулою:

$$l = \left\{ (2/3)\rho\omega^2 \left[(l/\eta_{III}) - (\lambda/\eta_2)(1 - e^{(-t/\lambda)}) \right] + (1/H^2) \right\}^{-0,5}. \quad (8.160)$$

При різанні дисковим ножом, який обертається, шару в'язко – пластичного матеріалу (рисунок 8.10,а) відносна швидкість різання v_y змінюється від максимального значення в точці 1 до мінімального в точці 3 [186]. У якості робочої моделі було обране утілення в шар пластинчатого ножа з плоским торцем. Були прийняті наступні припущення: ніж абсолютно жорсткий, пружні деформації відсутні, процес ізотермічний. Рівновага ножа під дією зовнішньої сили (рисунок 8.10,б):

$$P_1 + P_2 + P_3 = P - P_4, \quad (8.161)$$

де P_1 - сила опору, яка пропорційна зміненню швидкості ножа, Н; P_2 - сила в'язкого опору, Н; P_3 - сила бокового опору, Н; P_4 - сила торцевого опору, Н; P - сила різання, Н.

Опори P_1, P_2, P_3 залежать від переміщення ножа h . Сила P_4 постійна, при малої товщині ножа для неволокнистої в'язко – пластичної маси незначна, тому у подальших розрахунках не враховується.

Диференціальне рівняння руху ножа:

$$m\ddot{h} + \eta_{E\Phi}\dot{h} + Ah = P, \quad (8.162)$$

де $A = p_a l$, p_a - адгезійний тиск, Па; l - робоча довжина ножа, м; m - маса вантажу, який забезпечує утілення ножа з необхідною швидкістю, кг.

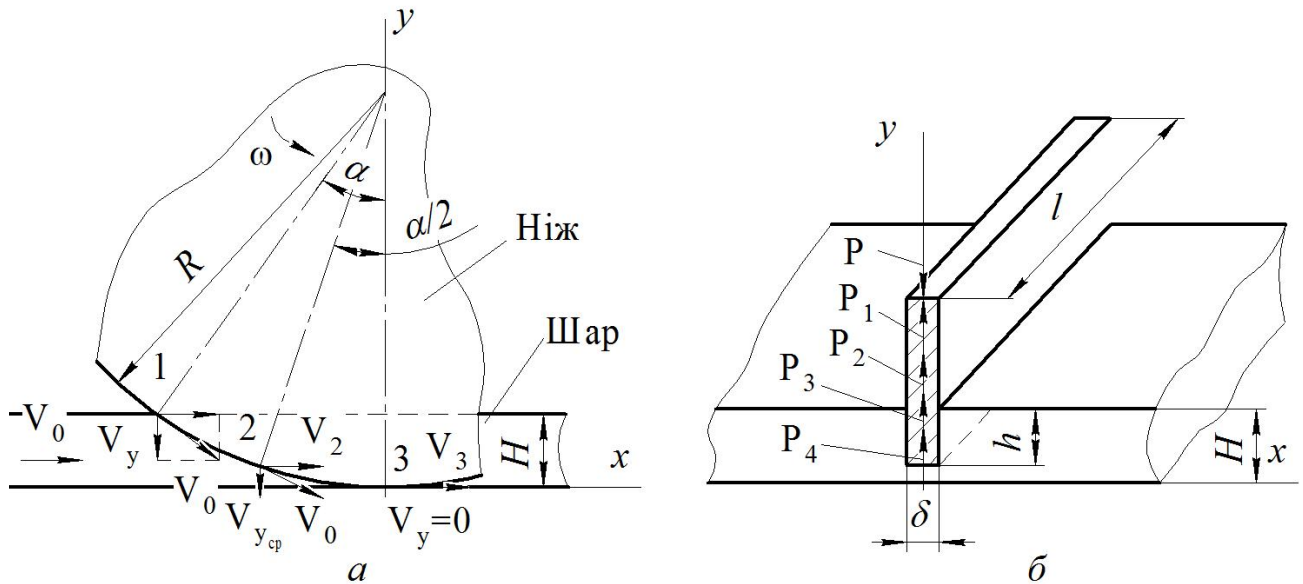


Рисунок 8.10 - Різання шару в'язко – пластичного матеріалу:
а – схема різання дисковим ножом; б – робоча схема

Записавши характеристичне рівняння для виразу (8.162) та розв'язавши його для випадку $\eta_{E\Phi}^2 > 4mA$, коли в'язкі опори значні у порівнянні з боковими, після відповідних перетворень було визначено зусилля різання (Н) при $H = h$:

$$P = 2A(v_y m B - H) / \left[(\eta_{E\Phi} + \sqrt{\eta_{E\Phi}^2 - 4mA}) C + 2(e^{q_1 t} - 1) \right], \quad (8.163)$$

де $B = (e^{q_1 t} - e^{q_2 t}) / \sqrt{\eta_{E\Phi}^2 - 4mA}$; $C = (e^{q_1 t} + e^{q_2 t}) / \sqrt{\eta_{E\Phi}^2 - 4mA}$;

$q_{1,2} = (-\eta_{E\Phi} \pm \sqrt{\eta_{E\Phi}^2 - 4mA}) / 2m$; t - тривалість різання; H - товщина шару; q_1 та q_2 - розв'язання характеристичного рівняння.

Потужність (Вт) різання за схемою, яка наведена на рисунку 3.10. а, визначається за формулою

$$N = Pr_{сер} \omega, \quad (8.164)$$

де $r_{сер}$ - середній радіус ножа, м; ω - кутова швидкість ножа, c^{-1} .

