

sheba.spb.ru/delo.htm
Профессиональные знания в СССР

А. В. Горбатов

РЕОЛОГИЯ
МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ
ПРОДУКТОВ

*** 1979 ***

ОРИГИНАЛ ОБЛОЖКИ ОТСУТСТВУЕТ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава I

Основы реологии мясных и молочных продуктов 8

Общие положения 8

Основные уравнения напряжений и деформаций 14

Классификация реологических тел и их основные структурно-механические свойства 29

Влияние температуры и влажности на структурно-механические свойства 44

Глава II

Методы и приборы для измерения структурно-механических свойств мясных и молочных продуктов 49

Общие положения 49

Методы и приборы для измерения сдвиговых свойств 53

Ротационные вискозиметры 55

Капиллярные вискозиметры 88

Пенетрометры, консистометры и другие вискозиметры 102

Методы и приборы для измерения компрессионных характеристик 111

Методы и приборы для измерения характеристик продуктов на границе раздела с твердыми телами 121

Глава III

Сдвиговые свойства мясных и молочных продуктов 133

Сдвиговые свойства твердообразных продуктов 133

Влияние различных технологических факторов на структурно-механические свойства 147

Сдвиговые свойства жидкообразных продуктов и влияние на них различных технологических факторов 186

Глава IV

Компрессионные характеристики и плотность мясных и молочных продуктов 209

Компрессионные характеристики мясных продуктов 209

Компрессионные характеристики молочных продуктов 231

Плотность мясных и молочных продуктов 235

Глава V

Поверхностные характеристики мясных и молочных продуктов 240

Адгезионные характеристики (липкость) мясных и молочных продуктов 240

Фрикционные характеристики мясных и молочных продуктов 262

Глава VI

Реологические исследования и расчеты некоторых рабочих органов машин 273

Общие положения 273

Приборы, стенды и методы исследования рабочих органов машин 276

Уравнения движения пластично-вязких продуктов 289

Реологические расчеты 308

Глава VII

Устройства для перемещения пластично-вязких мясных и молочных продуктов 323

Насосы 323

Устройства для пневмогидротранспортировки продуктов 352

Приложения 361

Предметный указатель 363

Список использованной литературы 369

Горбатов А. В. Реология мясных и молочных продуктов, 1979. В монографии, посвященной проблемам реологии, мясные и молочные продукты представлены как объекты инженерной физико-химической механики, в этом аспекте трактуются основные результаты различных исследований. Особое внимание уделено рассмотрению комплексных инженерно-технологических направлений исследования структурно-механических свойств и различных реологических процессов с целью разработки методов их расчетов и совершенствования. При этом предпочтение отдано тем исследованиям, в которых использованы научно обоснованные методики и приборы, а для обобщения экспериментальных данных привлечены фундаментальные теоретические законы.

Основываясь на приведенных результатах разносторонних исследований мясных и молочных продуктов, можно выполнять расчеты ряда рабочих органов машин, находить оптимальные режимы их эксплуатации с учетом качественных показателей и т. д. Отдельные положения работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях в области изучения структурно-механических свойств пищевых продуктов и различных устройств для их механической, термической, электрической и других видов обработки, а также при разработке методов оценки качества продуктов.

Таблиц 68. Иллюстраций 90. Список литературы — 221 название.

Рецензенты: проф., д-р техн. наук А. М. МАСЛОВ,
канд. техн. наук Г. Е. ЛИМОНОВ.

ОЛГО... ОБЛАСТНАЯ

... К 8
... СЕРИИ

Г $\frac{31703-079}{044(01)-79}$ 79-79

2904000000

© Издательство «Пищевая промышленность», 1979 г.

ВВЕДЕНИЕ

Пищевые продукты, в том числе мясные и молочные [5], очень сложны по химическому составу и обладают различными свойствами, которые в совокупности составляют качество продукции. Существующие в настоящее время методы оценки качества продуктов часто субъективны и далеки от совершенства. Важнейшие физические свойства продуктов не всегда верно учитывают при проектировании машин и аппаратов.

Наиболее полно можно судить о качестве продукта по тем физическим свойствам, которые зависят от химического состава и определяются внутренним строением продукта. При этом характеристики сырья определяют основные показатели готовых продуктов.

Задачами классической реологии как науки о течении и деформации реальных тел (техническая механика реальных тел или дисперсных систем) являются изучение свойств существующих продуктов и разработка методов расчета процессов течения их в рабочих органах машин. В функции физико-химической механики как науки о способах и закономерностях формирования структур дисперсных систем с заранее заданными свойствами входят установление существа образования и разрушения структур в дисперсных и нативных системах в зависимости от совокупности физико-химических, биохимических, механических и других факторов, а также исследование, обоснование и оптимизация путей получения структур с заранее заданными технологическими свойствами.

Важнейшая проблема физико-химической механики заключается в уточнении закономерностей и механизма действия малых добавок поверхностно-активных веществ в процессах структурообразования, при возникновении контактных взаимодействий, деформировании и разрушении материалов. В этих процессах определяющее значение имеют механические свойства [73, 148].

К основным задачам инженерной физико-химической механики можно отнести следующие:

выявление величин основных реологических характеристик, необходимых для расчета и совершенствования технологических процессов и оценки качества изделий

разработку методов измерения характеристик как в стационарных (лабораторных) условиях, так и в потоке, а также методик расчета реологических характеристик

разработку датчиков и приборов для измерения величин свойств на основе научно обоснованных математических моделей реальных продуктов и оперативного регулирования значений свойств (с обратной связью к обрабатывающей машине);

разработку научно обоснованных методов расчета оборудования для определения оптимальных геометрических, энергетических, кинематических и динамических параметров работы машин, а также принципиально новых машин и аппаратов и их рабочих органов;

определение «эталонных» показателей реологических свойств сырья и готовых продуктов, основанных на существующих в настоящее время методах оценки качества изделий;

управление структурой и качеством пищевых продуктов путем внесения добавок, изменения режимов и способов механической и технологической обработки и пр.

комплексное исследование величин различных физических свойств (в значительном интервале изменения определяющих технологических факторов) для установления аналогии между изменениями свойств, их моделирования, прогнозирования и расчета как значений свойств, так и производственного оборудования и приборов контроля.

При решении названных проблем существенное значение имеют реологические методы как научный фундамент для практических и теоретических разработок. Это соображение о важности реологических (структурно-механических) свойств, отмеченное более десяти лет назад [34, 124, 152, 160], в последние годы нашло полное признание как в СССР [73, 92, 93, 116, 133, 174, 200], так и за границей [110, 193, 216, 219, 220].

В реологии и инженерной физико-химической механике широко используют следующие основные методы исследования: дифференциальный, интегральный, аналогий и моделей, анализа размерностей, экспериментальный. При этом обычно основываются на гипотезах, рассмат

ривающих материал с макроскопической точки зрения в качестве сплошной деформируемой среды, мерами подвижности частиц которой являются амплитуда и скорость смещения с непрерывным распределением основных физических свойств и деформаций. Такой подход позволяет не рассматривать сложные молекулярные движения в телах и использовать для описания процессов аппарат математического анализа, применяемого к непрерывным функциям [157]. Каждый из перечисленных методов, за исключением экспериментального, можно осуществлять теоретико-феноменологическими и экспериментальными способами. В пределах одного исследования возможны комбинации методов.

Дифференциальным методом пользуются при изучении бесконечно малых величин: в феноменологических исследованиях при составлении дифференциальных уравнений; в экспериментальных работах часто изучают изменение параметров отдельных элементов тела в каком-либо процессе. Таким образом, дифференциальный метод позволяет определить в теоретических и экспериментальных исследованиях состояние величин, переменных во времени и пространстве (для любого момента времени и в любой точке пространства). Интегральный метод служит для изучения конечных величин. Он дает возможность определить суммарный эффект изменения параметров в системе под действием тех или иных факторов. Обычно теоретические расчетные формулы получают в результате интегрирования дифференциальных уравнений, эмпирические — в результате суммарного учета дифференциальных изменений в системе. Те и другие уравнения позволяют описать процесс от начального до конечного состояния изменения параметров.

Методом аналогий пользуются довольно широко во многих качественных и количественных исследованиях. В общем случае он позволяет составить уравнения для реальных объектов по аналогии с уравнениями для идеальных. Основываясь на общности дифференциальных уравнений, можно изучать сложные явления с помощью более простых.

В реологии широко распространен метод механических моделей. Например, для получения наглядной картины поведения материала под действием напряжений каждое его свойство (упругость, пластичность

и др.) заменяют механическим элементом (пружиной, парой трения скольжения и т. д.). В реологии также широко используют геометрическое, математическое, физическое и другое моделирование. Недостаток метода аналогий заключается в том, что им трудно пользоваться при исследовании сложных внутренних взаимодействий. Физическое моделирование эффективно для получения качественных и количественных соответствий натурным объектам.

Метод анализа размерностей применяют для составления критериальных уравнений при обработке экспериментальных данных. При разработке методики эксперимента, определив зависимые и независимые переменные и функциональную зависимость между критериями, можно установить необходимые пределы изменения последних.

Экспериментальный метод обязателен при полных исследованиях для получения всех расчетных зависимостей и формул. Только в результате эксперимента можно определить границы приложения дифференциального или интегрального уравнения, найти для теоретических или эмпирических уравнений коэффициенты, характеризующие специфичность исследуемого объекта, проверить теоретические положения на практике и увязать теорию с практикой. Общепризнанной теорией экспериментальных исследований является теория подобия, которая трактует условия подобия физических явлений и методы определения этих условий, а в ряде случаев позволяет разработать методику эксперимента и определить подход к нему. Подобные явления должны иметь одинаковые и численно равные критерии, в том числе и полученные из граничных и начальных условий. Частичное подобие может быть в том случае, когда одинаковы критерии, учитывающие наиболее существенные черты объекта в данном процессе.

Любые измерения, как бы тщательно их не проводили, не могут дать двух абсолютно тождественных результатов. Всегда возможно наложение каких-либо побочных явлений, искажающих результат. Отклонение измеренного значения величины в эксперименте от ее точного значения составляет ошибку. Кроме того, дальнейшую аналитическую и графическую обработку опытов проводят с определенной степенью точности, напри-

мер логарифмической линейкой или на ЭВМ. Подсчет ошибки эксперимента позволяет установить заранее допустимую погрешность вычислений. Основной задачей теории ошибок является разработка способов получения и обработки результатов, при которых ошибки будут минимальны, а определяемая величина наиболее достоверной. Для предварительного решения этой задачи оценивают ошибки и погрешности как в экспериментальных измерениях, так и дальнейших арифметических действиях с опытными числами.

В основу классификации материала книги по главам положен вид действующих на продукт механических напряжений (усилий) и деформаций. Условно весь материал разделен на две части: реологические свойства и динамика движения продуктов в рабочих органах машин. Разделы построены по единому плану: физическая сущность и теоретические основы; способы и устройства для измерения характерных величин; фактические данные по основным характеристикам; использование их для практических целей.

По возможности в книге показаны комплексные исследования различных физических свойств и установлена аналогия их изменения при воздействии одинаковых факторов.

Собственные исследования автора, приведенные в книге, выполнены в лаборатории гидравлики кафедры промышленного строительства и охраны труда и в Проблемной научно-исследовательской лаборатории электрофизических методов обработки пищевых продуктов МТИММПа.

Сотрудникам кафедры и лаборатории проф., д-ру техн. наук И. А. Рогову, кандидатам технических наук О. П. Боровиковой, Я. И. Виноградову, В. Д. Косому, Н. А. Мусабаеву, Е. Т. Спирину, С. И. Сухановой, В. М. Щукину, а также товарищам, любезно предоставившим результаты своих опубликованных научных исследований, специально переработанных ими в плане книги; рецензентам: зав. кафедрой технологии молока и молочных продуктов ЛТИХПа проф., д-ру техн. наук А. М. Маслову и зав. лабораторией физических методов исследования ВНИИМПа ст. науч. сотр., канд. техн. наук Г. Е. Лимонову — автор выражает свою искреннюю благодарность.

**ОСНОВЫ РЕОЛОГИИ МЯСНЫХ
И МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ**

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Классификация реальных тел. В табл. 1 приведена классификация реальных тел по сдвиговым характеристикам. Методы и положения физической и коллоидной химии, биохимии и ряда других наук, применяемые для классификации реальных тел, не отражены в данной таблице.

Три основных «первичных» тела — упругое (модель — пружина), пластичное (модель — пара трения скольжения) и вязкое (модель — поршень с отверстиями и цилиндр) — в различных сочетаниях и комбинациях могут обеспечить характеристики множества реальных пищевых продуктов. При этом обычно деформации и скорости их связаны линейно. Группа нелинейных реологических тел описывается, по преимуществу эмпирическими зависимостями, в которых деформации и скорости деформаций связаны степенными или более сложными закономерностями.

Большинство уравнений теории упругости, пластич-

Идеальное твердое тело, Эвклида	Упругое тело, Гука	Пластичное тело, Сен-Венана
1	2	3
При любых нормальных и касательных напряжениях деформация равна нулю	Напряжение пропорционально деформации	При достижении предельного напряжения сдвига начинаются пластические деформации
Теоретическая механика	Теория упругости пластичности Сопротивление материалов	

ности, гидравлики может быть получено в виде частных случаев из реологических.

Классификация дисперсных систем. Классическими объектами управляющей реологии и инженерной физико-химической механики являются дисперсные системы, состоящие из двух и более фаз. В них дисперсионной средой является непрерывная фаза, дисперсионной фазой — раздробленная фаза, состоящая из частиц, не контактирующих друг с другом. При этом под фазой понимается совокупность гомогенных частей системы, отграниченных от других физическими поверхностями раздела. Классификация дисперсных систем дана в табл. 2.

Дисперсные системы (с жидкой дисперсионной средой) могут находиться в свободном состоянии — золь, когда отдельные элементы не связаны или слабо связаны друг с другом (молоко), и в связанном состоянии — гель (простокваша, кефир), когда частицы связаны друг с другом молекулярными силами и образуют структуру, т. е. пространственный каркас.

Классификация структур дисперсных систем. Структуру, т. е. внутреннее строение продукта и характер взаимодействия между отдельными ее элементами (частицами), определяют химический состав, биохимические показатели, температура, дисперсность и ряд технологических факторов.

По классификации акад. П. А. Ребиндера [73] структуры пищевых продуктов можно разделить на коагуляционные и конденсационно-кристаллизационные.

Таблица 1

Реологические тела	Истинно вязкая жидкость, ньютоновская	Идеальная жидкость, паскалевская
4	5	6
Линейные — составные из тел по графам 2, 3, 5, нелинейные — эмпирические	Напряжение пропорционально градиенту скорости в первой степени	Вязкость и сжимаемость равны нулю
Реология	Гидравлика	

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Система	Примеры систем
Газ	Твердая	Пыль, дым	Сухой порошок (молоко, мука) в воздухе Дисперсия крови, молока в распылительной сушилке —
	Жидкая	Туман	
	Газообразная	—	
Жидкость	Твердая	Суспензия	Бульон, расплавленный жир с белковыми частицами, колбасный фарш, сырковая масса Жир в воде, молоко при высоких температурах Крем, взбитые сливки
	Жидкая	Эмульсия	
	Газообразная	Пена	
Твердое тело	Твердая	Твердая суспензия, сплав	Замороженная мышечная ткань Сливочное масло, нативная мышечная ткань Сыр, взбитый и коагулированный меланж
	Жидкая	Твердая эмульсия	
	Газообразная	Пористое тело	

Примечания: 1. В книге рассмотрены системы с жидкой и твердой дисперсионными средами.

2. В качестве примеров приведены только некоторые продукты, причем продукт к той или иной системе отнесен по главным признакам. Например, колбасный фарш после куттерования представляет собой суспензию, насыщенную воздушными пузырьками, т. е. трехфазную систему. Один и тот же продукт (животный жир, сливочное масло) в зависимости от температуры можно отнести к разным системам. Механическое воздействие (резание, сбивание, перемешивание) способно вызывать переход из одного вида дисперсий в другой.

Коагуляционные структуры образуются в дисперсных системах путем взаимодействия между частицами и молекулами через прослойки дисперсионной среды за счет ван-дер-ваальсовых сил сцепления. Толщина прослойки соответствует минимуму свободной энергии системы [73]. Термодинамически стабильны системы, у которых с поверхностью частиц прочно связаны фрагменты молекул, способные без утраты этой связи растворяться в дисперсной среде. В свою очередь дисперсионная среда находится в связанном состоянии. Обычно эти структуры способны к самопроизвольному восстановлению после разрушения (тиксотропия). Толщину прослоек характеризует в известной степени содержание дисперси-

онной среды. При увеличении содержания воды значения сдвиговых свойств уменьшаются, а система из твердообразной переходит в жидкообразную. В связи с этим оптимальные технологические характеристики продукта определяются степенью его дисперсности, при которой наблюдается наибольшая водосвязывающая способность. При обезвоживании коагуляционных структур прочность их повышается, но после определенного предела они перестают быть обратимо тиксотропными. Восстанавливаемость структуры сохраняется в пластично-вязкой среде, когда пространственный каркас разрушается без нарушения сплошности. При дальнейшем снижении содержания жидкой фазы, т. е. переходе к пластическим пастам, восстановление прочности после разрушения структуры возможно при действии напряжения, вызывающего пластические деформации, обеспечивающие истинный контакт по всей поверхности разрыва. Наконец, при наибольшей степени уплотнения структуры и наименьшей толщине прослоек жидкой среды восстанавливаемость и пластичность исчезают, кривая прочности в зависимости от влажности дает излом. Такая предельная влажность была определена для некоторых видов колбасного фарша [42]. При этом контакты частиц оставались точечными; они могли переходить в фазовые при значительном повышении температуры путем спекания или срастания.