Питання для самоконтролю

1. Як розраховують витрати та товщину плівки рідини, яка стікає вздовж похилої поверхні?
2. З яких етапів складається процес руху маси тіста до периферії при течії тіста по диску, який обертається?
3. Як залежить пластична течія від змінення внутрішнього тиску в матеріалі?
4. Від яких величин залежать швидкість радіальної течії та поточне значення висоти заготовки?
5. Які сили враховують при розрахунку рівноваги дискового ножа при різанні шару в'язко – пластичного матеріалу?

8.9 Автоматизований контроль якості перемішування харчових мас по їх реологічним властивостям

Реологічні властивості напівфабрикатів використовують для оцінки проведення окремих процесів.

Технологічні машини різноманітних конструкцій, які призначені для здійснення одного і того же процесу, відрізняються ступеню впливу на масу, що переробляється. Це веде до отримання продуктів, які володіють неоднаковими структурно – механічними властивостями, та отриманню готової продукції різної якості. Дослідження впливу окремих машин на властивості напівфабрикатів дозволяє обирати найбільш доцільні конструкції для виробітки даного сорту хліба та підбирати оптимальні режими переробки.

Важливою задачею підвищення ефективності хлібопекарного виробництва є автоматизація процесу замісу тіста.

Процес замісу тіста здійснюється на тістомісильних агрегатах, які включають тістомісильну машину безперервної дії, дозатори муки та компонентів, контрольне – вимірювальну апаратуру.

У процесі роботи на тістомісильну машину впливають різноманітні збурювання, під дією яких величина тиску, що регулюється, приймає значення, яке відрізняється від заданого. Тому задачею автоматичного регулювання є повернення величини параметру на нормативне значення. Параметром, що регулюється, може бути величина дозування одного з компонентів, який поступає з дозатору. Для пра-

вильного обирання компоненту, що регулюється, необхідно враховувати умови дозування та змінення реологічних властивостей тіста у залежності від вмісту цього компонента при умові постійності дозування інших компонентів, яких вимагає рецептура продукту [30].

Дослідження показали, що консистенція тіста залежить в основному від дозування муки та дріжджового розчину. Зручно обирати дріжджовий розчин як компонент, що регулюється, оскільки він може дозуватися автоматично.

Для здійснення процесу регулювання консистенції замішаного тіста необхідно знати функцію $\Delta p = \Delta p(\Delta \eta)$ (Δp - відхилення вихідного тиску від значення, яке відповідає заданому значенню вихідного тиску, %; $\Delta \eta$ - відхилення в'язкості від значення, яке відповідає заданому значенню вихідного тиску, %). У свою чергу $\Delta \eta$ можна пов'язати з керуючим діянням, яке потребується, - зміненням дозування дріжджового розчину $\Delta G_{др}$, тобто знайти залежність $\Delta \eta = \Delta \eta(\Delta G_{др})$.

Для знаходження цієї залежності були виконанні відповідні експерименти. Використовуючи методику розрахунку течії в каналах складної форми, можна, визначити відповідні різним вмістам дріжджового розчину величини робочого тиску в місті установки датчика системи автоматичного регулювання. За результатами розрахунків був побудований графік, наведений на рисунку 8.11.

Отримана лінійна залежність стосовно до тістомісильної машини як об'єкту регулювання є статичною характеристикою. Тангенс куту нахилу отриманої прямої визначає коефіцієнт передачі об'єкту $K_{об}$. Для випадку, який розглядався, $K_{об}=2,6$. Величина тиску при нормальному дозуванні всіх компонентів відрізнялася від середнього значення, отриманого експериментально, на 12%.

До динаміки регулювання пред'являються визначені вимоги. При обиранні регулятора необхідно враховувати властивості об'єкту регулювання, які характеризуються відношенням t/T (t - час транспортного запізнювання, с; T - постійна часу об'єкта, с).

Величину t визначали за кривою розгону, вимірюючи відрізок часу від моменту нанесення збурення до моменту реакції датчика консистенції на це збурення. Час транспортного запізнювання обумовлений середньою швидкістю переміщення тіста по місильній ємкості. Постійну часу, яка характеризує інтенсивність змінення консите-

нції, також визначали за кривою розгону.