Для описания долговечности структуры (τ , с), например желатина, альбумина, под нагрузкой П. А. Ребиндер с сотрудниками [73, 165] использовал экспоненциальную зависимость С. Н. Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{u_0 - \gamma\sigma}{kT} = \tau_0 \exp \frac{E - \gamma'\sigma}{RT}, \quad (1-1)$$

- где τ_0 — предэкспоненциальный множитель, с;
 u_0 — начальная энергия активации процесса разрушения в расчете на одну молекулу, Дж;
 γ и γ' — структурная постоянная (объем активации), соответственно м³ и м³/моль;
 σ — нормальное или сдвиговое напряжение разрушения, Па;
 k — постоянная Больцмана ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);
 T — абсолютная температура, К;
 E — начальная энергия активации в расчете на все молекулы, содержащиеся в одном моле, Дж/моль;
 R — универсальная газовая постоянная [$R=8,31$ Дж/(моль \times К)].

В соответствии с формулой (I—1) процесс разрушения рассматривается как термомеханический, т. е. энергетический барьер (энергия активации), ослабленный действием механического напряжения, преодолевается в результате теплового воздействия. Числитель экспоненты может быть больше или меньше нуля, что характеризует преобладание того или иного вида разрушения. Для коагуляционно-конденсационной структуры геля казеина энергия активации составляет около 120×10^3 Дж/моль, структурная постоянная — около $0,42 \text{ м}^3/\text{моль}$.

При образовании коагуляционных структур в мясных и молочных продуктах существенную роль играют поверхностно-активные вещества и растворенные в воде белки, которые выступают в качестве эмульгаторов и стабилизаторов образуемых систем [73].

Конденсационно-кристаллизационные структуры присутствуют в натуральных продуктах, однако они могут образовываться из коагуляционных при удалении дисперсионной среды или срастании частиц дисперсной фазы в расплавах или растворах. В процессе образования этих структур могут иметь ряд переходных состояний: коагуляционно-кристаллизационные, коагуляционно-конденсационные при непрерывном нарастании прочности. Основные отличительные признаки структур такого типа следующие: большая прочность по сравнению с прочностью коагуляционных структур, что обусловлено высокой прочностью контактов между частицами; отсутствием анизотропии и необратимый характер разрушения; большая хрупкость и упругость из-за жесткости скелета структуры; наличие внутренних напряжений, возникающих в процессе образования фазовых контактов и вызывающих в дальнейшем перекристаллизацию и самопроизвольное понижение прочности вплоть до нарушения сплошности, например растрескивание при сушке [29].

Таким образом, вид структуры продукта обуславливает его качественные и технологические показатели и поведение в процессах деформации. Для их описания используют кривые течения (реограммы), которые связывают между собой напряжение и скорость деформации (деформацию). Характер реограмм, как правило

позволяет отнести данный реальный продукт к тому или иному виду реологических тел.

Формы связи влаги с продуктом. Большинство мясных и молочных продуктов в тех или иных количествах содержат воду.

Вид или форма связи влаги с продуктом определяют технологические показатели продукта и его реологические свойства.

По классификации акад. П. А. Ребиндера [29, 101], выделяют три основные формы связи:

химическую, которая обусловлена ионными или молекулярными взаимодействиями в точных количественных соотношениях. Влагу удаляют из продукта путем прокаливания или химических реакций;

физико-химическую влагу, обусловленную адсорбцией влаги в гидратных оболочках или осмотическим удерживанием в клетках в нестрого определенных соотношениях, удаляют из материала испарением, десорбцией (адсорбционная) или за счет разности концентраций (осмотическая). Адсорбционная влага может иметь иные, чем вода, свойства и способствовать диспергированию частиц и пластификации системы. Она присуща структурам коагуляционного типа. Осмотическая влага вызывает набухание тела и свойственна нативным и дисперсным клеточным структурам;

физико-механическую, обусловленную удерживанием влаги в ячейках структуры (иммобилизационная), в микро- и макрокапиллярах и прилипанием ее к поверхности тела (смачивание) в неопределенных соотношениях. Влагу удаляют из материала испарением или механическими способами (отжатием, центрифугированием и т. д.). Основная масса воды находится в свободном состоянии и не меняет своих свойств.

При увеличении содержания влаги ее избыток перестает быть связанным с продуктом и самопроизвольно отделяется от него (отстаивание, расслаивание и пр.).

По преобладанию формы связи влаги продукты можно разделить на коллоидные (физико-химически связанная влага — золи и гели, целые ткани мяса и пр.), капиллярнопористые (физико-механически связанная влага) и коллоидные капиллярнопористые, имеющие качества, присущие первым и вторым, например мясной фарш, творожно-сырковая масса и пр.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Реологические или в более широком смысле структурно-механические свойства характеризуют поведение продукта в условиях напряженного состояния и позволяют связать между собой напряжения, деформации и скорости деформаций в процессе приложения усилий. Иными словами, при известных величинах свойств можно вычислить напряжения или деформации и получить необходимые параметры процесса или аппарата, т. е. выполнить прочностные и технологические расчеты. Поэтому в реологии особое значение имеет вид уравнения, связывающего между собой посредством постоянных величин (свойств) напряжения и деформации или скорости деформаций. Выбор такого уравнения из множества других обусловлен соответствием дифференциальной зависимости течения продукта реальным условиям.

Любой процесс как непрерывную смену явлений во времени можно рассматривать не только комплексно, но и по наиболее характерным признакам. При этом описания явлений, которые выражают внешнюю форму внутренней природы продукта, должны объективно отражать эти характерные внутренние связи применительно к конкретным условиям. Так, реологические характеристики неодинаковы в различных процессах деформирования: движение в одних рабочих органах машин сопровождается большими значениями градиента скорости и напряжения (насосы, трубопроводы), в других — небольшими (дозаторы котлетного автомата и подобных устройств). Поэтому для расчета этих процессов необходимо использовать свойства, определенные в соответствующем интервале напряжений и деформаций.

Качество продукта также необходимо оценивать по наиболее существенным для данного процесса свойствам.

По виду приложения усилия или напряжения к продукту реологические свойства можно разделить на сдвиговые, которые определяют поведение объема продукта при воздействии на него сдвиговых касательных напряжений (изучение их занимает основное место в реологии — внутренней механике потоков жидкостей или дисперсий); компрессионные, характеризу-

ющие поведение объема продукта при воздействии на него нормальных напряжений в замкнутой форме между двумя пластинами или при каком-либо другом одноосном растяжении — сжатии образца продукта; поверхностные, которые характеризуют поведение поверхности продукта на границе раздела с другим, твердым материалом при воздействии нормальных (адгезия) и касательных (внешнее трение) напряжений.

В последнее время в связи с попытками объективно оценить качество изделий, в частности нежность, определяют самые разнообразные механические характеристики: сопротивление резанию струной или лезвием, продавливаемость через отверстие и пр.

Рассмотрим некоторые основные первичные физико-механические и математические понятия, широко используемые в реологии [30, 92, 151, 159, 198].

Деформация — это изменение линейных размеров тела, при котором частицы или молекулы смещаются относительно друг друга без нарушения сплошности тела. Относительная деформация ϵ представляет отношение абсолютной деформации Δl (в м) к первоначальным размерам тела l (в м). т. е.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (I-2)$$

Деформации могут быть сдвиговыми, одноосными (линейными) и объемными.

Деформации могут изменяться во времени τ (с) при неустановившемся процессе; при установившемся — изменение деформации в единицу времени постоянно. Все это описывается понятием скорости деформации $\dot{\epsilon}$ (1/с):

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{d\tau}. \quad (I-3)$$

Если деформация под действием конечных сил увеличивается непрерывно и неограниченно, то материал начинает течь. Установившийся режим течения характеризуется градиентом скорости, который по смыслу аналогичен скорости деформации:

$$\dot{\epsilon} = \frac{du}{dx}, \quad (I-3a)$$

где u — линейная скорость элементарного слоя, м/с;

x — расстояние по нормали между двумя элементарными слоями, м.

Напряжение θ (в Па) — это сила P (в Н), действующая на единицу площади F (в м²):

$$\theta = \frac{P}{F}. \quad (I-4)$$

Напряжение в точке

$$\theta = \lim_{F \rightarrow 0} \frac{P}{F}. \quad (1-4)$$

Формально сдвиговые или касательные напряжения (θ), нормальные напряжения (σ), давление или гидростатическое давление (p) и адгезия или давление прилипания (p_0) описываются зависимостью (1-4), где сила и площадь будут иметь соответствующий физический смысл.

Гидростатическое давление в точке в истинно вязких жидкостях или в жидкообразных системах не зависит от ориентации площадки; а в пластично-вязких системах, имеющих структурный каркас, — зависит. Если на тело, заключенное в определенном объеме, действует гидростатическое давление p (в Па), то в нормальном направлении будет действовать меньшее давление p_r (в Па). Их отношение характеризуется коэффициентом бокового давления ζ

$$\zeta = \frac{p_r}{p}, \quad (1-5)$$

который для истинно вязкой жидкости равен единице, для абсолютно жесткого тела — нулю.

В случае, когда неидеальное тело, у которого $0 < \zeta < 1$, заключено в жесткую форму и подвергается действию одноосного растягивающего или сжимающего напряжения, происходит изменение его формы. При условии постоянства объема, например при одноосном сжатии, уменьшается высота тела и увеличиваются его поперечные размеры, что характеризуется соответственно относительными деформациями. Они связаны между собой посредством коэффициента Пуассона ν , характеризующего упругие свойства материала,

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon}, \quad (1-6)$$

где ε_r — относительная поперечная деформация;

ε — относительная продольная деформация прямого стержня при его продольном растяжении или сжатии в области действия закона Гука.

При одноосном сжатии пластично-вязких тел, не заключенных в жесткую форму, наряду с упругими возможны необратимые пластические деформации, связанные с уменьшением объема. Тогда объемная деформация ε_V будет представлять собой отношение изменения объема тела $\Delta V = V - V_k$ к его первоначальному объему V :

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V}. \quad (1-7)$$

Объемная деформация с точностью до бесконечно малых высшего порядка является суммой относительных деформаций по трем перпендикулярным осям: $\varepsilon_V = \varepsilon - 2\varepsilon_r$. Это легко представить себе, если принять, например для цилиндра, начальный объем $V =$

$=\pi R^2 l$, конечный объем $V_k = \pi(R + \Delta R)^2(l - \Delta l)$. Тогда деформации по осям координат будут

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad \varepsilon_r = \frac{\Delta R}{R}.$$

Общая деформация

$$\varepsilon_v = \varepsilon - 2\varepsilon_r = \varepsilon(1 - 2\nu). \quad (I-8)$$

Начальное и конечное состояние системы при объемном сжатии в жесткой форме можно связать первым законом термодинамики:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta A, \quad (I-9)$$

где ΔU — изменения внутренней энергии системы, Дж;

ΔQ — количество тепла, подведенное или отведенное от системы, Дж;

ΔA — механическая работа, совершаемая внешними или внутренними силами, Дж.

При постоянной температуре, когда $\Delta Q = 0$,

$$\Delta A = p\Delta V + V\Delta p, \quad (I-9a)$$

где p — давление, Па;

V — объем продукта, м³.

При постоянных давлении ($\Delta p = 0$) и температуре ($\Delta Q = 0$) получается зависимость для расчета удельной (на единицу объема) работы $A_{уд}$ (в Дж/м³):

$$A_{уд} = \frac{\Delta A}{V} = p \frac{\Delta V}{V} = p \frac{V - V(p, \tau)}{V} = p\varepsilon(p, \tau), \quad (I-10)$$

где V — начальный объем системы, м³;

$V(p, \tau)$ — объем при воздействии давления p (в Па) в любой момент времени τ (в с), м³;

$\varepsilon(p, \tau)$ — относительная объемная деформация в любой момент времени [см. формулу (I-7)].

Для ряда пластично-вязких тел, в частности мясного фарша, применимо кинетическое уравнение деформации

$$\varepsilon(p, \tau) = a_0 p^{a_1} (1 + a_2 \lg \tau), \quad (I-11)$$

где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты, зависящие от механического, физико-химического состояния продукта, его состава и особенностей исходного сырья.

Кинетическое уравнение является основным для расчетов, связанных с определением энергии деформации и величины самой деформации. Поэтому первоочередной задачей является отыскание коэффициентов к этому уравнению.

Различные величины осевых и боковых давлений обуславливают неравномерность распределения давлений по высоте труб [52]. Это явление необходимо учитывать при набивке пластично-вязкого продукта в форму, например фарша для получения колбасных изделий без оболочки.

При сжатии продукта поршнем с одного торца в узкой трубке диаметром D приложенное к поверхности давление p по высоте будет уменьшаться. Если трубка вертикальная и поршень расположен сверху, то положительное направление для h будет вертикально вниз. Рассмотрим равновесие бесконечно тонкого слоя фарша dh , пренебрегая силой тяжести ввиду ее незначительности при малой высоте трубки. На слой действуют силы давления сверху и снизу, разность которых дает $-\frac{\pi D^2}{4} \Delta p_h$ (знак минус,

так как давление убывает в принятом за положительное направлении). Сжатие ведет к появлению запаса потенциальной энергии, возникновению силы трения между фаршем и трубкой (за счет бокового давления и объемной деформации) и пр. Примем, что две основные силы сопротивления (трения и объемная пластично-упругая) пропорциональны $a_1 p_h D^n dh$; направлены они вверх, т. е. величина их имеет знак минус. С учетом сказанного равновесие слоя опишется дифференциальным уравнением

$$-\frac{\pi D^2}{4} dp_h - a_1 p_h D^n dh = 0.$$

После разделения переменных и интегрирования в пределах от p до p_h получим

$$\ln p_h = \ln p - \frac{4a_1}{\pi} D^{n-2} h$$

или

$$\lg p_h = \lg p - a_2 D^{n-2} h = \lg p - ah,$$

где a_2 , n — коэффициенты, определяемые экспериментально (для бесшпиковых фаршей вареных колбас и сосисок: $a = a_2 D^{n-2} = 0,05 D^{-0,33}$; $a_2 = 0,05$; $n = 1,67$). Пределы применимости уравнений: по диаметру от 0,02 до 0,05 м, по высоте от 0 до 0,3 м.

В окончательном виде для расчета осевого и бокового давлений по высоте трубки уравнения будут иметь вид:

$$p_h = p \cdot 10^{-ah}; \quad p_{rh} = \zeta p \cdot 10^{-ah}. \quad (I-12)$$

Эти уравнения показывают, что чем больше диаметр цилиндра, тем незначительнее уменьшение давления по высоте.

Упругость — способность тела после деформирования полностью восстанавливать свою первоначальную форму, т. е. работа деформирования равна работе восстановления. Упругость тел характеризуется модулем упругости первого E (в Па) или второго G (в Па) рода соответственно при сжатии — растяжении и сдвиге. Деформации определяются законом Гука:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \varepsilon E, \\ \theta &= \varepsilon G. \end{aligned} \right\} \quad (I-13)$$

Физическая модель гукова тела представляет собой пружину (рис. 1, а). При объемном сжатии напряжения и деформации связаны посредством объемного модуля упругости K (в Па):

$$\sigma = K \varepsilon_V, \quad (I-14)$$

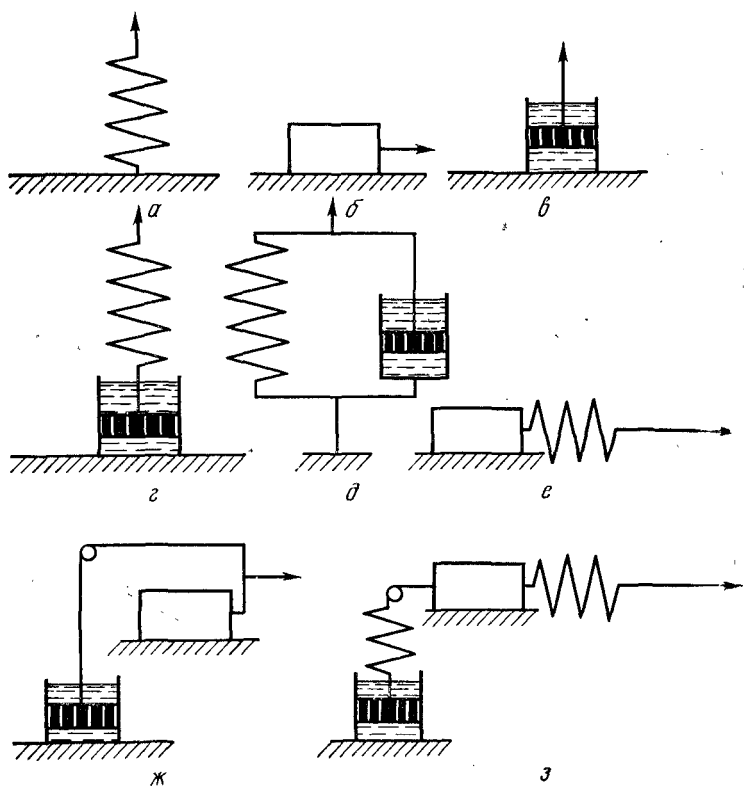


Рис. 1. Механические модели простейших реологических тел:

a — упругого (пружина); *б* — пластичного (пара трения скольжения); *в* — вязкого (цилиндр и поршень с отверстиями); *г* — упруго вязкого с релаксацией деформаций; *д* — упруго вязкого с релаксацией напряжений; *е* — упруго пластичного; *ж* — пластично-вязкого; *з* — упругоупруго-вязкого с релаксацией деформаций.

ν вычисляют по зависимости (1—7), модуль объемной упругости — по выражению

$$K = \frac{E}{a(1-2\nu)}. \quad (1-14a)$$

При одноосном деформировании тела в замкнутом объеме $a=1$, при трехосном с приложением одинаковых напряжений $a=3$. Если в уравнение (1—14) подставить значения, взятые из уравнений (1—8) и (1—14a), то оно превращается в уравнение

(I—13). Объемный модуль упругости можно вычислить также по формуле

$$K = \frac{EG}{E + G}.$$

Для описания упругих свойств продуктов в различных зонах деформирования часто недостаточно классических понятий о модулях упругости. Тогда можно применить модификации модулей упругости: условно-мгновенный, эластический и пр.

Коэффициентом объемного сжатия β (1/Па) можно пользоваться как интегральной характеристикой сжатия продукта в форме

$$\beta(p, \tau) = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{\varepsilon(p, \tau)}{\Delta p}, \quad (I—146)$$

где Δp — изменение давления, Па.

Коэффициент объемного сжатия характеризует относительное изменение объема продукта при изменении давления на единицу его измерения. Для ньютоновских жидкостей он практически не зависит от величины давления и времени его действия; для пластично-вязких систем с увеличением давления коэффициент уменьшается и при достаточно высоких давлениях, например при давлениях $(20—30)10^5$ Па, достигает величины, присущей дисперсионной среде, в частности воде, так как во многих продуктах мясной и молочной промышленности (колбасный фарш, творожная масса и др.) ее содержится до 70—75%.

Адгезию p_0 (в Па) определяют по уравнению (I—4) как удельную силу нормального отрыва пластины от продукта:

$$p_0 = \frac{P_0}{F_0},$$

где P_0 — сила отрыва, Н;

F_0 — геометрическая площадь пластины, м².

Отрыв может быть трех видов: адгезионный — по границе контакта, когезионный — по слою продукта и адгезионно-когезионный, т. е. смешанный. При любом виде отрыва удельную силу часто называют липкостью или давлением прилипания [124, 154].

Внешнее трение продукта определяется его липкостью. Многие экспериментальные работы, проведенные в этой области, подтвердили применимость двучленного уравнения Б. В. Дерягина [154] для вычисления силы трения:

$$P_{\text{тр}} = \mu (P_{\text{к}} + p_0 F_0), \quad (I—15)$$

где μ — истинный коэффициент внешнего трения;

$P_{\text{к}}$ — сила, нормальная поверхности сдвига (усилие контакта).

Разделив величины в уравнении (I—15) на площадь, получим

$$p_{\text{тр}} = \mu p_{\text{к}} + \mu p_0,$$

или

$$p_{\text{тр}} = \mu p_{\text{к}} + \theta'_0. \quad (I—15a)$$

В ряде случаев удобнее оперировать с эффективным коэффициентом внешнего трения:

$$\mu_{\text{эф}} = \rho_{\text{тр}}/\rho_{\text{к}}. \quad (1-15\text{а})$$

Этот коэффициент связан с истинным коэффициентом трения следующим образом:

$$\mu_{\text{эф}} = \mu \left(1 + \frac{\rho_0}{\rho_{\text{к}}} \right). \quad (1-15\text{в})$$

Уравнение (1-15а) можно применить для вычисления как чисто внешнего трения, так и трения в поверхностной пленке материала. Тогда θ'_0 можно отождествить с предельным напряжением сдвига в пленке. Произведение $\mu\rho_{\text{к}}$ представляет собой касательное напряжение, вызванное внешним давлением $\rho_{\text{к}}$; коэффициент трения μ характеризует скольжение в сдвигаемой пленке. Приведение двучленного уравнения трения к уравнению сдвиговой прочности позволяет провести аналогию с уравнением течения Бингама.

Пластическое течение — течение при величине напряжения, равной пределу текучести. В реологии в этом смысле при сдвиговых деформациях существует понятие «предельное напряжение сдвига» — ПНС, обозначаемое θ_0 . Модель этого Сен-Венана тела показана на рис. 1, б.

Вязкое течение реализуется в истинно вязких, ньютоновских жидкостях при любых, сколь угодно малых напряжениях сдвига (θ). Это течение описывается уравнением Ньютона, модель Ньютонова тела показана на рис. 1, в:

$$\theta = \eta \dot{\epsilon} \quad \text{или} \quad P = \eta F \frac{du}{dx}, \quad (1-16)$$

где η — коэффициент динамической или абсолютной вязкости, который характеризует величину усилий, возникающих между двумя элементарными слоями жидкости при их относительном смещении, Па·с;

P — сила сопротивления между двумя элементарными слоями, Н;

F — площадь поверхности сопротивления этих слоев, м²;

$\frac{du}{dx}$ — градиент скорости, т.е. интенсивность изменения скорости по нормали к ее вектору, с⁻¹.

Полная вязкость жидкости складывается из ламинарной (ньютоновской), турбулентной и объемной вязкостей.

Мясные и молочные продукты представляют собой по преимуществу аномально-вязкие системы, деформационное поведение которых описывают более сложными уравнениями по сравнению с приведенными выше.

При течении неньютоновских (аномально-вязких) жидкостей вязкость зависит от напряжения сдвига и градиента скорости. Тогда пользуются понятием «эф-

фективная вязкость», которую вычисляют по формуле (I—16) для фиксированных значений напряжения и градиента скорости. Эффективная вязкость является итоговой характеристикой, которая описывает равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установившемся потоке.

Аномально-вязкое, пластическое и другие виды течений и деформаций в зависимости от принятой модели тела могут характеризоваться различными параметрами, например, вязкостью пластической, кэссоновской.

Комбинируя названные выше (см. рис. 1) три основные модели, можно вывести уравнения напряжений и деформаций для различных реальных тел. Количество комбинаций практически не ограничено. Однако полученные таким образом уравнения, часто имея линейный характер, недостаточно точно описывают течение и деформирование пищевых продуктов.

Рассмотрим уравнения напряжений и деформаций для моделей, представленных на рис. 1.

Процессы в релаксирующей жидкообразной среде (максвеллова вязкоупругая жидкость), когда вызванные внешним воздействием деформации полностью исчезают во времени (рис. 1, 2), описывают уравнением Максвелла. Под действием напряжения θ в теле возникает деформация ϵ , имеющая во времени определенную скорость $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{d\tau}$, которая складывается из упругой $\dot{\epsilon}_{упр}$

и вязкой $\dot{\epsilon}_{вяз}$ составляющих. Упругую составляющую находят дифференцированием закона Гука по времени:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = G \frac{d\epsilon}{d\tau},$$

откуда

$$\left(\frac{d\epsilon}{d\tau} \right)_{упр} = \frac{1}{G} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{G} \dot{\theta}. \quad (I-17)$$

Вязкую составляющую определяют из уравнения Ньютона:

$$\left(\frac{d\epsilon}{d\tau} \right)_{вяз} = \frac{\theta}{\eta}. \quad (I-17a)$$

Суммируя две составляющие, получают уравнение Максвелла

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{1}{G} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} + \frac{\theta}{\eta}, \quad \eta \dot{\varepsilon} = \frac{\eta}{G} \dot{\theta} + \theta, \quad (I-18)$$

которое можно проинтегрировать для частных случаев.

Если предположить, что деформация постоянна, т. е. $\frac{d\varepsilon}{d\tau} = 0$, то можно наблюдать процесс релаксации напряжений. Тогда

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{G}{\eta} d\tau,$$

причем при $\tau=0$ напряжение равно какому-то начальному значению $\theta=\theta_1$. При интегрировании в пределах от θ_1 до θ и от 0 до τ получают уравнение, называемое экспоненциальным законом релаксации напряжений:

$$\theta = \theta_1 e^{-\frac{G}{\eta} \tau}. \quad (I-19)$$

Если в уравнении (I-19) $\frac{\eta}{G}$ обозначить через τ_p , то оно примет вид

$$\theta = \theta_1 e^{-\frac{\tau}{\tau_p}},$$

где τ_p — период релаксации, с.

Период релаксации характеризует быстроту процесса, т. е. перехода системы из неравновесного термодинамического состояния, вызванного внешними воздействиями, в состояние термодинамического равновесия [141]. За это время напряжение убывает в 2,7 раза.

В многофазной реальной системе одновременно может протекать несколько процессов с различными периодами релаксации. После завершения процессов с наименьшим периодом наступает неполное статическое равновесие. Поведение тела можно описать кривой распределения периодов релаксаций. Для сравнительно точного отображения релаксационных процессов ограничиваются четырьмя значениями, каждое из которых является средним в том или ином интервале функции распределения [30, 61, 177].

Для упругопластичной среды (рис. 1, е) вместо вязкой составляющей вводят скорость деформации ползучести, которую представляют в виде степенной зависимости

$$\left(\frac{d\varepsilon}{d\tau}\right)_{\text{полз}} = B\theta^m,$$

где B и m — опытные величины для данного тела.

Затем складывают скорости деформаций упругой и ползучести:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{1}{G} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} + B\theta^m. \quad (I-20)$$

Если в уравнении $m=1$, то получается уравнение Максвелла. При этом $B=1/\eta$.

При сложении упругих и вязких напряжений для упруговязкого твердого тела Фойгта—Кельвина (рис. 1, б) получают следующее уравнение:

$$\theta = \varepsilon G + \eta \frac{d\varepsilon}{d\tau}, \text{ или } \theta = G \left(\varepsilon + \frac{\eta}{G} \dot{\varepsilon} \right). \quad (I-21)$$

При снятии напряжения ($\theta=0$) и интегрировании в пределах от ε_{max} до ε и от 0 до τ получают экспоненциальную функцию для релаксации деформации

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{max}} e^{-\frac{G}{\eta} \tau}$$

или

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{max}} e^{-\frac{\tau}{\tau_p}}, \quad (I-22)$$

Если среду, подчиняющуюся уравнению Фойгта—Кельвина, нагрузить постоянным напряжением θ_2 при $\tau > 0$, то в результате интегрирования можно получить

$$\varepsilon = \frac{\theta_2}{G} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_p}} \right), \quad (I-23)$$

т. е. деформация во времени постепенно увеличивается, стремясь к значению $\varepsilon_{\infty} = \frac{\theta_2}{G}$ при $\tau \rightarrow \infty$.

Комбинация уравнений для моделей Максвелла и Фойгта—Кельвина, выполненная в определенной мере произвольным приравнованием правых частей уравнений (I-18) и (I-21), приводит к математической зависимости для модели стандартного линейного тела [151]:

$$\theta + \tau_e \dot{\theta} = G_R (\varepsilon + \tau_{\sigma} \dot{\varepsilon}), \quad (I-24)$$

где G_R — релаксационный модуль упругости, определяемый соотношением между упругими и пластичными характеристиками продукта;

- τ_ϵ — период релаксации напряжения при постоянной деформации;
 τ_σ — период релаксации деформации при постоянном напряжении.

Модификация уравнения (I—24) для малых скоростей сдвига была получена Фрëлихом и Заком, а также Олдройдом [151]. В качестве модели они приняли упруго-вязкое тело, которое представили в виде упругих шариков, взвешенных в вязкой жидкости. При течении системы форма шариков изменяется и в них накапливается энергия упругих деформаций.

Модифицированное уравнение (I—24) имеет вид:

$$\theta + \tau_\epsilon \dot{\theta} = \eta_0 (\dot{\epsilon} + \tau_\sigma \ddot{\epsilon}), \quad (\text{I—25})$$

где η_0 — наибольшая вязкость практически неразрушенной структуры, Па·с;

$\ddot{\epsilon} = \frac{d^2 \epsilon}{dt^2}$ — вторая производная относительной деформации по времени, $1/c^2$.

При сложении напряжений, соответствующих пластическому и вязкому течениям (рис. 1, ж), получают уравнение для пластично-вязкой среды

$$\theta = \theta_0 + \eta \frac{d\epsilon}{dt}. \quad (\text{I—26})$$

В большинство приведенных уравнений входит величина периода релаксации, которая имеет большое значение при исследовании физико-механических свойств, особенно при малых напряжениях и продолжительности действия напряжения того же порядка, как и период релаксации. Когда продолжительность действия силы меньше периода релаксации, энергия, подводимая к системе, вызывает упругие деформации по всему объему. Когда продолжительность действия силы больше периода релаксации, процесс протекает с накоплением энергии и влечет за собой остаточные деформации.

Из уравнений релаксации видно, что при бесконечном времени после разгрузки тела напряжение полностью релаксирует. Однако Д. С. Великовский [88] считает, что процессы старения, которые являются следствием коагуляции и упрочнения структурной сетки в результате слипания близко расположенных частиц,

увеличивают прочность структурного каркаса во времени. Длительное измерение развития процесса релаксации невозможно, так как конечные условия не соответствуют начальным. Из уравнения релаксации Ф. Н. Шведова видно, что напряжения не релаксируют до нуля. В своем выводе Ф. Н. Шведов [97] рассматривает деформацию чистого сдвига куба жидкости при непрерывной скорости деформации, а также предполагает, что наряду с обратимой, упругой деформацией $d\epsilon_y$ в теле появляется и остаточная деформация $d\epsilon_{ост}$. При интегрировании уравнения для случая постоянной деформации получают

$$\theta = G\epsilon_{y \max} + (\epsilon - \epsilon_{y \max})Ge^{-\frac{\tau}{\tau_p}}, \quad (I-27)$$

где $\epsilon_{y \max}$ — максимальная упругая деформация;
 $\epsilon - \epsilon_{y \max}$ — остаточная деформация.

Для уравнения (I-27) при $\tau \rightarrow \infty$ остаточное напряжение $\theta_{ост} = G\epsilon$. Это остаточное напряжение часто соответствует предельному напряжению сдвига, или пределу текучести, т. е. $\theta_{ост} = \theta_0 = \epsilon_{y \max} G$. Модель тела, удовлетворяющего уравнению (I-27), приведена на рис. 1,з.

Из уравнения Ф. Н. Шведова М. П. Воларович получил уравнение (I-26), в котором не учтена в явном виде упругая составляющая, но при напряжениях, превышающих предел текучести, она не имеет существенного значения. При рассмотрении вопросов течения, т. е. при огромных деформациях и значительных напряжениях сдвига, упругой составляющей можно пренебречь и за основное уравнение принять уравнение (I-26) Шведова—Бингама. При этом пластическую вязкость в уравнении (I-26) называют шведовской, если она получена для малых, лежащих в области ползучести, скоростей деформаций, и бингамовской — для больших скоростей деформаций, вызванных напряжениями, превышающими предельное напряжение сдвига.

Для описания процессов деформации сложных тел пользуются и другими уравнениями. Так, И. Н. Влодавцев [149, 169] предлагает для определения скорости изменения деформации упругого последействия как при нагрузке, так и при разгрузке тела следующее кинетическое уравнение:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{k}{\sqrt{\tau}} (\varepsilon_m - \varepsilon), \quad (1-28)$$

где ε — величина упругого последействия в момент времени τ ;
 ε_m — величина упругого последействия, которая может быть достигнута при бесконечном времени наблюдения;
 k — константа скорости упругого последействия.

М. П. Воларович и Н. И. Малинин [154] для описания зависимости деформации упругого последействия от времени при постоянном напряжении сдвига, меньшем предельного напряжения, рекомендует зависимость

$$\varepsilon = \varepsilon_0 [1 + k \lg(c + \tau)], \quad (1-29)$$

где ε_0 — начальная деформация (она зависит от структуры продукта и напряжения);

k и c — постоянные;

τ — время, с.

Для случая, когда действующее напряжение больше предельного напряжения сдвига, уравнение (1-29) несколько изменяется:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 [1 + k \lg(c + \tau)] + \frac{\theta - \theta_{ст}}{\eta_0} \tau, \quad (1-30)$$

где $\theta_{ст}$ — статическое предельное напряжение сдвига, соответствующее первоначальному разрушению структуры.

При описании процессов всестороннего или одноосового сжатия исходят из аналогичных предпосылок, получая аналогичные уравнения путем комбинаций элементов механических моделей.

Как было отмечено выше, классические реологические модели не всегда позволяют достаточно точно описать кривую течения продуктов. В этом случае приходится пользоваться различными эмпирическими и полумпирическими уравнениями [159]. При этом они могут одержать несколько (3—5) констант, определяемых из опыта, что делает их ненадежными и сложными для практического использования. Значимость этих уравнений также оценивают по-разному. Например, А. Б. Метцнер [17] считает, что только уравнение Эйринга — Пауэлла и степенное уравнение Оствальда — де Вале [11] заслуживают внимания для описания кривых течения расплавов полимеров. Ниже приведено несколько уравнений, проверенных для описания кривых течения

ряда пищевых продуктов. Следует отметить, что иногда эти уравнения могут быть использованы и для расчета процессов сжатия продукта.

Течение жидкообразных систем, не обладающих предельным напряжением сдвига, описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{Оствальда } \theta = B_1^* \dot{\epsilon}^n = B_1^* \dot{\epsilon}^{n-1} \dot{\epsilon} = \eta_{\text{эф}} \dot{\epsilon}; \\
 &\eta_{\text{эф}} = B_1^* \dot{\epsilon}^{n-1} \text{ или } \eta_{\text{эф}} = B_0^* \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_1} \right)^{n-1}; \\
 &\text{Сиско } \theta = (A + B \dot{\epsilon}^{n-1}) \dot{\epsilon}, \quad n > 0; \\
 &\text{Де Хавена } \theta = \frac{\eta_0}{1 + c\theta^n} \dot{\epsilon}, \quad n > 0; \\
 &\text{Пауэлла—Эйрица } \theta = \left[\eta + \frac{1}{B \dot{\epsilon}} \operatorname{arsh} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{A} \right) \right] \dot{\epsilon}; \\
 &\text{Бартенева—Ермиловой } \theta = [\eta_m + AB (2\tau_p \dot{\epsilon}) / 2\tau_p \dot{\epsilon}] \dot{\epsilon}.
 \end{aligned} \right\} \text{(I—31)}$$

Течение твердообразных систем, имеющих предельное напряжение сдвига, описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{Шведова—Бингама } \theta - \theta_0 = \eta \dot{\epsilon}; \\
 &\text{Гершеля—Балкли } \theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\epsilon}^n; \\
 &\theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\epsilon}^{n-1} \dot{\epsilon} = \eta_{\text{эф}} \dot{\epsilon}; \\
 &\text{Кэссона } (\sqrt{\theta} - \sqrt{\theta_0})^2 = \eta \dot{\epsilon}; \\
 &\text{Шульмана } \left(\frac{1}{\theta^n} - \frac{1}{\theta_0^n} \right)^m = \eta \dot{\epsilon}; \\
 &\text{Михайлова—Лихтгейм } \theta = \left[\eta_m + (\eta_0 - \eta_m) \frac{\theta/\theta_0}{\operatorname{sh}(\theta/\theta_0)} \right] \dot{\epsilon}.
 \end{aligned} \right\} \text{(I—32)}$$

В выражениях (I—31) и (I—32) член, являющийся множителем градиента скорости, может быть интерпретирован как кажущаяся или эффективная вязкость в ньютоновском смысле. Величины η_0 и η_m представляют собой вязкости неразрушенных и предельно разрушенных структур. В уравнениях (I—32) ось градиентов скорости смещена вверх по оси напряжений относительно своего истинного положения. Характерные кривые

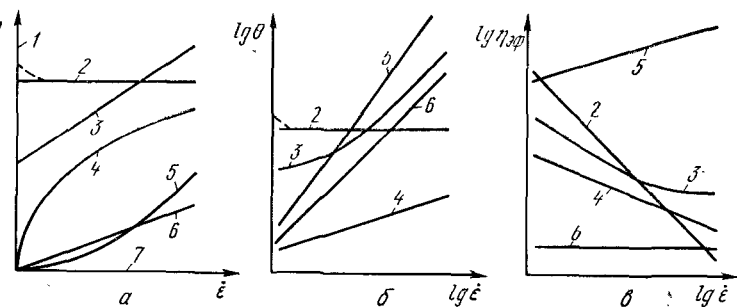


рис. 2. Зависимости для различных тел:

— между напряжением сдвига и градиентом скорости в равномерных шкалах; — то же в логарифмических шкалах; *в* — между эффективной вязкостью и градиентом скорости в логарифмических шкалах; 1 — упругое (Гуково); — пластичное (Сен-Венана); 3 — пластично-вязкое (Бингама); 4 — псевдопластичное; 5 — дилатентное; 3, 4, 5 — реологические тела; 6 — истинно-вязкое (Ньютона); 7 — идеальная жидкость (Паскаля).