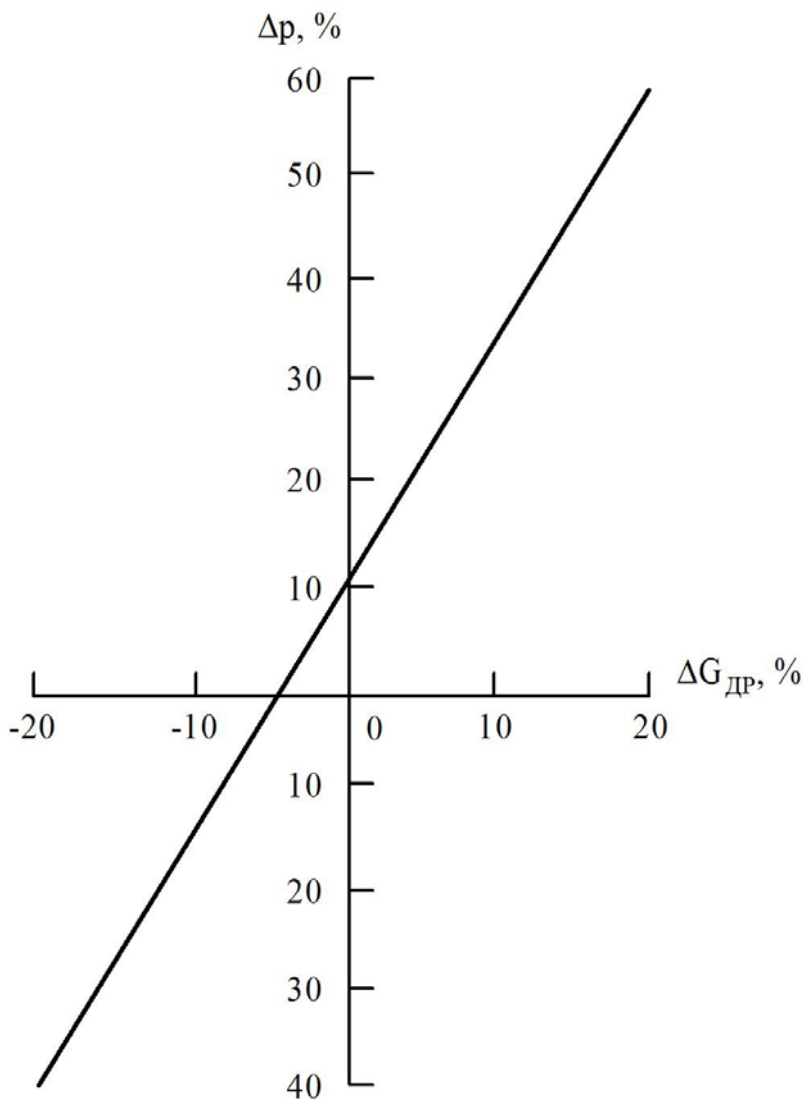


Рисунок 8.11 – Статична характеристика об’єкта регулювання $\Delta p = \Delta p(\Delta G_{др})$

Для об’єкту регулювання, який складається з тістомісильної машини та станції дозування, застосовували ізодромний закон регулювання. Ізодромний регулятор має два параметра настройки: коефіцієнт передачі регулятора K_P та час ізодрому T_{I3} . З графіку настройки регулятора знаходили дві величини: коефіцієнт передачі системи регулювання $K_C=0,4$, та відношення часу ізодрома до часу запізнювання $T_{I3}/t=1,1$, звідкіля $T_{I3}=1,1$; $t=2,2$ хв.

Коефіцієнт передачі регулятора дорівнює:

$$K_P = K_C / K_{об} , \quad (8.165)$$

де K_C - коефіцієнт передачі системи регулювання; $K_{об}$ - коефіцієнт передачі об’єкта.

Для випадку, який розглядався, $K_P=0,15$.

Таким чином, проведенні дослідження як роботи тістомісильної машини, так і реологічних властивостей тіста дозволили створити систему автоматичного регулювання консистенції тіста для хрустких хлібців [30].

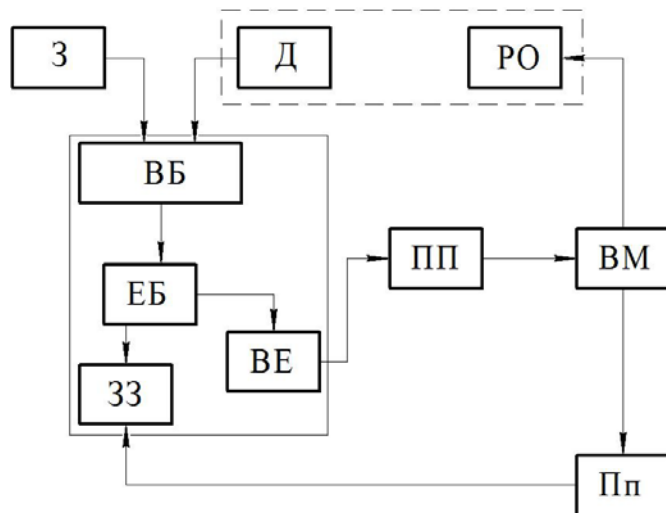


Рисунок 8.12 – Структурна схема автоматичного регулювання консистенції тіста

Структурна схема автоматичного регулювання наведена на рисунку 8.12.

Сигнал датчика Д, пропорційний величині робочого тиску в вихідному патрубку машини, поступає в електронний регулятор. У вимірювальному блоці регулятора ВБ, схема якого залежить від типу датчика, електричний сигнал помножується на постійний коефіцієнт та порівнюється з заданим. Установка заданого значення параметру, який регулюється,

здійснюється задатчиком (частіше, проволочений потенціометр).

Вимірювальний блок є мостом змінного струму, вихід якого підключений до фазочутливого підсилювачу. При відхиленні від заданого значення сигнал розбалансу поступає на електронний блок ЕБ, який збільшує сигнал розбалансу, формує відповідний закон регулювання та діє за допомогою вихідного елемента ВЕ на пусковий пристрій виконавчого механізму ВС. Окрім того, в електронний блок поступають сигнали від безконтактного датчика положення, що забезпечує оборотний зв'язок (ОЗ) по положенню органу регуляції.

Основними елементами електричного виконуючого механізму, є електродвигун, редуктор, вихідний пристрій для механічного з'єднання з регулюючим органом РО та додаткові пристрої, що забезпечують самогальмування при відключенні електродвигуна, зупинку механізму в крайніх положеннях і т. д. Регулюючий орган – поршень, який займає визначений рівень у стакані дріжджового дозатора у залежності від величини робочого тиску. У схемі передбачається указник положення регулюючого органа УП.

При створенні механізованих поточних ліній необхідно передбачати безперервний контроль якості напівфабрикатів. Хімічні та органолептичні методи оцінки не дозволяють визначити якісний стан тіста безпосередньо в процесі обробки. Реологічні методи дозволяють встановити залежності між якістю тіста та його властивостями, на-

приклад в'язкостю, які можна використовувати не тільки для контролю якості, але і для регулювання в процесі виробництва.