ечения для некоторых уравнений (I—31) и (I—32) показаны на рис. 2.

Приведенные выше теоретические и эмпирические зависимости описывают поведение многих реальных систем; тем не менее на практике могут встретиться продукты, для описания течения которых понадобятся другие математические модели. От чрезмерного усложнения таких моделей предостерегали ведущие механики и геологи [151, 157] как в СССР, так и за рубежом.

КЛАССИФИКАЦИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ ИХ ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Принадлежность реального тела к тому или иному виду «идеального» реологического тела, выявленная на основе предварительных экспериментов, позволяет верно выбрать прибор для исследования и определить свойства, подлежащие изучению.

Феноменологический способ классификации на основе математических моделей дан в предыдущем разделе. Если взять упругое и истинно вязкое тело в качестве крайних, то все остальные тела, описанные выше, будут располагаться между ними.

Предложенная Р. И. Шищенко [183] простая классификация реальных тел по величине отношения $\theta_0/\rho g$ показывающего меру способности вещества сохранять свою форму (ρ — плотность продукта, кг/м³; g — ускорение силы тяжести, 9,8 м/с²), приведена ниже.

$\frac{\theta_0}{\rho g}$, м	Менее 0,005	0,005—0,02	0,02—0,15	Более 0,15
Вещество	Структурные жидкости	Жидкие пасты	Густые пасты	Твердые тела

Б. А. Николаев [124] предлагает обобщенную классификацию (от твердого до истинно вязкого состояния) по величине механических свойств: модулей упругости, вязкости и пр. К первой группе он относит твердые и твердообразные тела (твердый жир, целые ткани мяса, сухари, печенье и др.), ко второй — твердо-жидкие (мясной фарш, творог, студни, мучное тесто и др.), к третьей — жидкообразные и жидкости (расплавленный жир, бульоны, молоко, патока, мед, вода и др.).

Представляет интерес классификация (см. рис. 2) реальных тел с помощью степенного уравнения:

$$\theta = \theta_0 + B_1^* \dot{\epsilon}^n \quad \text{или} \quad \theta - \theta_0 = B_1^* \dot{\epsilon}^n, \quad (I-33)$$

где B_1^* — коэффициент, пропорциональный эффективной вязкости (Па·с ^{n}) при единичном значении градиента скорости $\dot{\epsilon} = 1_1 \text{ с}^{-1}$;

n — индекс течения, характеризующий угол наклона линии течения в логарифмических шкалах.

Левую часть второго варианта уравнения (I-33) можно обозначить $\theta - \theta_0 = \theta'$, а правую представить в следующем виде:

$$B_1^* \dot{\epsilon}^n = B_1^* \dot{\epsilon}^{n-1} \dot{\epsilon} = \eta_{\text{эф}} \dot{\epsilon}; \quad \eta_{\text{эф}} = B_1^* \dot{\epsilon}^{n-1}, \quad (I-34)$$

где $\eta_{\text{эф}}$ — эффективная вязкость, Па·с.

При такой форме записи эффективной вязкости размерность коэффициента B_1^* не соответствует размерности вязкости. Искусственно такое соответствие можно получить по уравнению

$$\eta_{\text{эф}} = B_0^* \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_1} \right)^{n-1} = B_0^* \dot{\epsilon}_*^{n-1}, \quad (I-35)$$

где B_0^* — эффективная вязкость при единичном значении гра

дизита скорости, Па·с, т.е. $\dot{\epsilon}_1 = 1 \text{ с}^{-1}$;

$\dot{\epsilon}_*$ — безразмерный градиент скорости (его числовое значение);

$n - 1 = m_1$ — темп разрушения структуры.

С учетом этих преобразований исходное уравнение (1—33) можно представить в следующем виде:

$$\theta' = \eta_{\text{эф}} \dot{\epsilon}. \quad (1-36)$$

Если в уравнении (1—33) $\theta_0 = 0$ и $n = 1$, то оно описывает течение истинно вязкой, ньютоновской жидкости (1—16), коэффициент B_1^* принимает значение ньютоновской вязкости. При $\theta_0 = 0$ и $n > 1$ уравнение соответствует дилатентным жидкостям, при $\theta_0 = 0$ и $n < 1$ — псевдопластичным. Для пластично-вязких тел Бингама $\theta_0 > 0$ и $n = 1$. В исходной форме записи уравнение описывает поведение «степенных» жидкостей, обладающих истинным или кажущимся предельным напряжением сдвига [210].

Кроме названных четырех видов тел на рис. 2, а показаны упругое тело, у которого при любых напряжениях течение отсутствует, следовательно, вязкость бесконечна; пластичное тело, эффективная вязкость которого характеризуется линией с углом наклона 45° (рис. 2, в), и идеальная жидкость, при течении которой внутренние сопротивления равны нулю. Наглядное представление о всех этих телах дает табл. 3.

Таблица 3

Кривая по рис. 2	Предельное напряжение сдвига	Индекс течения	Вязкость	Тело
1	0	∞	∞	Упругое
2	> 0	0	> 0	Пластичное
3	> 0	1	> 0	Пластично-вязкое
4	0	< 1	> 0	Псевдопластичное
5	0	> 1	> 0	Дилатентное
6	0	1	> 0	Истинно-вязкое
7	0	0	0	Идеальная жидкость

Примечание. Если псевдопластичное и дилатентное тела имеют предельное напряжение сдвига, то на рис. 2 по оси ординат следует откладывать значения новой переменной, равной $(\theta - \theta_0)$.

Системы, перечисленные в табл. 3, не меняют своих свойств во времени. Выделяют еще группу систем с переменными во времени свойствами: тиксотропные, которых напряжение сдвига и эффективная вязкость уменьшаются во время сдвига, и реопектные, у которых напряжение сдвига и эффективная вязкость увеличиваются со временем при воздействии на систему касательных напряжений и постоянном градиенте скорости.

Кривые течения названных выше «степенных» жидкостей в равномерных шкалах (рис. 2, а) спрямляются в логарифмических (рис. 2, б). Исключение составляет кривая течения бингамова тела, которая выходит в прямую при высоких напряжениях (градиентах скорости) значительно превышающих предельное напряжение сдвига. Показатель степени (индекс течения) в уравнении (I—33) определяется выражением

$$n = \frac{d \lg \theta}{d \lg \dot{\epsilon}}. \quad (I-33)$$

Если эффективную вязкость определить по уравнению Ньютона (I—16), (I—36) для определенных напряжений и градиентов скорости, то темп разрушения структуры, характеризующий угол наклона эффективной вязкости (рис. 2, в), будет вычисляться по зависимости

$$m_1 = \frac{d \lg \eta_{\text{эф}}}{d \lg \dot{\epsilon}} = \frac{d (\lg \theta - \lg \dot{\epsilon})}{d \lg \dot{\epsilon}} = \frac{d \lg \theta}{d \lg \dot{\epsilon}} - 1 = n - 1. \quad (I-34)$$

Для псевдопластичных систем $0 < n < 1$, следовательно $-1 < m_1 < 0$. Для удобства преобразований обозначим $m = |m_1|$. Таким образом, изменение эффективной вязкости от скорости деформации в логарифмических шкалах изображается прямой линией, угол наклона которой определяется темпом разрушения структуры. Для бингамова тела темп разрушения структуры, равный нулю по последнему уравнению, достигается при напряжениях, значительно превышающих предельное напряжение сдвига: как видно из рис. 2, кривая 3 переходит в горизонтальную прямую.

При рассмотрении графиков рис. 2, б, в следует учитывать, что в логарифмических шкалах нулевые значения величин лежат в бесконечности вниз и влево относительно нанесенных осей координат. Логарифмы чисел

вых значений величин равны нулю, когда сами величины равны единице. Поэтому на рис. 2, б, в кривые течения упругого тела и идеальной жидкости не показаны.

Н. В. Михайлов и П. А. Ребиндер [118] делят реологические тела на жидкообразные и твердообразные (рис. 3) в зависимости от характера кривой $\eta_{эф}(\theta)$ и периода релаксации. К жидкообразным телам относятся ньютоновские жидкости и структурированные системы, не имеющие статического предельного напряжения сдвига, т. е. $\theta_{ост} = 0$ (см. рис. 3); к твердообразным — упруго-

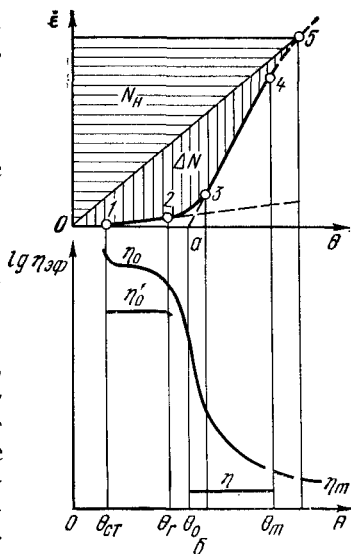


Рис. 3. Реологические кривые для твердообразных систем:

a — зависимость градиента скорости от напряжения сдвига; *b* — зависимость логарифма эффективной вязкости от напряжения сдвига: 0—1 — зона упругих деформаций; 1—2 — зона пластического течения с наибольшей вязкостью: $\eta_0 = (\theta - \theta_{ст})/\dot{\epsilon}$ — наибольшая пластическая вязкость по Шведову; 2—3 — начало зоны лавинного разрушения структуры; 3—4 — зона вязко-пластичного течения: $\eta = (\theta - \theta_б)/\dot{\epsilon}$ — меньшая пластическая вязкость по Бингаму; 5 — зона ньютоновского течения с постоянной вязкостью предельно разрушенной структуры.

пластичные, условно-пластичные и другие тела, обладающие статическим и динамическим ПНС. Зависимость эффективной вязкости от напряжения или скорости сдвига считают основной характеристикой структурно-механических свойств дисперсных систем, так как эффективная вязкость является итоговой характеристикой,

описывающей равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установившемся потоке. В общем виде кривая течения $\dot{\epsilon}(\theta)$ на рис. 3 имеет S-образный характер и отсекает на оси абсцисс отрезок, в пределах которого напряжения, воздействующие на тело, вызывают только упругие или эластические деформации. Представляет интерес срав-

нение кривых на рис. 2 и 3. Кривая 3 на рис. 2, а алогична участкам 1—2 и 3—4 на рис. 3, а. В прям превращается кривая на участке 3—4 (рис. 3, б), е ее построить в логарифмических шкалах (кривая рис. 2, в). На сравниваемых участках кривые опи вают течение в зоне лавинного разрушения структур переменной эффективной вязкостью, ее изменение п чиняется степенному закону

$$\eta_{\text{эф}} = B_0^* \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_1} \right)^{-m} = B_0^* \dot{\varepsilon}_*^{-m}, \quad (1-)$$

где m — темп разрушения структуры, соответствующий а лютной величине m_1 .

Градиент скорости и окружная скорость боковой верхности ротора вискозиметра (ω) связаны соотно нием $\dot{\varepsilon} = a\omega$, (a — коэффициент, зависящий от толщ градиентного слоя и способа расчета градиента ско сти, 1/м), поэтому формулу (1—39) можно представ в следующем виде:

$$\eta_{\text{эф}} = B \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^{-m} = B\omega_*^{-m}, \quad (1-)$$

где B — эффективная вязкость при единичной скорости, при $\omega_1 = 1$ м/с;

ω_* — относительная скорость, численно равная скорости, раженной в м/с.

Важнейшими сдвиговыми свойствами структуриров ных систем являются пластическая η и эффектив вязкости $\eta_{\text{эф}}(\theta)$ и период релаксации $\tau_p(\theta)$, наиболь вязкость η_0 неразрушенной структуры при скольже мест контакта и вязкость предельно разрушенной стр туры (η_m); модули упругости сдвига (G); пределы кучести условно-статический $\theta_{\text{ст}}$ и динамический — п дельное напряжение сдвига θ_0 ; прочность структуры упругохрупком или эластичном разрыве (θ_m) и пластично-вязком разрушении (θ_r). Эти характерист показаны на рис. 3. При исследовании и расчете к ретных явлений в ряде случаев можно игнориров одни, существенные, свойства тел и, напротив, учи вать другие [81].

Исходя из зависимости изменения эффективной к кости от напряжения сдвига (см. рис. 3, б), можно

методу П. А. Ребиндера с сотр. [1] определить степень разрушения структуры α :

$$\alpha = \frac{\eta_0 - \eta_{\text{эф}}(\theta)}{\eta_0 - \eta_m}. \quad (I-41)$$

Эта характеристика показывает, какая часть структурной сетки от первоначального состояния разрушилась при данном напряжении сдвига.

Для характеристики дисперсных систем существенную роль играют модули упругости и периоды релаксации [61].

Условно-мгновенный модуль упругости представляет собой отношение напряжения к мгновенно-упругой составляющей деформации сдвига ϵ_0 ; эластический модуль — отношение напряжения к упругой (эластической) деформации за вычетом мгновенно-упругой: $\epsilon_m - \epsilon_0$; равновесный модуль вычисляют как отношение напряжения к общей деформации ϵ_m , когда нельзя разграничить упругую и эластическую деформации. Период релаксации τ_p из спектра времен релаксации можно вычислить по уравнениям или измерить непосредственно на приборе. Напряжения могут релаксировать (I-19) при постоянной деформации, а деформации (I-22) — при постоянном напряжении. При этом для измерения периода релаксации τ_e можно пользоваться торсионным прибором с жестким торзионом. Торсион с ротором прибора поворачивают на некоторый угол и закрепляют, первоначальное высокое значение напряжения будет убывать со временем. Для измерения τ_0 пользуются грузовым прибором типа Воларовича. Под действием постоянного напряжения происходит деформация системы, которая после снятия напряжения постепенно убывает. Чтобы получить спектр распределения периодов релаксаций, нужно снять кинетические кривые $\epsilon(\tau)$ при различных напряжениях сдвига. Периоды релаксации можно определить и для случая осевого деформирования продукта, например, при помощи уравнения (I-24).

При обработке экспериментальных данных часто не удается всю кривую течения описать одним уравнением. В этом случае реологические характеристики вычисляют для определенных интервалов напряжений или деформаций. Если опытная кривая не спрямляется, ее

разбивают на участки (см. рис. 3, а, участки 1, 2, 3, 4) либо аппроксимируют одной линией.

Для вычисления значений величин структурно-механических свойств по экспериментальным данным строится основную реологическую зависимость: градиент скорости — напряжение сдвига (см. рис. 2, а, 3, а). При этом эффективную вязкость, т. е. кажущуюся для данных условий измерения, вычисляют в соответствии с математическим выражением гипотезы Ньютона (I—3). Изменение эффективной вязкости в широком диапазоне напряжений сдвига показано на рис. 3, б. Там же даны граничные значения напряжений сдвига. Из рис. 3 видно, что эффективная вязкость уменьшается с увеличением напряжения и при напряжениях, превышающих предельное, кривую можно описать простым математическим уравнением вида (I—39), (I—40). Для однородных материалов, например водной пасты бентонитовой глины, экспериментальные точки незначительно отклоняются от средних значений, а воспроизводимость опытов полная. В тех случаях, когда исследуют производственные композиции продукта, на аналогичных графиках возможен значительный разбег прямых, построенных для различных опытов. Это объясняется неоднородностью объекта, а также тем, что нельзя получить одинаковые пробы продукта.

Г. М. Бартенев и Н. В. Ермилова [12] считают целесообразным классифицировать дисперсные системы твердо- и жидкообразные по характеру изменения эффективной вязкости с увеличением градиента скорости.

Углубляя представления П. А. Ребиндера, для тиксотропно-коагуляционных дисперсных структур Г. М. Бартенев и Н. В. Ермилова вводят понятие о двух типах реологических кривых течения. К первому типу относятся кривые течения (см. рис. 2, 3), у которых вязкость и градиент скорости являются однозначными функциями напряжения; эти кривые характерны для многих пищевых продуктов (мясные фарши, конфетные массы и пр.); ко второму — кривые течения, у которых зависимости вязкости или скорости деформации представляются неоднозначными функциями напряжения сдвига (рис. 4). Для них характерно некоторое уменьшение напряжения сдвига при увеличении градиента скорости.