Для контролю стану хлібопекарного тіста недостатньо вимірювання будь – якого одного параметру, тому доцільно застосовувати багатопараметричний розрахунковий метод. Знаходять рівняння регресії, яке характеризує якість системи. Це рівняння може бути зведене до знаходження залежностей між єдиним, узагальненим показником якості та окремими інтегральними показниками якості, які залежать від вмісту багатьох компонентів [30]. Залежність між узагальненим та інтегральними якісними показниками виражається рівнянням:

$$x_{1,2,\dots,m} = b_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_mx_m, \quad (8.166)$$

де $x_{1,2,\dots,m}$ - середнє значення узагальненого показника якості;

b_1, b_2, \dots, b_m - коефіцієнти регресії; x_2, x_3, \dots, x_m - значення окремих інтегральних показників якості.

Таким чином, визначення узагальненого показника якості багатокомпонентного продукту може бути зведене до вимірювання невеликої кількості інтегральних параметрів (щільності, в'язкості, рН, електропровідності та інших) та розв'язанню знайденого рівняння регресії. Вимірювання окремих параметрів здійснюється за допомогою датчиків, інформація від яких поступає на пристрій для розв'язання рівняння регресії. Результат розв'язання видається для подальшого використання в системах автоматичного контролю та регулювання. Для хлібопекарного тіста були обрані наступні параметри: в'язкість, кислотність (рН) та температура.

Залежність між узагальненим показником якості тіста $x_{1,2,3}$ та окремими його показниками: x_1 (активна кислотність), x_2 (в'язкість) та x_3 (температура) – можна записати у наступному вигляді:

$$x_{1,2,3} = A + Bx_1 + Cx_2 + Dx_3, \quad (8.167)$$

де A, B, C, D - емпіричні коефіцієнти, отримані у випробуваннях.

Отримана залежність дозволила запропонувати систему автоматичного контролю якості (рисунок 8.13).

Датчики кислотності Dx_1 , в'язкості Dx_2 та температури Dx_3 передають про поточні значення параметрів тіста в повторні прилади $ВП_1 - ВП_3$. З них сигнали поступають у розрахунково - розв'язувальний пристрій.

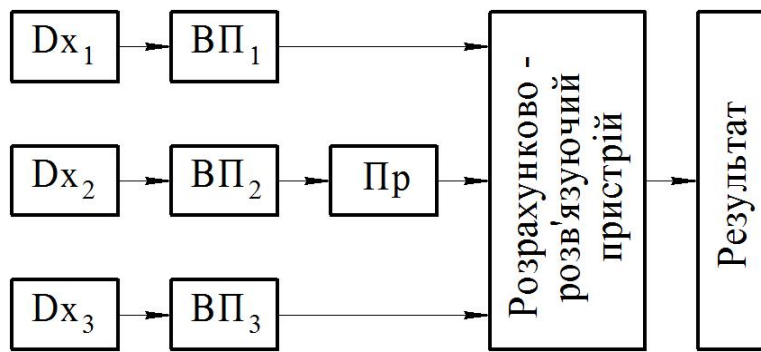


Рисунок 8.13 – Структурна схема автоматичного контролю якості тіста

Оскільки автоматичний датчик в'язкості Dx_2 виробляє пневматичні сигнали, то за прибором $ВП_2$ встановлений пневмоелектричний перетворювач $Пр$, який перетворює отримані сигнали та посилає їх у розрахунково - розв'язувальний пристрій.

Цей пристрій видає кінцевий результат.

Був розроблений прилад для оптимізації тривалості процесу збивання з ціллю підвищення якості продукту та технічного рівня збивальних машин періодичної дії [23].

Проаналізувавши конструкції збивальних машин періодичної дії та принцип їх роботи (різноманітні швидкості робочого органа, використання різних робочих органів, умови найбільшого охопту продукту та ін.), а також умови експлуатації машин (різноманіття сумішей, вплив температури навколишнього середовища і т. д.), вважали, що застосування приладів для безпосереднього визначення реологічних показників не є доцільним.

Тому був вивчений вплив змінення реологічних показників сумішей на змінення потужності, яку витрачають машини в процесі збивання. На змінення потужності оказують вплив як змінення об'єму первісного продукту внаслідок насиченості його повітрям, так і змінення в'язкості та граничного напруження зсуву суміші. Для однієї і тієї рецептури суміші, конкретної машини та робочого органу факторами, які впливають на значення споживчої потужності є: завантаження бачку, температура, швидкість обертання робочого органу.

Аналіз проведених досліджень дав змогу вважати, що опосеред-

кованим критерієм, по якому можна судити про ступінь готовності продукту є величина роботи (енерговитрат). Сумарна питома робота, яка затрачується на доведення збитої суміші до готовності, є найбільш стійкою характеристикою до зміни частоти обертання робочого органу, температури та маси продукту, і може бути найбільш об'єктивним критерієм для визначення моменту готовності сумішей.

Була отримана математична модель, яка відображає залежність між питомою роботою, граничним напруженням, щільністю та температурою суміші, яка збивається [23].

$$\frac{\sum A_i}{m} = a_0 + a_1 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{b_1 t} + a_2 \left(\frac{\theta_0}{\theta_0'} \right)^{b_2 t}, \quad (8.168)$$

де $\sum A_i$ - сумарна корисна робота на i -й момент часу; m - маса продукту; ρ - щільність суміші, що збивається; ρ_0 - початкове значення щільності суміші; θ_0 - граничне напруження зсуву; θ_0' - початкове значення граничного напруження зсуву; t^0 - температура суміші; a_0, a_1, a_2, b_1, b_2 - коефіцієнти моделі.

Високі коефіцієнти кореляції між наведеними величинами показали наявність тісного кореляційного зв'язку, який відображає функціональну залежність між ними.