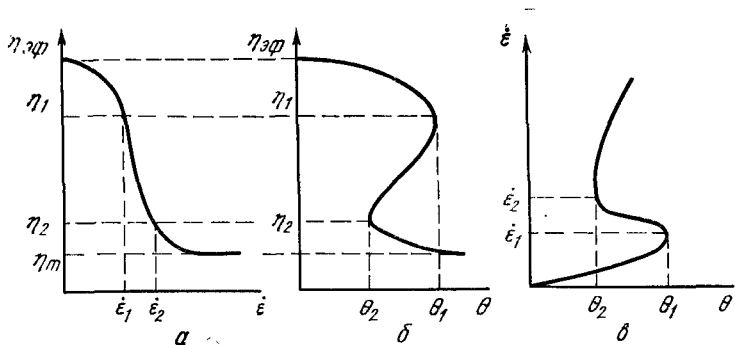


Рис. 4. Зависимость эффективной вязкости:

a — от скорости сдвига; *b* — от напряжения сдвига; *в* — скорости сдвига от напряжения сдвига.

сти. Такие кривые были получены для ряда концентрированных суспензий глин, консистентных смазок, полимерных дисперсий; изучены они недостаточно.

Существенный интерес представляют продукты, характеристики течения которых зависят от длительности воздействия напряжения [194]: тиксотропные и реопектные (рис. 5). По своему поведению они взаимно противоположны, так же как взаимно противоположны псевдопластичные и дилатентные системы. При этом наблюдается некоторое подобие псевдопластичных и тиксотропных систем, а также дилатентных и реопектных. У псевдопластичных и дилатентных систем эффективная

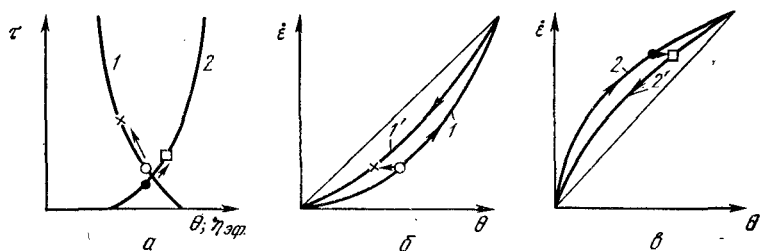


Рис. 5. Кривые течения, характеризующие:

a — зависимость напряжения сдвига и эффективной вязкости от длительности действия напряжения при постоянном градиенте скорости; для систем: 1 — тиксотропные; 2 — реопектные; *b* — кривые течения тиксотропных систем: 1 — при нагрузке; 1' — при разгрузке; *в* — кривые течения реопектных систем: 2 — при нагрузке; 2' — при разгрузке.

вязкость с увеличением градиента скорости изменяется достаточно быстро, и при обычных измерениях невозможно обнаружить влияния продолжительности деформации на вязкость. Уменьшение эффективной вязкости псевдопластичных систем обусловлено в основном разрушением структурной сетки и агрегатов частиц с ориентацией последних вдоль вектора скорости. Увеличение эффективной вязкости дилатентных систем обусловлено «расширением» (набуханием) частиц, что вызывает уменьшение толщины прослоек дисперсионной среды и увеличение силы сопротивления. Тиксотропным системам присуще восстановление структуры после разрушения и непрерывное ее разрушение (до определенной предельной деформации) при деформировании (рис. 5, а, б). Реопектные системы способны структурироваться, т. е. образовывать контакты между частицами за счет ориентации или слабой турбулизации при механическом воздействии с небольшими градиентами скорости (рис. 5, а, в). По сравнению с тиксотропными они встречаются редко. Если за основу принять график, характерный для тиксотропных и реопектных систем (рис. 5, а), то эти два свойства могут проявляться у псевдопластичных и дилатентных систем. Тогда соответственно на рис. 5, б, направления всех стрелок меняются на обратные.

Наглядное представление о виде течения продуктов дают точки одинаковой конфигурации, нанесенные на рис. 5, а, б, в. При этом следует иметь в виду, что кривые на рис. 5, а построены для постоянного градиента скорости, который на рис. 5, б, в выражается горизонтальным отрезком между кривыми 1—1' и 2—2'.

Особенностью многих псевдопластичных и пластично-вязких структурированных дисперсных систем коагуляционного типа является наличие петель гистерезиса при нагрузке и разгрузке (см. рис. 5). Материал начинает течь, когда напряжение достигает величины предельного или условно-предельного. В дальнейшем с увеличением напряжения градиент скорости повышает структурную сетку, а также агрегаты разрушаются, ориентируются частицы. Каждому градиенту скорости соответствует определенное равновесное состояние системы, которое достигается при медленных изменениях градиента скорости. В действительности опыт протекает быстро, возможны местные накопления деформаций и

напряжений, которые не успевают релаксировать при переходе к следующему измерению, когда накладываются новые напряжения. Неоднократное прохождение зоны исследуемых напряжений в прямом и обратном направлениях позволяет добиться равновесного состояния продукта, при котором петли гистерезиса практически исчезают. Для тиксотропных дилатентных и псевдопластичных систем каждая последующая кривая располагается левее и выше предыдущей (см. рис. 5, б). В пространственной системе координат $\eta_{эф}(\tau, \theta)$ все экспериментальные точки образуют криволинейную поверхность.

Площадь реограммы (см. рис. 3, а) между кривой $\epsilon(\theta)$ и осью ординат представляет собой удельную мощность N (на единицу объема в Вт/м³) [9]. Она складывается из мощности ньютоновского течения N_H (площадь между осью ординат и линией 0—5) и мощности ΔN , требующейся при том же градиенте скорости для достижения данной степени разрушения структуры, т. е. $N = N_H + \Delta N$.

Мощность $\Delta_1 N = \Delta N_1 - \Delta N_{1'}$, равная площади между двумя кривыми, образующими петли гистерезиса (рис. 5, б), характеризует степень приближения системы к равновесному состоянию. Представим мощности течения системы по разным кривым:

$$N = N_H + \Delta N_1; \quad \Delta N_1 = \Delta N_{1'} + \Delta_1 N; \quad N = N_H + \Delta N_{1'} + \Delta_1 N.$$

Разделив последнее выражение на N , получим:

$$\frac{N_H}{N} + \frac{\Delta N_{1'}}{N} + \frac{\Delta_1 N}{N} = 1, \quad (I-42)$$

где слагаемые соответственно характеризуют доли ньютоновского течения и затраты мощности на достижение равновесного состояния. Такие расчеты приобретают особую важность, когда во время измерения структура продукта претерпевает изменения. Например, структура жира при температуре ниже температуры плавления при механическом воздействии на него из коагуляционно-кристаллизационной переходит в коагуляционную. При этом гистерезисная мощность имеет относительно большое значение, переходя в тепло и вызывая расплавление мест контакта в исходной структуре.

Рассмотренный выше метод учета тиксотропии, нашему мнению, заслуживает внимания. Анализируя другие методы, А. Б. Метцнер [17] отмечает, что они очень часто содержат экспериментальные ошибки. Кроме того, во многих процессах продукт подвергается интенсивным механическим воздействиям (в насосах, шалках и пр.), т. е. его структура достигает практически предельного разрушения. Поэтому при использовании результатов вискозиметрических исследований для практических расчетов следует, хотя бы приближенно, выбирать ту кривую течения, которая соответствует данной степени разрушения структуры.

Особое место среди структурно-механических свойств занимают поверхностные свойства (липкость, коэффициент трения) [6]. Они характеризуют усилие взаимодействия между поверхностями конструкционного материала и продукта при нормальном отрыве или сдвиге [см. уравнение (I—15)]. При этом для большинства мясных и молочных продуктов липкость (адгезия) определяет величину усилия внешнего трения. Теоретически, особенно на молекулярном уровне, вопросы адгезии и внешнего трения еще разрабатываются, а для пищевых продуктов такие разработки практически отсутствуют.

Для объяснения адгезии существует несколько гипотез [14, 16, 63, 168]:

по адсорбционной теории Дебройна и Мак-Ларена адгезия связана с действием межмолекулярных сил физических — ван-дер-ваальсовых — или химических, например ковалентно-ионных;

по электрической теории Б. В. Дерягина и Н. А. Котовой — с разностью потенциалов на границе разнородных тел, т. е. с возникновением в зоне контакта своеобразного электрического молекулярного конденсата обусловленного двойным электрическим слоем;

по электромагнитной — с электромагнитным взаимодействием, т. е. с излучением и поглощением электромагнитных волн атомами и молекулами, что может реализоваться в конденсированных телах;

по электрорелаксационной теории Н. М. Москвина — с двойным электрическим слоем и скоростью течения, измерение которой вызывает появление деформационной составляющей силы или работы разрушения.

связанной со скоростью протекания релаксационных процессов в разрушаемом соединении;

по диффузионной теории С. С. Воюцкого и Б. В. Дерягина — с диффузией концов макромолекул через границу первоначального контакта, в результате чего в предельном случае граница раздела фаз может исчезать; подобна этой механическая теория, согласно которой адгезионный контакт образуется за счет механического зацепления молекулярных или надмолекулярных образований с микронеровностями поверхности;

по термодинамической теории — с поверхностным натяжением, которое обуславливает, по правилу Дюпре, работу по замене поверхности раздела твердое тело — жидкость поверхностью твердое тело — газ, что реализуется при отрыве диска от продукта.

В ряде случаев для двух или более фазных систем установить границу разрушения сложно. Поверхность пластины после отрыва может быть смочена дисперсионной средой, либо покрыта тончайшей пленкой тонкодисперсной фракции исследуемого продукта [3, 152, 179]. Аналогичные соображения высказываются [198] при изучении адгезии полимеров к металлам.

Общей количественной теории адгезии пока нет, хотя весьма плодотворны попытки комплексного объяснения адгезии на основе различных механизмов взаимодействия. В этом смысле для разработки теоретических представлений об адгезии перспективны фундаментальные работы акад. П. А. Ребиндера об адсорбции и поверхностной активности тонких пленок. В результате остроумных и тонких экспериментов В. А. Пчелин [145] установил для растворов белковых веществ поверхностное натяжение, диэлектрическую постоянную, поверхностный потенциал и др. В явлении адгезии белковых веществ, как следует из теоретических представлений Б. В. Дерягина, участвуют кроме ван-дер-ваальсовых сил притяжения электростатические силы, обусловленные возникновением двойного электрического слоя на поверхности.

Для рассмотрения поверхностной энергии пленок применяют также фундаментальные термодинамические законы.

Первая работа, теоретически обосновывающая разрыв двух дисков, между которыми находится вязкая

жидкость, принадлежит М. Ж. Стефану. Им получено уравнение [198]

$$p = \frac{3\eta R^2}{4\tau_0} \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right), \quad (I-4)$$

где R — радиус диска;
 τ_0 — время отрыва (расхождения) дисков от расстояния до h_2 ;
 η — вязкость жидкости.

В явлениях адгезии, как было сказано выше, участвует ряд механизмов на молекулярном и надмолекулярном уровнях, поэтому их детальный учет весьма затруднителен.

Для практических целей достаточно описать общие макроскопические закономерности явления. Для этого можно провести расчеты на заранее выбранной модели, которая представляет собой образец «сложной жидкости» между двумя жесткими цилиндрическими пластинами; она обладает одинаковой с продуктом адгезии [3, 179]. «Жидкость» имеет коэффициент поверхностного натяжения α . Смачиваемость пластины характеризуется $\cos \beta$, т. е. $\alpha = \alpha' \cos \beta$ (где α' — коэффициент поверхностного натяжения при полном смачивании Н/м). Большое количество воды во многих пищевых продуктах и их сильная адгезия [5, 154] оправдывают такое представление. Действительно, например, фарш можно рассматривать как дисперсную структуру с водно-белково-солевыми прослойками на поверхности частиц; на свободном срезе мышечных волокон имеется такая же пленка за счет освобождения межклеточной жидкости.

Пластины прижимаются друг к другу силой капиллярного взаимодействия [14, 16]:

$$P' = \frac{2\alpha' F \cos \beta}{h} = \frac{2\alpha F}{h}, \quad (I-4)$$

где F — площадь поверхности действительного контакта в данный момент времени, м²;
 h — толщина слоя продукта, м.

Приложение внешней силы P_0 , направленной в обратную сторону и равной P' , вызывает полный отрыв пластины за время τ_0 . При этом внешняя сила при неабсолютно жестком динамометре и скорости отрыва $\omega_0 \neq \infty$ увеличивается линейно во времени τ :

$$P = \omega_c \tau \text{ или } P_0 = \rho_0 F_0 = \omega_c \tau_0, \quad (\text{I-45})$$

где ω_c — скорость увеличения силы, Н/с;

F_0 — площадь пластины, м².

Поэтому естественно сделать предположение о линейном убывании площади контакта за счет нарушения связей по дефектам структуры, что подтверждается также высокоскоростной киносъемкой (30 000 кадров в секунду):

$$F = F_0 - C\tau, \quad (\text{I-46})$$

где C — коэффициент пропорциональности, зависящий от состава продукта, активности контактирующих групп, размера частиц и характеризующий темп убывания площади, м²/с;

F — текущее значение площади действительного контакта, м².

Внутреннее давление взаимодействия пластины с продуктом убывает во время действия отрывающего усилия, оно получается путем решения уравнений (I-44), (I-46):

$$p' = \frac{P'}{F_0} = \frac{2\alpha F}{hF_0} = \frac{2\alpha}{h} \left(1 - \frac{C}{F} \tau\right). \quad (\text{I-47})$$

В момент отрыва внутреннее и внешнее давления равны и направлены в противоположную сторону, т. е. $p' - p_0 = 0$. Подставив в уравнение (I-47) названные граничные условия и заменив из уравнения (I-45) $\tau_0 = \frac{\rho_0 F_0}{\omega_c}$, получим:

$$p_0 = \frac{2\alpha}{h} \cdot \frac{\omega_c}{\omega_c + \frac{2\alpha C}{h}}. \quad (\text{I-48})$$

Это уравнение более удобно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{p_0} = \frac{h}{2\alpha} + \frac{C}{\omega_c}. \quad (\text{I-49})$$

Оно линейно: при $\omega_c = \text{const}$ (переменно h) наклон прямой дает величину $\frac{1}{2\alpha}$, отрезок, отсекаемый на оси ординат, показывает $\frac{C}{\omega_c}$; при $h = \text{const}$ (переменно ω_c) наклон прямой дает C , а отрезок, отсекаемый на оси ординат, показывает $\frac{h}{2\alpha}$, откуда при известной тол-

щине слоя продукта определяется коэффициент поверхностного натяжения. Зависимость (I—49) весьма чувствительна к изменению параметров, что удобно для экспериментального определения коэффициента поверхностного натяжения и темпа убывания площади контакта, которые в отличие от липкости являются инвариантными характеристиками продуктов.

Внешнее трение мясных и молочных продуктов, по видимому, нельзя отнести к физическим свойствам продукта, так как эта характеристика зависит от липкости и ряда других факторов. Трение может быть статическим — до начала смещения, и динамическим — при движении продукта по поверхности. Влияние различных факторов (давления контакта, скорости смещения, температуры и пр.) на коэффициент внешнего трения неоднозначно. Установлено, что для мясных и молочных продуктов [154], резин и полимеров [146] с увеличением давления контакта (p_k , Па) эффективный коэффициент внешнего трения ($\mu_{эф} = \frac{p_{тр}}{p_k}$, где $p_{тр}$ — удельная сила трения, Па) уменьшается по степенной зависимости: с увеличением скорости смещения и температуры его значения проходят через максимум [154, 168]. Для теоретического обоснования внешнего трения предложены молекулярно-кинетическая, механическая, физическая и другие теории [6, 63], аналогичные теориям, объясняющим адгезию.

Однако имеющиеся теоретические разработки пока не нашли воплощения для анализа внешнего трения мясных и молочных продуктов.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

В процессе переработки мясные и молочные продукты подвергаются воздействию различных факторов: изменению температуры, влажности, степени дисперсности и механической обработки, кислотности, химического состава и пр. Ниже рассмотрено влияние общих факторов (температуры, влажности и др.) на изменение величин реологических свойств.

Температурные изменения вязкости продуктов описы-

вают уравнение Френкеля-Эйринга [152, 154], имеющее теоретическое обоснование:

$$\eta = A \exp\left(\frac{E}{RT}\right), \quad (I-50)$$

где A — постоянная, Па·с.

E — энергия активации, кДж/кмоль;

R — газовая постоянная; $R = 8,32$ кДж/(кмоль·К);

T — абсолютная температура жидкости, К.

Это уравнение в отличие от других позволяет проследить качественные изменения состояния продукта. Постоянная A без точного количественного соотношения трактуется как произведение модуля объемной упругости на период колебания молекулы около одного ее положения:

$$A = K\tau_0.$$

Средняя продолжительность колебания молекулы около одного положения

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right).$$

Для воды приближенно $\tau = 10^{-11}$, $\tau_0 = 10^{-13}$ с.

Энергия активации с увеличением температуры для некоторых жидкостей может уменьшаться. К таким жидкостям относится и жир, для которого энергия активации уменьшается скачкообразно каждый раз при плавлении следующей фракции [154].

Для неньютоновских жидкостей [154] уравнение (I-50) принимает вид, аналогичный уравнению (I-39), т. е.:

$$\eta_{\text{эф}} = A \left[\exp\left(\frac{E}{RT}\right) \right] \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_1} \right)^{-m}, \quad (I-51)$$

Уравнение Бачинского [152] имеет некоторые теоретические обоснования, сделанные А. С. Предводителевым, М. Ф. Широковым и др. Оно связывает температурные изменения вязкости с изменением удельного объема:

$$\eta = \frac{c}{v - \omega}$$

или

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{c} v - \frac{\omega}{c}, \quad (I-53)$$

где v — удельный объем жидкости ($v=1/\rho$), м³/кг;
 ω, c — соответственно предельный объем и модуль вязкости, зависящие от свойств жидкости, м³/кг и м²/с.

Постоянная ω представляет собой предельный объем который занимает промежуточное положение между удельными объемами жидкости и твердого тела. Удельный и предельный объемы могут быть связаны зависимостью

$$v = \omega + B \exp\left(-\frac{E}{RT}\right).$$

Хорошие результаты при обобщении экспериментальных данных дают простые эмпирические зависимости

$$\eta = a_1 t^{-a_2}$$

или

$$\eta = a_1 \left(\frac{t}{t_{\text{пр}}}\right)^{-a_2}, \quad (I-54)$$

где a_1 и a_2 — эмпирические коэффициенты, в первом уравнении a_1 имеет размерность Па·с·К^{a₂}, во втором — Па·с; коэффициент a_2 безразмерный;
 t — температура жидкости, К;
 $t_{\text{пр}}$ — температура приведения, К.