Наприклад, сумарна робота, яка необхідна для отримання білково – цукрової суміші (1:2,2) з необхідними структурно – механічними характеристиками, може бути визначена по залежності:

$$\frac{\sum A_i}{m} = 0,109 + 0,034 \left(\frac{\rho}{887} \right)^{-0,175t} - 0,005 \left(\frac{\theta_0}{\theta_0'} \right)^{0,119t}. \quad (3.169)$$

Ці дослідження дозволили розробити електронний пристрій для оптимізації тривалості процесу збивання, який відповідає наступним вимогам: забезпечує можливість оптимізації тривалості процесу збивання сумішей різноманітних рецептур, тобто інформація про значення опосередкованого критерію готовності крему може бути зміне-

на або скорегована на конкретній машині; пристрій уніфікований для різних типів машин; критерій готовності продукту (робота, яка витрачена) не залежить від технічного стану збивальної машини.

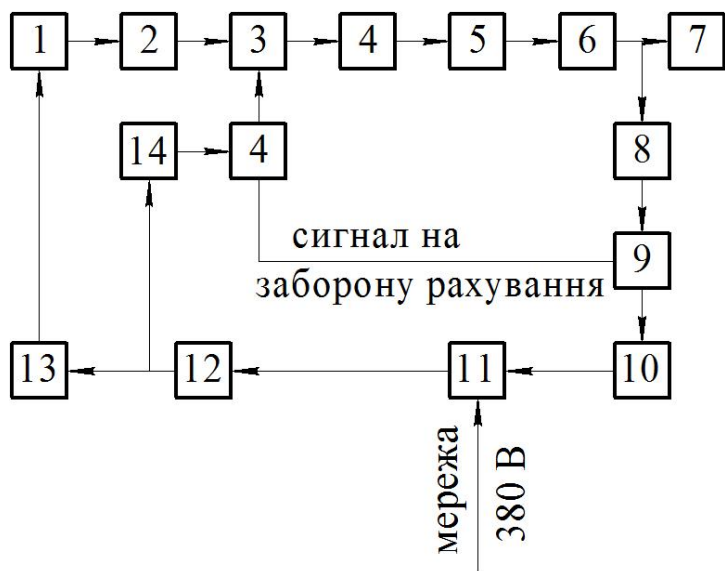


Рисунок 8.14 – Блок – схема приладу:

1 – оптоелектронна пара; 2 - тригер Шмітта; 3 – схема заборони рахунку; 4 – компаратор; 5 – лічильник; 6 – дешифратор; 7 – пристрій індикації; 8 – пристрій введення числа; 9 – схема збігу; 10 – виконавчий пристрій; 11 – магнітний пускач; 12 – електродвигун збивальної машини; 13 – електричний 3-х фазний лічильник; 14 - токовий датчик

Блок – схема електронного пристрою наведена на рисунку 8.14.

Оптоелектронна пара (1) влаштована в електричному лічильнику (13). У момент засвічення фотодіоду напруження на колекторі транзистора різко зменшується. Це еквівалентно вступу на вхід тригера Шмітта (2), сигнал з якого піддається через пристрій дозволу рахунку (3) на вхід лічильника (5). Пристрій вводу умовного числа (8), яке характеризує величину роботи, виконаний на чотирьох перемикачах, контакти яких, як і катоди індикаторних лам (7) приєднанні до відповідних виходів дешифратора (6).

По досягненню показань індикаторів заздалегідь встановленого числа на перемикачах виробляються сигнали, що заведені на схему збігу (9), яка формує команду на зупинку електродвигуна машини (12). Виконавчий прилад (10) приймає цю команду та за допомогою проміжного реле знеструмлює котушку пускачу (11). Одночасно прилад збігу (9) формує сигнал заборони рахунку, який поступає на компаратор (4) та на прилад рахунку (3). Окрім того компаратор (4) порівнює напруження, що поступає з датчика струму (14) з опорним напруженням, яке можна регулювати. При збігу компаратор формує сигнал для схеми дозволу рахування (3). Коли на валу двигуна з'являється навантаження, через датчик струму тече великий струм, що веде до зросту вхідного напруження. Якщо це напруження досягає

опорної величини, рахування буде дозволене, оскільки пристрій рахує корисну роботу.

Аналіз результатів лабораторних та виробничих випробувань показав, що розроблений прилад забезпечує отримання реологічних характеристик, близьких до оптимальних, відхилення складає 2-7 %.

У цій главі наведені приклади використання реологічних характеристик при розрахунках деяких процесів харчової промисловості. Контроль якості напівфабрикатів та готової продукції за їх реологічними властивостями у сукупності з деякими фізичними та технологічними параметрами є перспективним напрямком досліджень.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає задача автоматичного регулювання процесу безперервного замісу тіста?

2. Залежність яких величин необхідно враховувати для здійснення процесу регулювання консистенції змішаного тіста?

3. Які вимоги пред'являються до автоматичного регулювання протікання процесу отримання необхідної консистенції тіста?

4. З яких елементів складається схема автоматичного регулювання процесу безперервного замісу тіста?

5. Чому для контролю стану хлібопекарного тіста доцільно використовувати узагальнений показник якості?

6. Які інтегральні показники якості враховують при розрахунку узагальненого показника якості?

7. Яку фізичну величину можна вважати опосередкованим критерієм, по якому можна судити про ступінь готовності збитої суміші?

8. Які величини суттєво впливають на величину енерговитрат при збиванні продукту?

9. Яким вимогам відповідає електронний пристрій для оптимізації тривалості процесу збивання?