Температурно-инвариантные характеристики вязкости для некоторых мясных и молочных продуктов предложены А. М. Маслов [85, 106, 107]:

$$\frac{B_0^* T_{\text{пр}} \rho_{\text{пр}}}{B_{0\text{пр}}^* T \rho} = a (T - T_{\text{пр}}), \quad (I-54)$$

где $B_0^*, B_{0\text{пр}}^*$ — эффективная вязкость при единичном значении градиента скорости [см. уравнение (I-39)], или ньютоновская вязкость, Па·с;

$T, T_{\text{пр}}$ — абсолютная температура жидкости, К;

Индекс «пр» означает, что вязкость и плотность отнесены к температуре приведения, которая подбирается эмпирически;

$\rho, \rho_{\text{пр}}$ — плотность жидкости, кг/м³;
 a — эмпирический коэффициент, 1/К;

Уравнение (I-54) в широком температурном диапазоне может не быть линейным, тогда для определения вязкости следует пользоваться графическими зависи-

мостями [107]. Температурные изменения предельного напряжения сдвига часто можно описать аналогичными зависимостями, а в малом диапазоне температур оказываются справедливыми линейные уравнения. Температурные изменения плотности при линейной зависимости хорошо описывает уравнение

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta_t (t - t_0)}, \quad (I-55)$$

где ρ_t и ρ_0 — соответственно плотность в кг/м^3 при температуре t и t_0 ;

β_t — коэффициент температурного расширения, $1/\text{K}$.

Температурные зависимости других реологических характеристик могут не иметь монотонного изменения и описываются для каждого продукта своими уравнениями. Например, при увеличении температуры липкость колбасного фарша увеличивается, достигает максимума и затем начинает уменьшаться.

Увеличение влажности (W , кг влаги на 1 кг продукта), или, что то же самое, уменьшение концентрации сухих веществ (c , кг сухих веществ на 1 кг продукта), приводит к монотонному уменьшению сдвиговых свойств (вязкость, предельное напряжение сдвига и пр.). Эти изменения могут быть описаны экспоненциальными, степенными или линейными зависимостями типа уравнений (I-50), (I-53) и др. [154].

Существенный интерес представляют формулы Эйнштейна-Гатчека [154], имеющие теоретическое обоснование [100]:

$$\eta = \eta_0 (1 + 4,5\varphi); \quad (I-56)$$

$$\eta = \eta_0 \frac{(1/\varphi)^{1/3}}{(1/\varphi - 1)^{1/3}} = \frac{\eta_0}{(1 - \varphi)^{1/3}}, \quad (I-57)$$

где η_0 — вязкость дисперсионной среды, Па·с;

$\varphi = \frac{V_\phi}{V}$ — объемная концентрация дисперсной фазы в системе, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

V_ϕ — объем дисперсной фазы, включая объем сольватных оболочек, м^3 ;

V — объем системы, м^3 .

Применимость формул для того или иного продукта решается экспериментально, например формула (I-56) хорошо описывает зависимость вязкости молока от количества дисперсной белково-жировой фазы.

Считают, что формула (I—57) более приемлема для расчета вязкости лиофильных коллоидов.

Плотность (ρ , кг/м³) большинства мясных и молочных продуктов (за исключением дисперсий жиров и масел) с увеличением концентрации увеличивается линейно:

$$\rho_c = \rho_0 + ac, \quad (I-58)$$

где ρ_0 — плотность при нулевой или какой-либо другой фиксированной концентрации, кг/м³;

a — эмпирический коэффициент, кг/м³.

Влияние влажности на другие структурно-механические свойства может быть неоднозначно. Например при увеличении влажности колбасного фарша значения липкости проходят через максимум.

Влияние на структурно-механические свойства других технологических факторов, например продолжительности хранения, степени механической обработки и дисперсности, кислотности и pH, специфично для каждого продукта и будет рассмотрено в соответствующих разделах.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проектирование, создание, качественная и эффективная работа отдельных машин, а также поточных автоматизированных линий должны основываться на всестороннем учете свойств сырья и продуктов. При использовании непрерывнодействующих приборов можно установить оперативную автоматическую обратную связь с обрабатывающей машиной, которая пока еще часто осуществляется вручную.

Представляют интерес статистические данные по применению реологических приборов в пищевой промышленности Канады [199]. По показаниям [123] фирм приборы для оценки разных показателей консистенции используют 52% фирм. В процентах к общему числу опрошенных предприятий по отраслям промышленности применяют приборы в мясной — 36, рыбной — 20, молочной — 42, кондитерской — 73, хлебопекарной — 50, консервной и скороморозильной — 79, масло-жировой — 78. Наиболее распространены ротационные вискозиметры и пенетрометры. Общее мнение было высказано о желательности стандартизации методов измерения консистенции.

Приборы для измерения структурно-механических (реологических) свойств материалов классифицируют на три группы: абсолютные, относительные и условные. Первые приборы показывают значения свойств в абсолютной системе единиц, основываясь на геометрических размерах рабочего органа и условиях проведения опыта; вторые требуют предварительной тарировки на эталонном материале, измеренные значения свойств относятся к свойствам эталонного материала, т.е. получаются безразмерные, относительные показатели (числовые значения физических величин), которые легко пересчитать в абсолютные значения. Приборы обеих групп теоретически обоснованы, полученные с их помощью данные объективны и могут быть использованы для расчета рабочих узлов аппаратов и оценки качества сырья и продуктов. Приборы третьей группы дают значения измеряемых величин в условных единицах,

что непригодно для расчетов. Этими приборами пользуются главным образом для сравнения каких-либо качественных показателей в узком диапазоне изменения технологических характеристик продукта.

Кроме того, приборы могут быть дифференциальными и интегральными. Первые позволяют проследить за распределением скоростей и деформацией продукта в приборе для любого момента времени и сечения, вторые — определить конечный, суммарный эффект измерения. Поля скоростей и деформаций могут быть однородными, т. е. изменяться одинаково по всему сечению, и неоднородными. Для вычисления значений величин свойств и обобщения данных наблюдений чрезвычайно важен выбор исходной математической модели (теоретической или эмпирической), которая с наибольшим приближением описывает поведение продукта в реальном процессе.

Для расчета рабочих органов машин и аппаратов пользуются теоретическими, эмпирическими или критериальными уравнениями с обязательной проверкой их при испытаниях на пилотных или натуральных установках. Основными предпосылками для применения значений величин структурно-механических свойств в расчетах рабочих узлов машин являются подобие эпюр скоростей и деформаций при измерении в приборе и рабочем узле, одинаковый или подобный характер изменений величин свойств при воздействии однотипных факторов. Для соблюдения этого весьма существенное значение имеет правильный выбор вида прибора, размеров его рабочего органа, кинематических и динамических факторов. Влияние на показания приборов геометрических, кинематических и динамических факторов определяют экспериментально с целью выбора оптимальных условий проведения экспериментов. В оптимальном режиме эксплуатации прибора измеренные величины свойств объективно отражают внутреннюю сущность объекта. Поэтому глубокое изучение реологических свойств позволяет выявить влияние на них технологических факторов и в свою очередь, варьируя последние, получить продукт с заранее заданными основными характеристиками.

Внутренние перемены в продукте, происходящие при проведении технологического процесса, наиболее до-

стоверно могут характеризовать только те физические свойства, которые претерпевают существенные изменения в этом процессе, превосходящие ошибки измерений. При этом на одном и том же приборе, но при различных параметрах его работы можно получить незначительное или интенсивное изменение величин свойств. Таким образом, для оценки качественного состояния продукта необходимо выбрать такие физические свойства и параметры прибора, которые дают наибольшее изменение величин свойств в рассматриваемом процессе. Обычно исследуемые характеристики не должны иметь больше одного экстремума. Иногда эти очевидные положения не учитывают. Так, в некоторых исследованиях отсутствуют обоснованные данные о методике выбора параметров прибора, математической модели продукта, часто не указаны технологические характеристики продуктов (влажность, дисперсность и пр.). Все это резко снижает ценность полученных результатов.

При работе на приборах возможны систематические и случайные ошибки. Удовлетворительной считается ошибка до $\pm 10\%$ при измерении значений свойств пластично-вязких и $\pm 2\%$ — жидких продуктов. Тщательная разработка методики экспериментов позволяет в ряде случаев допускать ошибку соответственно не более ± 5 и $\pm 0,5\%$.

Приборы для измерения значений каждой группы свойств (сдвиговых, компрессионных и поверхностных) имеют свою специфику. Однако общими будут следующие четыре фундаментальные переменные [188, 189, 214, 215] (не считая температуры и технологических характеристик): сила, момент или напряжение; расстояние, деформация или скорость деформации; время; энергия. В соответствии с этим механические измерительные приборы [221] содержат устройства для регистрации усилий, деформаций, времени; энергию вычисляют по этим показателям либо при помощи специальных приборов. Главная проблема в любом приборе — проблема рабочего органа [221]. Влияние размеров рабочих органов на показания приборов определяют экспериментально. Только экспериментально решается также вопрос использования полученных на приборах данных в расчете машин. Это направление в реологии

пищевых продуктов не получило еще должного развития.

Среди названных фундаментальных переменных наибольшие затруднения вызывает измерение динамического фактора, если его значение в процессе эксперимента не постоянно. В результате многочисленных исследований [3, 13, 98, 170, 179] было показано огромное влияние жесткости измерительной системы на результаты реологических исследований, особенно для неустановившихся режимов и начального участка экспериментальных кривых [98].

По виду измеряемой величины [188] реологические приборы можно классифицировать на четыре группы (табл. 4).

Таблица 4

Измеряемая величина	Постоянные величины	Пример (название прибора)
Динамическая (сила, момент, напряжение)	Геометрические, кинематические	Вискозиметр «Реотест»; универсальный прибор ВНИИМПа; сдвигомер Симоняна
Кинематическая (время, скорость)	Динамические, геометрические	Вискозиметры: РВ-8, Оствальда, Уббелюде, Гепплера
Геометрическая (длина, площадь, объем)	Динамические, кинематические (время)	Пенетрометры (конический пластометр КП-3 и др.);
Энергия (мощность)	Геометрические, кинематические	Фаринограф Брабендера; прибор Большакова—Фомина; приборы, дающие диаграмму сила—расстояние

Эта классификация в определенной мере условна, так как некоторые приборы позволяют варьировать две величины при постоянной третьей. Например, рассматривая двумерные методы в реологии, М. М. Кусаков [96] дает описание капиллярного вискозиметра, у которого усилие вытеснения жидкости, создаваемое первоначально сжатой пружиной, переменна, следовательно, и переменна скорость истечения. Известны также приборы [13], в которых изменение скорости сдвига или нагружения задается по определенному закону. Среди

методов, указанных в табл. 4, первые два получили наибольшее распространение, особенно в вискозиметрии. Первый метод — метод постоянной скорости сдвига — осуществляют обычно при помощи электромеханического или гидравлического привода, силу измеряют различными динамометрами.

Второй метод — метод постоянной нагрузки — конструктивно значительно проще, так как позволяет скорость перемещения или вращения измерить обычным секундомером или записать на диаграммной ленте. В табл. 4 показано, что ротационные вискозиметры могут работать по первому и второму методам.

При третьем методе измерения постоянная сила нагружения обусловлена неизменной массой подвижной части прибора, продолжительность измерения обычно постоянна (180—300 с) и принимается несколько больше, чем период релаксации. В эксперименте измеряют глубину погружения при уменьшающейся скорости, которая в пределе достигает нуля.

Четвертый метод позволяет по площади диаграммы определить энергию деформирования, а ордината на диаграмме показывает усилие. Кроме того, в приборах этой группы энергию можно вычислить по мощности, если они снабжены самопишущим или показывающим ваттметром либо счетчиком. Для расчета многих производственных процессов (перемешивания, измельчения, транспортирования и пр.) энергия — основной показатель. Поэтому результаты, полученные на приборах, моделирующих натурные процессы, могут оказаться очень полезными для выполнения ряда инженерных и экономических расчетов.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГОВЫХ СВОЙСТВ

Сдвиговые свойства проявляются при касательном смещении слоев продукта, который может представлять собой жидко- или твердообразную систему, а также «твердое» тело, т. е. неразрушенную среду (целые ткани мяса, кость, сыр, твердый жир и пр.). Приборы для измерения величин свойств последних систем имеют определенную специфику.

Приборы для измерения сдвиговых свойств течущих систем по принципу действия делят на следующие группы: ротационные; капиллярные (под термином капилляр подразумевают прямые трубки диаметром в доли до десятков миллиметров); пенетрометры, содержащие конический, сферический, пластинчатый, трубчатый или какой-либо другой элемент, который внедряется в исследуемую среду; приборы с плоскопараллельным смещением пластин, между которыми находится исследуемый продукт, и др.

Основной предпосылкой научной обоснованности объективности полученных данных на ротационных капиллярных вискозиметрах является отсутствие турбулентности потока, т. е. режим движения должен быть ламинарным или структурным. Режим движения характеризуется критерием Рейнольдса (Re), который представляет собой безразмерное числовое значение, пропорциональное отношению кинетической энергии потока $m\omega^2/2$ (где m — масса, ω — среднеобъемная скорость) к работе сил вязкого сопротивления Pl (где P — сила сопротивления, l — длина или путь ее действия):

$$Re \cong \frac{m\omega^2}{\eta F \frac{\omega}{l} l} = \frac{\rho l^3 \omega^2}{\eta l^2 \omega} = \frac{\rho l \omega}{\eta} = \frac{\rho d \omega}{\eta}, \quad (II-1)$$

где l — характерный линейный размер (для трубы — диаметр d), м;

ρ — плотность жидкости, кг/м³;

η — вязкость жидкости, Па·с.

Для коаксиального зазора ротационного вискозиметра [13], имея в виду, что линейная скорость и угловая связаны соотношением $\omega = \Omega R$, критерий Рейнольдса приобретает вид

$$Re = \frac{\rho \Omega R^2}{\eta} = \frac{\Omega R^2}{\nu}, \quad (II-2)$$

где Ω и R — угловая скорость (с⁻¹) и радиус вращающегося цилиндра (м); если вращается внутренний цилиндр, то они имеют индекс «в», наружный — индекс «и».

$\nu = \frac{\eta}{\rho}$ — кинематическая вязкость, м²/с.

При работе на капиллярных вискозиметрах критерий Рейнольдса не должен превышать 150 [154]; при

движении шарика в жидкости ламинарный режим наблюдается при числовых значениях критерия Рейнольдса менее 0,2; ориентировочно при работе на ротационных вискозиметрах [13], если вращается внутренний цилиндр, комплекс $\Omega_{в}/\nu$ не должен превышать $70 \times 10^4 \text{ м}^{-2}$, если наружный, то комплекс $\Omega_{н}/\nu$ не должен превышать значения $\frac{0,1900}{R_{н}(R_{н}-R_{в})}$.

Подробно многочисленные эффекты, связанные с вискозиметрией ньютоновских жидкостей, рассмотрены в фундаментальной монографии Г. Барра [11]*.

Ротационные вискозиметры

Принципиальные схемы ротационных вискозиметров показаны на рис. 6. Они могут иметь одну геометрическую форму: коаксиальные цилиндры (рис. 6, а), сферы или полусферы (рис. 6, б), два конуса (рис. 6, в), две плоскопараллельные пластины (рис. 6, г), два плоских кольца (рис. 6, д) или два конических кольца (рис. 6, е). Часто рабочий зазор или рабочий орган может быть комбинированным, т. е. состоять из нескольких различных поверхностей: цилиндр—диск (рис. 6, е), цилиндр—полусфера (рис. 6, ж), конус—диск (рис. 6, з), цилиндр—конус (рис. 6, и), цилиндр—конус—диск (рис. 6, л) и пр. Между рабочими поверхностями находится исследуемый продукт, сила сопротивления внутри которого при вращении одной из поверхностей измеряется. Момент сопротивления можно измерять двумя способами: на вращающейся поверхности, тогда вторую поверхность нужно закрепить жестко; вращая одну поверхность, другую соединить с динамометром.

* В монографии упомянуты исследования аномально-вязких жидкостей, в частности приведены степенные уравнения течения Де-Вале (1923), Фарроу и Лоува (1923), В. Оствальда (1925), Гершеля и Балкли (1926) и др. Естественно, что в настоящее время теория и эксперимент в области аномальных систем кардинально отличаются от описанных Г. Барром. Одновременно следует обратить внимание читателя на монографию Э. Гатчека «Вязкость жидкостей» (1935). Обе эти монографии в основном не утратили своей значимости до последнего времени и окажутся полезными как для практиков, так и для исследователей.

заклинивание при измерениях и иметь равномерно и меняющийся градиент скорости.

Для полусфероцилиндрических вискозиметров типа РВ-8 с уменьшением зазора будет уменьшаться ошибка от возмущений потока вязкой жидкости, создаваемых стыком цилиндрической и сферической частей ротора прибора [13]. Например, для тонкоизмельченного мясного фарша оптимальное отношение наружного радиуса ротора R_v к внутреннему радиусу стакана R_c лежит в области 0,85—0,90 при радиусе ротора 0,016—0,018 м [33].

При разработке теории прибора исходная модель, выбранная для вывода интегральных расчетных формул, должна возможно более точно описывать существенные сдвиговые свойства тела в данной области напряжений и градиентов скорости. Следует отметить, что в паспортах к приборам РВ-8 и РВ-4 для расчета сдвиговых свойств приведены формулы, полученные исходя из модели Бингама. Эта модель, как показывает Ю. А. Мачихин [111], применима к пралиновым кондитерским массам. Она же была использована для обобщений экспериментальных данных по мясным фаршам [41, 152], хотя они следуют этой модели довольно приближенно. Во всех случаях для обобщений экспериментальных данных можно рекомендовать в первом приближении уравнения, полученные из закона Ньютона, где вязкость может иметь смысл либо эффективной, либо ньютоновской.