ЛІТЕРАТУРА

1. Азаров Б. М. Инженерная реология пищевых производств / Б.М. Азаров, В.А. Арет. – М.: МТИПП, 1978. – 112 с.
2. Астарита Д. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Д. Астарита, Д. Маруччи. – М: Мир, 1978. – 309 с.
3. Ауэрман Л. Я. Технология хлебопекарного производства / Л.Я. Ауэрман. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 512 с.
4. Белкин И.М. Ротационные приборы / И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, А.И. Леонов. – М.:Машиностроение, 1968. – 272 с.
5. Беркутова Н.С. Микроструктура пшеницы / Н.С. Беркутова, И.А. Швецова. – М.: Колос, 1977. – 125 с.
6. Берлин А.А. Основы адгезии полимеров / А.А. Берлин, В.Е. Басин. – М.: Химия, 1969. – 320 с.
7. Вайткус В.В. Гомогенизация молока / В.В. Вайткус. – М.: Пищевая промышленность, 1967. – 216 с.
8. Великовский Д.С. Консистентные смазки / Д.С. Великовский, В.Н. Поддубный, В.В. Вайншток, Б.Д. Готовки. – М.: Химия, 1966. – 256 с.
9. Вода в пищевых продуктах / Под ред. Р.Б. Дакуорта. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 375 с.
10. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов / И.И. Гольберг. - М.: Химия, 1970. – 237 с.
11. Гончаревич И.Ф. Вибрационная техника в пищевой промышленности / И.Ф. Гончаревич, Н.Б. Урьев, М.А. Талейсник. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 278 с.
12. Горбатов А.В. Гидравлика и гидравлические машины для вязко - пластичных масс / А.В. Горбатов, В.Д. Косой, Я. И. Виноградов. - М.: МТИММП, 1977. – 86 с.
13. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов / А.В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 383 с.
14. Горбатов А.В. Структурно – механические характеристики пищевых продуктов /Под ред. А.В. Горбатова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.
15. Гуль В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – М.: Высшая школа, 1979.- 352 с.
16. Дерягин Б.В. Что такое трение? / Б.В. Дерягин. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 231 с.
17. Зайковский Я.С. Химия и физика молока и молочных

продуктов / Я.С. Зайковский. – М.: Пищепромиздат, 1950. - 370 с.

18. Измайлова В.Н. Структурообразование в белковых системах / В.Н. Измайлова, П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1974. – 268 с.

19. Ким А.Х. Некоторые вопросы реологии вязкопластичных дисперсных систем / А.Х. Ким. – Минск: Редиздат БПИ, 1960. – 81 с.

20. Колеснікова М.Б. Дослідження структурно-механічних властивостей продукту структурованого / М.Б. Колеснікова, М.Ф. Перцевий, Н.В. Гурський // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2011. – С. 37-43.

21. Косой В.Д. Инженерная реология в производстве колбас / В.Д. Косой, А.Д. Малышев, С.Б. Юдина. – М.: Колос, 2005. – 262 с.

22. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности / Г.А. Кук. - М.: Пищевая промышленность, 1973. – 767 с.

23. Левіт І.Б. Реологія харчових продуктів / І.Б. Левіт, В.О. Сукманов, Д.С. Ффенченко – Донецьк: ДонНУЕТ, 2012. – 408 с.

24. Мак – Кельви Д. М. Переработка полимеров / Д.М. Мак – Кельви; пер. с англ. - М.: Химия, 1965. – 444 с.

25. Маршалкин Г.А. Современная техника упаковки кондитерських изделий / Г.А. Маршалкин, В.В. Симутенко. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 144 с.

26. Маслов А.М. Инженерная реология в пищевой промышленности / А.М. Маслов. - Л.: ЛТИХП МВ и ССО РСФСР, 1977. – 88 с.

27. Маслов А.М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей / А.М. Маслов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 206 с.

28. Маслова Г.В. Реология рыбы и рыбных продуктов / Г.В. Маслова, А.М. Маслов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.

29. Мачихин Ю.А. Современные способы формования конфетных масс / Ю.А. Мачихин, Ю.В. Клаповский. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 184 с.

30. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.

31. Мачихин Ю.А. Реометрия пищевого сырья и продуктов / Ю.А. Мачихин. – М.: Агропромиздат, 1990. – 320 с.

32. Мачихин Ю.А. Современное оборудование в обработке пищевых материалов давлением. / Ю. А. Мачихин, Г. Г.

Зурабишвили, С. Н. Панфилова. - М.: Изд – во ВЗПИ, 1991. - 307 с.

33. Мачихин Ю. А. Формование пищевых масс / Ю. А. Мачихин, Г. К. Берман, Ю. В. Клаповский. - М.: 1992. - 271 с.

34. Николаев Б.А. Измерение структурно – механических свойств пищевых продуктов / Б.А. Николаев. – М.: Экономика, 1964. – 224 с.

35. Николаев Л. К. Реологические свойства жиросодержащих пищевых продуктов / Л.К. Николаев. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1978. – 86 с.

36. Перцевой Ф.В. Вивчення впливу рецептурного складу сирного продукту м'якого на текстурні характеристики / Ф. В. Перцевой, М. В. Обозна, С.В. Журавльов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2011. – С. 17-23.

37. Перцевой Ф.В. Дослідження граничного напруження зсуву напівфабрикату сирного кисломолочного з використанням ядра соняшникового насіння / Ф.В. Перцевой, Д.О. Бидюк // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2011. – С. 30-37.

38. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П.А. Ребиндер. – М.: 1966. - 316 с.

39. Рейнер М. Реология / М. Рейнер. – М.: Наука, 1965. – 224 с.

40. Рогов И.А. Новые физические методы обработки мясопродуктов / И.А. Рогов, А.В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 302 с.

41. Рогов И.А. Физические методы обработки мясопродуктов / И.А. Рогов, А.В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 583 с.

42. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1970. - Т. 1. – 492 с.

43. Северс Э.Т. Реология полимеров / Э. Т. Северс. – М.: Химия, 1966. – 200 с.

44. Соколов А.А. Физико-химические и биохимические основы технологи мясопродуктов / А.А. Соколов. – М.: Пищевая промышленность, 1965. – 490 с.

45. Справочник кондитера. Ч.14 / под ред. Е.И. Журавлевой. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 712 с.

46. Сукманов В.А. Сверхвысокое давление в пищевых технологиях. Состояние проблемы: монография / В.А. Сукманов,

В.А. Хазипов; Донец. гос. ун-т экономики и торговли им. М. Туган-Барановского. – Донецк: ДонГУЭТ, 2003. – 168 с.

47. Туменов С.Н. Обработка мясных продуктов давлением / С.Н. Туменов, А.В. Горбатов, В.Д. Косой. - М.: Агропромиздат, 1991. - 205 с.

48. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. - М.: Мир, 1964. – 216 с.

49. Уманцев А.З. Физико-механические характеристики рыб / А.З. Уманцев. - М.: Пищевая промышленность, 1980. – 152 с.

50. Урьев Н.Б. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс / Н.Б. Урьев, М.А. Талейсник. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 240 с.

51. Федоткин И.М. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности / И.М. Федоткин, В.П. Клочков. – Киев: Техника, 1974. – 308 с.

52. Химический состав пищевых продуктов / Под. Ред. А. А. Покровского. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 228 с.

53. Шульман В.П. Конвективный тепломассоперенос в реологически сложных жидкостях / В.П. Шульман. – М.: Энергия, 1975. – 350 с.

54. Яхно О.М. Основы реологии полимеров / О.М. Яхно, В.Ф. Дубовицкий. – Киев: Вища школа, 1976. – 186 с.

55. Skelland A. H. Non – Newtonian Flow and Heat Transfer, Wiley, New York, 1967. 469 p.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
ПЕРЕДМОВА	5
<i>Питання для самоконтролю</i>	11
Розділ 1. НАУКОВІ ОСНОВИ ІНЖЕНЕРНОЇ РЕОЛОГІЇ	12
1.1 Класифікація реальних тіл	12
<i>Питання для самоконтролю</i>	13
1.2 Класифікація дисперсних систем та їх структур	13
<i>Питання для самоконтролю</i>	17
1.3 Основні терміни та визначення реології	18
<i>Питання для самоконтролю</i>	27
1.4 Класифікація неньютонівських систем	27
<i>Питання для самоконтролю</i>	32
1.5 Основні рівняння напружень та деформацій реальних тіл	33
<i>Питання для самоконтролю</i>	38
1.6 Реологічні механічні моделі	38
<i>Питання для самоконтролю</i>	77
1.7 Структурно – механічні характеристики як об’єктивний показник якості харчових продуктів	78
<i>Питання для самоконтролю</i>	79
Розділ 2. СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	80
2.1 Властивості зсуву харчових продуктів	80
2.1.1 Класифікація реологічних тіл по структурно – механічним властивостям зсуву	80
<i>Питання для самоконтролю</i>	89
2.1.2 Властивості зсуву дисперсних харчових мас	90
<i>Питання для самоконтролю</i>	91
2.2 Компресійні властивості харчових продуктів	92
2.2.1 Основні рівняння деформації	92
2.2.2 Розрахункові рівняння процесу стиску	96
<i>Питання для самоконтролю</i>	99
2.3 Поверхневі властивості та основні закономірності взаємодії продуктів та матеріалу, з яким вони контактують	100
<i>Питання для самоконтролю</i>	102

Розділ 3. МЕТОДИ ТА ПРИБОРИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СТРУКТУРНО – МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	1103
3.1 Методи визначення дисперсності продуктів	1103
<i>Питання для самоконтролю</i>	1109
3.2 Класифікація методів та приборів для вимірювання структурно – механічних характеристик	1110
<i>Питання для самоконтролю</i>	1112
3.3 Методи та прибори для вимірювання характеристик зсуву	1113
3.3.1 Ротаційні віскозиметри	1113
<i>Питання для самоконтролю</i>	1130
3.3.2 Віскозиметри капілярні і з падаючою кулькою	1131
<i>Питання для самоконтролю</i>	1140
3.3.3 Прибори з плоскопаралельним зазором	1141
<i>Питання для самоконтролю</i>	1144
3.3.4 Пенетрометри та консистометри	1145
<i>Питання для самоконтролю</i>	1165
3.4 Методи та прилади для вимірювання компресійних характеристик	1165
3.4.1 Прилади для осьового стискування продукту	1166
3.4.2 Прилади для об'ємного стискування продукту	1168
3.4.3 Прилади для розтягу продукту	1170
<i>Питання для самоконтролю</i>	1173
3.5 Універсальні прилади	1174
<i>Питання для самоконтролю</i>	1185
3.6 Методи і прилади для вимірювання поверхневих характеристик	1186
3.6.1 Адгезіометри	1186
<i>Питання для самоконтролю</i>	1193
3.6.2 Прилади для визначення зовнішнього тертя	1193
<i>Питання для самоконтролю</i>	1198
3.7 Методи і прилади для відносних і умовних вимірювань характеристик, безперервно діючі прилади	1198
3.7.1 Прилади для відносних і умовних вимірювань	1198
<i>Питання для самоконтролю</i>	1202
3.7.2 Безперервно діючі прилади	1203
<i>Питання для самоконтролю</i>	1208
3.8 Методи і прилади для виміру тиску	1209
3.8.1 Механічні датчики	1209

3.8.2 Електричні датчики	221
<i>Питання для самоконтролю</i>	221
Розділ 4. СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ М'ЯСНИХ ПРОДУКТІВ	222
4.1 Характеристики зсуву м'ясних продуктів	222
4.1.1 Характеристики зсуву рідинообразних та ньютонівських систем	222
<i>Питання для самоконтролю</i>	226
4.1.2 Характеристики зсуву твердообразних систем	227
<i>Питання для самоконтролю</i>	244
4.2 Компресійні та характеристики міцності, щільності м'ясних та рибних продуктів	245
4.2.1 Компресійні характеристики при осьовому стиску	245
<i>Питання для самоконтролю</i>	247
4.2.2 Компресійні характеристики при об'ємному стиску	248
<i>Питання для самоконтролю</i>	252
4.2.3 Компресійні характеристики в процесі деформування під дією високого тиску	252
<i>Питання для самоконтролю</i>	259
4.2.4 Характеристики міцності цілих тканин м'яса	259
<i>Питання для самоконтролю</i>	262
4.2.5 Щільність м'ясних продуктів	262
<i>Питання для самоконтролю</i>	264
4.3 Поверхневі характеристики м'ясних продуктів	265
4.3.1 Характеристики адгезії (липкість) м'ясних продуктів	265
<i>Питання для самоконтролю</i>	267
4.3.2 Фрикційні характеристики м'ясних та рибних продуктів	268
<i>Питання для самоконтролю</i>	270
Розділ 5. СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛОКА ТА МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ	271
5.1 Характеристики зсуву молочних продуктів	271
5.1.1 Характеристики зсуву рідинообразних продуктів	271
<i>Питання для самоконтролю</i>	282
5.1.2 Характеристики зсуву твердообразних систем	282
<i>Питання для самоконтролю</i>	299
5.2 Компресійні та характеристики міцності, щільність молочних продуктів	300

5.2.1 Компресійні характеристики в процесі деформування під дією високого тиску	301
5.2.2 Вплив компонентів складу продукту на компресійні характеристики	309
5.2.3 Щільність молочних продуктів	312
<i>Питання для самоконтролю</i>	313
5.3 Поверхневі характеристики молока та молочних продуктів	314
<i>Питання для самоконтролю</i>	319
Розділ 6. СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИПУЧИХ ПРОДУКТІВ ТА БОРОШНЯНИХ ВИРОБІВ	320
6.1 Характеристики зсуву сипучих продуктів та борошняних виробів	320
6.1.1 Характеристики зсуву рідинообразних продуктів	320
6.1.2 Характеристики зсуву твердообразних продуктів	323
<i>Питання для самоконтролю</i>	358
6.2 Компресійні та характеристики міцності, щільність сипучих продуктів та борошняних виробів	358
6.2.1 Осьовий стиск	358
<i>Питання для самоконтролю</i>	367
6.2.2 Осьовий розтяг та згин	368
6.2.3 Зсув та згин	372
<i>Питання для самоконтролю</i>	374
6.2.4 Об'ємний стиск та щільність	374
<i>Питання для самоконтролю</i>	391
6.3 Поверхневі характеристики сипучих продуктів та борошняних виробів	392
6.3.1 Адгезія тестових мас	392
6.3.2 Фрикційні характеристики сипучих продуктів та борошняних виробів	401
<i>Питання для самоконтролю</i>	405
Розділ 7. СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДИТЕРСЬКИХ ПРОДУКТІВ	406
7.1 Характеристики зсуву кондитерських продуктів	406
<i>Питання для самоконтролю</i>	451
7.2 Тиксотропні властивості кондитерських виробів	452
<i>Питання для самоконтролю</i>	457
7.3 Компресійні та характеристики міцності, щільність кондитерських продуктів	457
<i>Питання для самоконтролю</i>	471

7.4 Поверхневі характеристики кондитерських продуктів	471
<i>Питання для самоконтролю</i>	483
Розділ 8. ТЕЧІЯ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ ПО КАНАЛАМ. ВИКОРИСТАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ОБЛАДНАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ	484
8.1 Течія неньютонівських матеріалів по каналах різної форми	484
8.1.1 Течія в круглому каналі	485
8.1.2 Течія між плоскими паралельними пластинами	489
8.1.3 Течія у прямокутному каналі	491
8.1.4 Течія в каналі кільцевого перерізу	493
8.1.5 Течія у віскозиметричних системах	495
<i>Питання для самоконтролю</i>	503
8.2 Течія харчових мас по коротким каналам. Розрахунок пристрою для формування	503
<i>Питання для самоконтролю</i>	511
8.3 Розрахунок шнекових нагнітачів	512
<i>Питання для самоконтролю</i>	515
8.4 Розрахунок продуктивності та потужності трибових нагнітачів	515
<i>Питання для самоконтролю</i>	518
8.5 Розрахунок валкових приладів	518
<i>Питання для самоконтролю</i>	525
8.6 Розрахунок процесу течії харчових мас вздовж довгих каналів (трубопроводів)	525
<i>Питання для самоконтролю</i>	533
8.7 Канали змінного перерізу. Формування тестових заготовок конусоподібної форми	533
<i>Питання для самоконтролю</i>	537
8.8 Течія матеріалу вздовж похилої поверхні та в полі відцентрових сил. Різання шару в'язко – пластичного продукту	537
<i>Питання для самоконтролю</i>	542
8.9 Автоматизований контроль якості перемішування харчових мас по їх реологічним властивостям	542
<i>Питання для самоконтролю</i>	550
Література	551

Левіт Ірина Борисівна. к.т.н., доцент
Сукманов Валерій Олександрович, д.т.н., професор
Афенченко Дмитро Сергійович, асистент

РЕОЛОГІЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Підручник