Измерительный ротор соприкасается с продуктом не только боковой поверхностью, но и торцом. Сопротивление на торце можно учитывать следующим образом: измерения проводят при двух-трех высотах продукта в рабочем зазоре, экстраполяция линии на графике: крутящий момент — высота, до пересечения с осью абсцисс дает в отрицательной области отрезок эквивалентной длины $h_{\text{экв}}$, который нужно прибавить к общей высоте продукта. Эквивалентная длина показывает высоту цилиндрической части ротора, на которой сопротивления будут такие же, как на торце. У вискозиметра «Реотест» плоский торец заменен вогнутой «воздушной подушкой», что оправдало себя при работе вязкими жидкостями (см. рис. 6, а). Для пластично-вязких систем такая форма торца неприемлема. Пр

исследовании таких систем даже в зоне плоского торца возникают значительные нормальные напряжения, которые обуславливают выход продукта из зазора и наматывание его на внутренний цилиндр [33]. Сжатый воздух в воздушной подушке резко усиливает эти эффекты. Для пластично-вязких систем, на наш взгляд, целесообразно применять вискозиметры с сочетанием измерительных поверхностей различной формы, например коническоцилиндрические или полусфероцилиндрические. Ротационные вискозиметры типа РВ системы Воларовича имеют сферический торец в сочетании с цилиндрической поверхностью (см. рис. 6, ж).

В качестве типичного примера рассмотрим течение продукта в коаксиальном зазоре цилиндрического вискозиметра, который имеет неподвижный цилиндр (стакан) радиусом R_H и ротор радиусом R_B , вращающийся с угловой скоростью Ω (в с^{-1}) (см. рис. 6, а). Текущее значение угловой скорости ω изменяется от $\omega = \Omega$ при R_B до $\omega = 0$ при R_H . Аналогично меняется окружная скорость: от $\omega = \Omega R_B$ до $\omega = 0$.

При изучении деформационного поведения пластично-вязких тел в коаксиальном зазоре при достаточной его ширине можно обнаружить три деформируемых слоя (в ряде случаев, как показали Н. В. Тябин и Г. В. Виноградов, число слоев может быть более трех). Первый слой — у вращающегося цилиндра, имеет наибольший градиент скорости. Во втором слое он постепенно уменьшается, а в третьем — практически равен нулю; здесь возможны деформации типа ползучести. У вязких и высоковязких жидкостей, а у пластично-вязких тел при узком зазоре градиентный слой распространяется на всю ширину кольца.

Толщина градиентного слоя определяет величину градиента скорости. Если обозначить толщину градиентного слоя Δr , причем в общем случае $\Delta r \leq R_H - R_B$, то, зная окружную скорость боковой поверхности ротора ω (в м/с)

$$\omega = \Omega R_B = 2\pi N R_B, \quad (\text{II}-3)$$

где N — частота вращения ротора, об/с,

градиент скорости ϵ (1/с) приближенно можно представить в виде линейной зависимости (по Д. С. Великовскому [88] — средний градиент):

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\omega}}{R_H - R_B} = \frac{\dot{\omega}}{\Delta r}, \quad (\text{II—})$$

из которой видно, что толщина слоя определяет величину градиента. Поэтому в расчетных формулах по наружным радиусом R_H следовало бы понимать не геометрический радиус стакана, а радиус градиентного слоя, т. е. $R'_H = R_B + \Delta r$. Однако достаточно точно отделить величину Δr чрезвычайно сложно, в связи с чем названный метод расчета (по R'_H) не получил распространения.

Истинный градиент скорости любого слоя на расстоянии r от оси вращения будет

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\omega}{dr} = - \frac{d(\omega r)}{dr} = - \left(r \frac{d\omega}{dr} + \omega \right) = - r \frac{d\omega}{dr}, \quad (\text{II—})$$

где знак «минус» показывает, что скорость при увеличении радиуса убывает.

Напряжение сдвига в коаксиальном зазоре возникает в результате относительного смещения слоев; ω характеризует вращение всего продукта как целого, поэтому в возникновении касательных напряжений не участвует и может быть опущена.

После разделения переменных и интегрирования выражения (II—5) в пределах от Ω до 0 от R_B до R_H с учетом уравнения (II—3) получим логарифмический закон для вычисления градиента скорости:

$$\dot{\epsilon} = \Omega/2,3 \lg \frac{R_H}{R_B} = 2\pi N/2,3 \lg \frac{R_H}{R_B}. \quad (\text{II—})$$

Сравнивая выражения (II—4) и (II—6) с учетом уравнения (II—3), можно заметить, что градиент скорости определяется окружной скоростью вращения ротора, т. е.

$$\dot{\epsilon} = a\omega, \quad (\text{II—})$$

где a — коэффициент, вычисляемый при различных способах расчета градиента скорости, м^{-1} (его значение приведено в табл. 5).

Для практики вискозиметрических исследований существенный интерес представляет рассмотрение теории ротационного вискозиметра для модели степенной жидкости. Для элементарного слоя, расположенного на расстоянии r от оси вращения внутреннего цилиндра

Вид формулы для расчета градиента скорости и название системы	Номер формулы	Значение коэффициента a , 1/м
Средний градиент	(II-4)	$1/\Delta R$, где $\Delta r = R_H - R_B$
Логарифмический градиент	(II-6)	$1/R_B \cdot 2,3 \lg (R_H/R_B)$
Градиент для ньютоновских жидкостей (индекс течения 1)	(II-136)	$2/R_B [1 - (R_B/R_H)^2]$
Градиент для «степенной» жидкости (псевдопластичная или дилатентная)	(II-30)	$2/n R_B [1 - (R_B/R_H)^{2/n}]$
То же по [31]	—	$2/\{ (n R_B [r/R_B]^{2/n} - (r/R + \Delta R)^{2/n}) \}$

($R_B \leq r \leq R_H$), условие равновесия запишется в следующем виде:

а) момент всех сил сопротивления, равный внешнему моменту M , представляет собой произведение поверхности слоя ($2\pi lr$), напряжения сдвига (θ) и радиуса слоя (r):

$$M = 2\pi lr\theta r, \text{ откуда } \theta = M/2\pi lr^2; \quad (\text{II-8})$$

б) напряжение, обусловленное проявлением сил вязкого сопротивления для «степенной» жидкости по уравнениям (I-31) и (I-33) с учетом (II-5), будет иметь значение

$$\theta = B_1^* \left(-r \frac{d\omega}{dr} \right)^n. \quad (\text{II-9})$$

Приравняв правые части уравнений (II-8) и (II-9) и интегрируя для граничных условий при $r = R_B$ $\omega = \Omega$ и $r = R_H$ $\omega = 0$, получим:

$$(M/2\pi l B_1^*)^{1/n} = 2\Omega/n (R_B^{-2/n} - R_H^{-2/n}). \quad (\text{II-10})$$

Из последней формулы с учетом условий равновесия определяют значения угловой скорости для любого слоя радиуса r :

$$\omega = \Omega \left(\frac{R_B}{r} \right)^{2/n} \frac{\left[1 - \left(\frac{r}{R_H} \right)^{2/n} \right]}{\left[1 - \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^{2/n} \right]}, \quad (\text{II-11})$$

которое удовлетворяет названным выше граничным условиям.

Уравнения (II—10) с учетом условий равновесия или (II—5) с учетом (II—11) дают формулу для расчета градиента скорости любого слоя

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\omega}{dr} = \frac{2\Omega}{n [1 - (R_B/R_H)^{2/n}]} \left(\frac{R_B}{r} \right)^{2/n}. \quad (\text{II—12})$$

Максимальные значения градиента скорости будут у поверхности вращающегося ротора, т. е. при $r = R_B$.

После несложных преобразований уравнение (II—10) приводится к степенной зависимости в consistentных переменных

$$\frac{M}{2\pi l R_B^2} = B_1^* \left\{ \frac{2\Omega}{n [1 - (R_B/R_H)^{2/n}]} \right\}^n, \quad (\text{II—13})$$

где левый член — consistentная переменная «напряжение сдвига», правый член в фигурных скобках — consistentная переменная: «градиент скорости»; ее можно представить в виде функции окружной скорости по формуле (II—7) с учетом уравнения (II—3) (см. табл. 5).

Если коэффициенту B_1^* придать вполне определенный физический смысл — эффективной вязкости B_0^* (в Па·с) при единичном значении градиента скорости, т. е. при $\varepsilon_1 = 1 \text{ с}^{-1}$, то

$$\theta = \eta_{\text{эф}} \dot{\varepsilon} = B_0^* (\dot{\varepsilon}/\varepsilon_1)^{n-1} \dot{\varepsilon} = B_0^* \varepsilon_1^{1-n} \dot{\varepsilon}^n; \quad B_1^* = B_0^* \varepsilon_1^{1-n},$$

причем числовые значения коэффициентов B_1^* и B_0^* одинаковы.

В этом случае формула (II—13) приводится к виду

$$\frac{M}{2\pi l R_B^2} = B_0^* \varepsilon_1^{1-n} \left\{ \frac{2\Omega}{n \left[1 - \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^{2/n} \right]} \right\}^n, \quad (\text{II—13a})$$

где $\varepsilon_1 = \frac{2\Omega_1}{n [1 - (R_B/R_H)^{2/n}]} = 1 \text{ с}^{-1}$ — единичное значение градиента скорости;

$\Omega_1 = 2\pi N_1$ — соответствующее ему значение угловой скорости или частоты вращения ротора.

Градиент скорости определяется по зависимости

$$\dot{\varepsilon} = \frac{4\pi N}{n [1 - (R_B/R_H)^{2/n}]}. \quad (\text{II-136})$$

Решение для ротационного вискозиметра в самом общем виде, т. е. не определяя заранее математической модели тела, получают следующим образом: из зависимости (II-5) находят

$$\frac{d\omega}{\dot{\varepsilon}(\theta)} = -d(\ln r); \quad (\text{II-14})$$

из условий равновесия, выражаемых уравнением (II-8) путем дифференцирования и несложных преобразований определяют

$$\frac{d\theta}{dr} = -2 \frac{M}{2\pi l r^3}, \quad \text{откуда} \quad \frac{d\theta}{2\theta} = -d(\ln r), \quad (\text{II-15})$$

приравнивая левые части, получают

$$d\omega = \frac{1}{2} \frac{\dot{\varepsilon}(\theta)}{\theta} d\theta.$$

Интегрирование в пределах от Ω до нуля и от напряжения на роторе θ_B до напряжения на цилиндре θ_H (после изменения знака в правой и левой частях) даст теоретическую формулу в самом общем виде:

$$\Omega = \frac{1}{2} \int_{\theta_H}^{\theta_B} \frac{\dot{\varepsilon}(\theta)}{\theta} d\theta, \quad (\text{II-16})$$

где $\dot{\varepsilon}(\theta)$ — функция градиента скорости от напряжения сдвига [см. уравнения (I-31) и (I-32)].

Интегрирование уравнения течения степенной жидкости (I-31), которое представлено в виде

$$\dot{\varepsilon}(\theta) = \left(\frac{\theta}{B_1^*} \right)^{1/n}, \quad (\text{II-17})$$

или

$$\dot{\varepsilon}(\theta) = \left(\frac{\theta}{B_0^* \dot{\varepsilon}_1^{1-n}} \right)^{1/n} \quad (\text{II-17a})$$

с учетом условий равновесия, выраженных уравнением (II-8), позволяет получить зависимость (II-13). Не-

достатком этого метода является то, что выпадают некоторые существенные характеристики течения, например зависимости (II—11) и (II—12).

В литературе [13, 155] приводятся подобные выводы, однако конечные формулы имеют вид, недостаточно удобный для окончательных расчетов и обработки экспериментальных данных. Приведенные зависимости например уравнение (II—13), могут быть использованы для обобщения вискозиметрических исследований систем, описываемых моделью Гершеля — Балкли [см. уравнение (I—33)]. Тогда предельное напряжение сдвига (θ_0) характеризуется началом вращения, т.е. моментом внешних сил (M_0); в уравнение (II—13) вместо момента M войдет момент $M' = M - M_0$. При этом сдвиг должен распространяться на всю ширину коаксиального зазора. В случае течения вязкой ньютоновской жидкости (индекс течения $n=1$) уравнение (II—13) принимает форму уравнения Маргулиса (см. табл. 5) [154].

Рассмотрим величины крутящих моментов, возникающих на измерительной поверхности ротора с радиусом R_B [13, 154]:

цилиндрическая поверхность (см. рис. 6, а)

$$M_{ц} = 2\pi R_B^2 h \theta; \quad (II-18)$$

полусферическая поверхность (см. рис. 6, б)

$$M_{пс} = (\pi^2 R_B^3 / 2) \theta; \quad (II-19)$$

плоская поверхность — диск (см. рис. 6, в)

$$M_{пл} = \frac{2}{3} \pi R_B^3 \theta; \quad (II-20)$$

поверхности конус — конус и конус — плоскость (рис. 6, в и 6, з)

$$M_{к} = \frac{2\pi R_B^3}{3 \sin \alpha} \theta, \quad (II-21)$$

где h — высота контакта цилиндрической части ротора с продуктом, м;
 θ — напряжение сдвига на поверхности ротора, Па;
 α — половина угла при вершине вращающегося конуса (см. рис. 6).

Из приведенных уравнений при известном моменте легко определить консистентную переменную — напряжение сдвига θ .

Если форма измерительной поверхности составная, то общий крутящий момент M , измеряемый на валу ротора, равен сумме момента на обеих поверхностях: плоскоцилиндрическая (см. рис. 6, *e*)

$$M = 2\pi R_B^2 \theta (h + R_B/3); \quad (\text{II—22})$$

полусфероцилиндрическая (см. рис. 6, *ж*)

$$M = 2\pi R_B^2 \theta (h + \pi R_B/4); \quad (\text{II—23})$$

коницилиндрическая (см. рис. 6, *и*)

$$M = 2\pi R_B^2 \theta (h + R_c^3/R_B^2 \cdot 3 \sin \alpha_0); \quad (\text{II—24})$$

коницилиндрическая (см. рис. 6, *л*)

$$M = 2\pi R_B^2 \theta \left(h + \frac{R_B}{3 \sin \alpha} \right), \quad (\text{II—25})$$

где R_c — среднегеометрический радиус между ротором и неподвижным стаканом;

$$R_c^2 = \frac{2R_B^2 R_H^2}{R_B^2 + R_H^2};$$

α_0 — угол, лежащий между малоотличающимися углами α и β и вычисляемый по среднегеометрическому радиусу R_c .

По этим формулам эквивалентная высота для плоскоцилиндрического ротора составляет $h_{\text{экв}} = \frac{R_B}{3}$, для

полусфероцилиндрического $\frac{\pi R_B}{4}$, для коницилиндриче-

ского $\frac{R_c^3}{R_B^2 \cdot 3 \sin \alpha_0}$ и $\frac{R_B}{3 \sin \alpha}$. Тогда комбинированные

измерительные органы можно считать цилиндрическими, но высоту продукта в зазоре определять по приведенной высоте $h_{\text{изр}} = h + h_{\text{экв}}$, общий крутящий момент — по углу закручивания торзiona (с предварительной тарировкой), либо, если привод ротора реализуется от падающих грузов, по моменту на шкиве, т.е. $M = m R_{\text{шк}} g$ (где m — общая масса грузов, за вычетом массы (точнее силы) на трение в подшипниках, $R_{\text{шк}}$ — радиус шкива).

Формулами (II—18)—(II—25) можно пользоваться для расчета предельного напряжения сдвига θ_0 (в Па) для простых поверхностей и составных:

$$\theta_0 = \frac{M_0}{2\pi R_B^2 h_{\text{пр}}}, \quad (\text{II—26})$$

где M_0 — момент, при котором начинается вращение ротора.

M_0 обычно определяют на пересечении кривой течения с соответствующей координатной осью методом экстраполяции до нулевого значения градиента скорости.

Крутящий момент сопротивления [13, 154], возникающий при относительном смещении слоев ньютоновской жидкости с вязкостью η или неньютоновской жидкости с эффективной вязкостью $\eta_{\text{эф}}$ между двумя коаксиальными цилиндрами, определяют по формуле Маргулиса

$$M_{\text{ц}} = \eta 2\pi R_B^2 h \frac{2\Omega}{1 - (R_B/R_H)^2}. \quad (\text{II—27})$$

Момент между двумя полусферами вычисляют по формуле А. Д. Сокольского

$$M_{\text{пс}} = \eta \frac{\pi^2 R_B^3}{2} \cdot \frac{8\Omega}{\pi [1 - (R_B/R_H)^2]}. \quad (\text{II—28})$$

Для степенной жидкости (коаксиальные полусферы) автором совместно с доцентом В. М. Щукиным аналитически получено уравнение следующего вида:

$$M_{\text{пс}} = B_{\text{пс}}^* \frac{\pi^2 R_B^3}{2} \cdot \frac{8\Gamma^2 \left[\frac{(n+3)}{2} \right]}{\pi \Gamma(n+3)} \left\{ \frac{12\pi N}{n [1 - (R_B/R_H)^{3/n}]} \right\}^n, \quad (\text{II—28a})$$

где $B_{\text{пс}}^*$ — коэффициент, характеризующий эффективную вязкость при единичном значении градиента скорости, по аналогии с уравнением (II—13a) ему может быть придан смысл эффективной вязкости при единичном значении градиента скорости;

$\Gamma\left(\frac{n+3}{2}\right)$ и $\Gamma(n+3)$ — гамма-функция от индекса течения [123

186], ее значения приведены в табл. 6 по справочным данным [186].

Таблица 6

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,5	0,8862	2,5	1,3293	3,5	3,323
1,6	0,8935	2,6	1,4296	3,6	3,717
1,7	0,9086	2,7	2,5447	3,7	4,171
1,8	0,9314	2,8	1,6765	3,8	4,694
1,9	0,9618	2,9	1,8274	3,9	5,299
2,0	1,0000	3,0	2,0000	4,0	6,000
2,1	1,0465	3,1	2,198	4,1	6,813
2,2	1,1018	3,2	2,424	4,2	7,757
2,3	1,1667	3,3	2,683	4,3	8,855
2,4	1,2422	3,4	2,981	4,4	10,136

Для ньютоновской жидкости, имеющей индекс течения, равный единице, простое преобразование уравнения приводит к формуле Сокольского (II—28). Напряжение сдвига в формуле (II—28a) вычисляют по зависимости (II—18), а член в фигурных скобках и корень перед ним представляют собой градиент скорости сдвига:

$$\dot{\epsilon} = \left[\frac{8\Gamma^2 \left(\frac{n+3}{2} \right)}{\pi\Gamma(n+3)} \right]^{1/n} \frac{12\pi N}{n[1 - (R_B/R_H)^{3/n}]} \quad (\text{II—286})$$

Градиент скорости для сферы находят по этой же формуле. Для определения момента вращения сферы равную часть выражений (II—28) и (II—28a) удваивают. Аналогично написание моментов для двух конических поверхностей (рис. 6, в, з), где половина угла конуса неподвижной поверхности составляет величину β :

$$M_K = \eta \frac{2\pi R_B^3}{3 \sin \alpha} \cdot \frac{2\Omega}{\sin^2 \alpha I(\alpha, \beta)}, \quad (\text{II—29})$$

где $I(\alpha, \beta)$ — функция углов; для двух конических поверхностей:

$$I(\alpha, \beta) = \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} - \frac{\cos \beta}{\sin^2 \beta} + \ln \left(\frac{\operatorname{tg} \beta/2}{\operatorname{tg} \alpha/2} \right), \quad (\text{II—29a})$$

для поверхностей конус — плоскость, т. е. при $\beta = 90^\circ$, эта функция примет вид

$$I(\alpha, 90^\circ) = \frac{\cos \alpha}{\sin^3 \alpha} - \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right). \quad (\text{II—29})$$

Для комбинированных поверхностей с целью вычисления вязкости соответствующие моменты, действующие на простые поверхности, складываются по аналогии с уравнениями (II—22)—(II—25). Эти действия не представляют принципиальной трудности и поэтому вследствие малого объема книги не рассматриваются.

Сопоставим последние уравнения с приведенными ранее (II—18)—(II—21), в которых напряжение сдвига заменено произведением вязкости на градиент скорости, т. е. $\theta = \eta \dot{\epsilon}$. В таком случае при известных значениях напряжений сдвига градиенты скорости можно представить в виде следующих зависимостей:

для коаксиальных цилиндров

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{4\pi N}{1 - (R_B/R_H)^2}; \quad (\text{II—30})$$

для коаксиальных сфер или полусфер

$$\dot{\epsilon}_{nc} = \frac{16N}{1 - (R_B/R_H)^3}; \quad (\text{II—31})$$

для конических поверхностей

$$\dot{\epsilon}_k = \frac{4\pi N}{\sin^2 \alpha I(\alpha, \beta)}, \quad (\text{II—32})$$

где $\Omega = 2\pi N$ — угловая скорость, рад/с;

N — частота вращения ротора, об/с;

$I(\alpha, \beta)$ — вычисляется по зависимости (II—29а) для двух конических поверхностей и по зависимости (II—29б) для поверхностей конус — плоскость.

Напряжения сдвига по уравнениям (II—18)—(II—21) и градиенты скорости по уравнениям (II—30)—(II—32) получили название consistentных переменных. Зависимости эффективной вязкости от градиента скорости для кривых течения двух типов (см. рис. 2, 3, 4) представляют собой монотонно изменяющуюся функцию, т. е. при фиксированном значении градиента скорости существует одно значение вязкости. Следовательно, для составных поверхностей ротора необходимо в зазоре иметь одинаковую величину градиента скорости. Для степенной жидкости и распространенной комбинированной поверхности ротора — по-

лусфероцилиндрической, используемой, например, в ротационных вискозиметрах проф. М. П. Воларовича, представляет интерес совместное решение уравнений (II—136) и (II—286) с целью определения соотношения радиусов, удовлетворяющих условию одинакового значения градиента скорости. После упрощений расчетное уравнение приобретает вид:

$$\left[\frac{8\Gamma^2 \left(\frac{n+3}{2} \right)}{\pi\Gamma(n+3)} \right]^{1/n} \frac{3}{1-x^{3/n}} = \frac{1}{1-x^{2/n}}, \quad (\text{II—33})$$

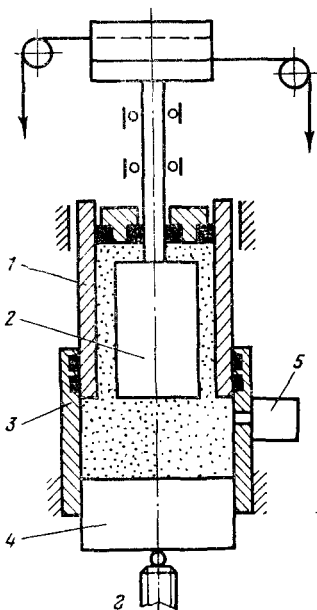
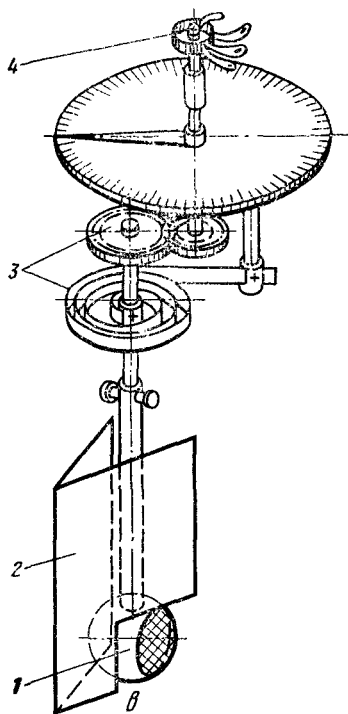
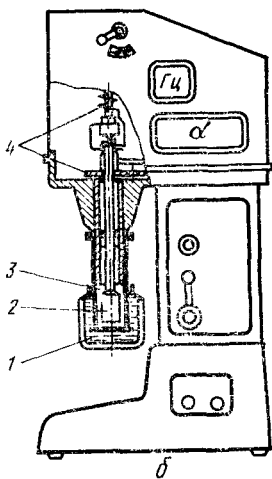
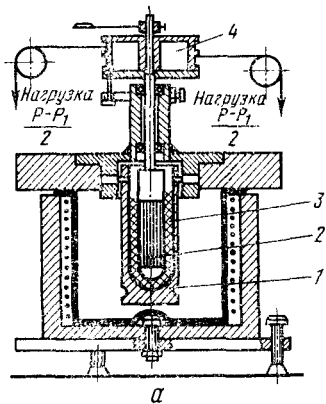
где $x = \frac{R_B}{R_H}$ — отношение радиусов.

При значениях индекса течения n : 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0, соответственно отношения радиусов имеют величины 0,949; 0,912; 0,865; 0,839; 0,795; 0,777; 0,735; 0,724; 0,683; 0,675. Частный случай при индексе течения, равном единице (ньютоновская жидкость), рассмотрен в литературе [154].

При точном или хотя бы приблизительном соблюдении названных соотношений значения эффективной вязкости будут постоянны по всей измерительной поверхности и возмущений при переходе от одной поверхности к другой не будет.

Таким образом, для вычисления градиента скорости получен ряд формул (см. табл. 5). Применение той или иной из них должно быть обосновано экспериментально с учетом вида математической модели, описывающей деформационное поведение продукта. Следует отметить, что при вычислении градиента скорости по различным уравнениям графические зависимости эффективной вязкости от градиента скорости могут дать семейство линий и различные значения коэффициентов k расчетным уравнениям.

Методика измерения сдвиговых свойств с помощью различных приборов принципиально не отличается, хотя конструктивные особенности приборов вызывают определенные ее модификации. Для исследования сдвиговых свойств мясных и молочных продуктов широкое распространение получили приборы, изображенные на рис. 7, 8 [154]. Приборы (рис. 7, а, б) имеют два концентрических цилиндра — внутренний и внешний, один



из которых может быть сменным для изменения величины зазора. В некоторых случаях рабочий орган помещают в «неограниченную» среду, например шаровой вискозиметр Бакунца (рис. 7, в) для мясного фарша [10]. Зазор между рабочими органами заполняется исследуемым материалом, и один из цилиндров приводят во вращение. Опыт сводится к определению деформации или скорости деформаций и силы (напряжения) сопротивления.

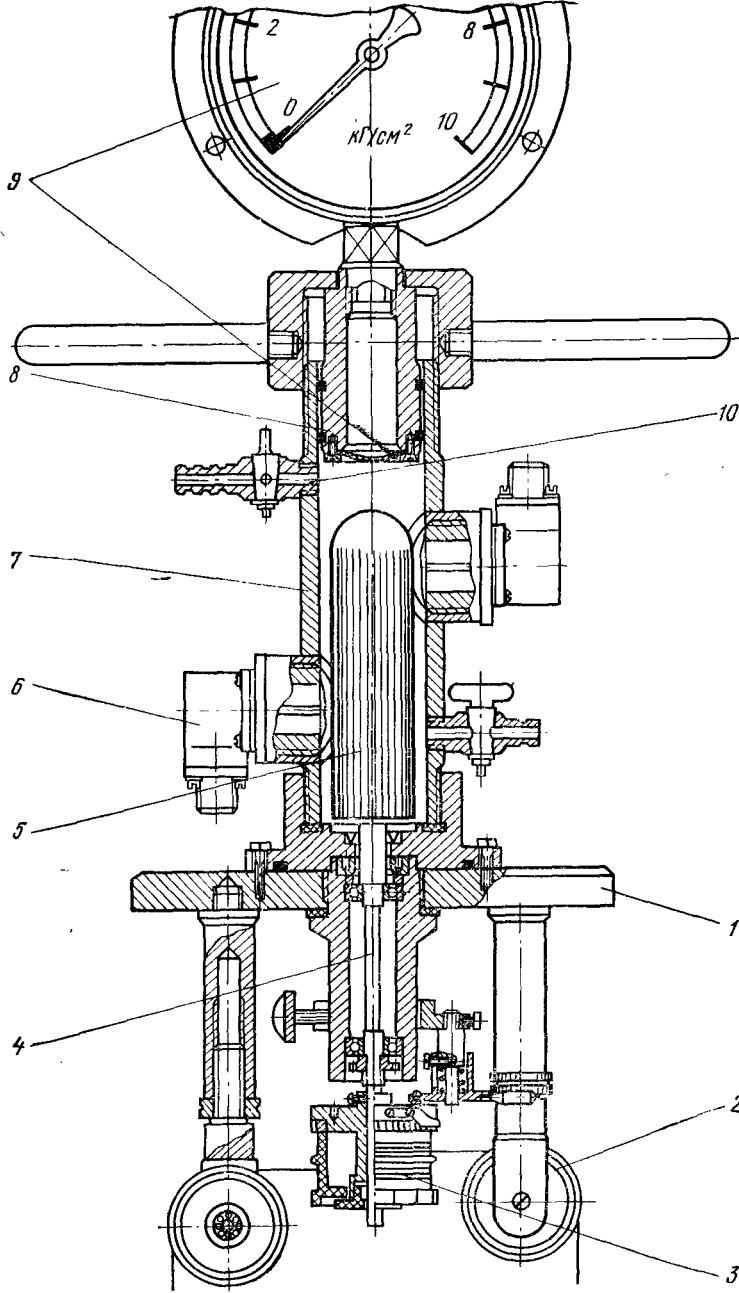
Эти вискозиметры различают по конструктивным особенностям и способу привода одного из цилиндров. Привод от падающих грузов осуществлен в вискозиметрах системы М. П. Воларовича (см. рис. 7, а); от электродвигателя с измерением напряжений упругой нитью (торзионом) — в приборе «Реотест» (рис. 7, б).

В последние годы повышается интерес к изучению реологических характеристик мясопродуктов при наличии вибрации. Такие работы проводит лаборатория реологии ВНИИМПа. Для подобных исследований Ю. А. Мачихин с сотрудниками [103] используют ротационный коаксиально-цилиндрический вибровискозиметр (рис. 7, з) с приводом ротора от падающих грузов (по аналогии с вискозиметром М. П. Воларовича). Особенностью этого вискозиметра является возможность создания избыточных давлений и вибраций наружного цилиндра, причем можно обеспечить либо вращательные, либо осевые его колебания. В этих приборах при малой толщине кольца между ротором и статором поле деформаций будет однородным.

На однородность поля наряду с величиной зазора влияет также величина предельного напряжения сдвига, так как деформации течения могут распространять-

Рис. 7. Принципиальные схемы приборов для измерения структурно-механических свойств:

а — вискозиметр Воларовича: 1 — стакан; 2 — ротор; 3 — продукт; 4 — барабан, приводимый во вращение от падающих грузов; б — вискозиметр типа «Реотест»: 1 — стакан; 2 — ротор; 3 — продукт; 4 — электромеханический привод с торзионом; в — вискозиметр Бакунца: 1 — сферическая измерительная поверхность; 2 — шток; 3 — механическая система для регистрации угла закручивания сферы; 4 — электрический датчик угла закручивания (переменное проволочное сопротивление); з — вибровискозиметр Мачихина и др.: 1 — наружный цилиндр, совершающий вращательные или осевые колебания; 2 — ротор с приводом во вращение от падающих грузов; 3 — камера для продукта; 4 — поршень с винтом для создания избыточного давления; 5 — датчик давления.



ся на всю толщину кольца или только на его часть. Ротационные приборы пригодны для комплексного исследования всех реологических свойств.

Результаты измерений при напряжениях, меньших предельного напряжения сдвига, могут содержать существенные ошибки — до $\pm 30\%$, а при исследовании на разных приборах отличаться в несколько раз и годиться лишь для качественной оценки того или иного технологического процесса. Структурно-механические свойства, измеренные при напряжениях, превышающих предельное, имеют ошибки до $\pm (5 \div 10\%)$ и пригодны как для качественной оценки технологического процесса, так и для расчета движения продуктов в рабочих органах машин и аппаратов. Поэтому таким измерениям следует отдать предпочтение. Реологические зависимости течения, кривые степени разрушения структуры и изменения эффективной вязкости при напряжениях, превышающих предельное напряжение сдвига, характеризуют состояние продукта при движении его в рабочих органах машин и аппаратов при лавинном разрушении структуры.

Для исследования структурно-механических свойств при повышенных давлениях в МТИММПе сконструирован на базе вискозиметра РВ-4 (рис. 8, позиции 1, 2, 3) новый (позиции 4—10), размеры которого соответствуют размерам вискозиметра РВ-8: диаметр ротора 32, внутренний диаметр стакана 38 мм. Новый вискозиметр отличается от вискозиметра РВ-4 следующим. Стакан (статор) неподвижен, вращается рифленый ротор 5, который выточен вместе с хвостовиком 4 из одной заготовки; отсутствие резьбового соединения ротора-хвостовика позволило свести максимальную величину биения на конце ротора до 0,01 мм. Давление в стакане создается за счет ввинчивания поршня 8, который снабжен упругой мембраной и манометром 9 для измерения давления, в рабочем зазоре давление измеряют тензометрическими датчиками 6. Вискозиметр смонтирован на подставке 1, ротор приводится во вращение от падающих грузов через блоки 2 и барабан 3. Краник 10 служит для сброса излишка продукта. Хвостовик и поршень имеют уплотнения, которые препятствуют изменению давления во время опыта. Для измерений при высоких числах оборотов прибор может подключаться к гидроприводу.

Влияние трения в подшипниках и уплотнениях учитывается при тарировке на разных давлениях и числах оборотов. В первом

Рис. 8. Ротационный вискозиметр для измерения реологических свойств при повышенном давлении:

1 — станция; 2 — шкивы; 3 — барабан; 4 — хвостовик ротора; 5 — ротор; 6 — тензолатчики давления; 7 — неподвижный стакан; 8 — поршень; 9 — мембрана с манометром; 10 — контрольный краник.

варианте в рабочий зазор вискозиметра заливают маловязкое масло велосит или трансформаторное (при 20°С вязкость 0,013 и 0,025 Па·с). Напряжение сдвига, обусловленное вязкостью масла, учитывают при построении тарировочных реограмм. По второму варианту вместо ротора с хвостовиком вставили хвостовик вискозиметра РВ-4 без ротора и также залили маслом. Возможная ошибка дальнейших измерений, обусловленная тарировкой, превосходит $\pm 0,5\%$. При построении рабочих реограмм для исследуемого продукта массу грузов (напряжение сдвига) уменьшили на соответствующую величину по тарировочной реограмме той же частоте вращения.

Рассмотрим основы методик измерения и вычисления реологических свойств для описанных выше приборов.

Методика измерения структурно-механических свойств для ротационных вискозиметров системы Виларовича [45] сводится к подготовке прибора, измерениям и разборке. Подготовка включает установку вискозиметра по уровню, определение трения в подшипниках, заполнение рабочего объема исследуемым материалом и его термостатирование. Во время измерения меняют вес грузов P или их массу m и для каждого груза определяют частоту вращения ротора N (в об/с). Минимальная продолжительность замера составляет 2—2,5 с, каждый опыт состоит из 30—40 замеров, проводимых несколько раз с постепенным увеличением и уменьшением массы грузов. Одновременно строят реограммы $N(m)$. Затем прибор разбирают для мытья и определения высоты продукта по оставленным им следам на роторе. После этого определяют константу опыта. У «Реотеста» высота продукта всегда постоянна, во время опыта меняют не крутящий момент, частоту вращения ротора. Прибор дает показание напряжения сдвига θ (в Па) на внутреннем цилиндре в единицах измерительной шкалы (α):

$$\theta = \alpha z, \quad (\text{II}-3)$$

где z — константа цилиндра, Па на ед. шкалы (табл. 7).

Для проверки динамометра его следует систематически тарировать. В качестве тарировочного приспособления можно использовать верхнюю крышку вискозиметра РВ-8 с двумя блоками и вывернутым измерительным инструментом. На ротор наворачивается нить, которая перекинута через блоки; к концам нити подвешены чашки, на них устанавливают грузы разного

Таблица 7

Измерительный цилиндр	Соотношения радиусов цилиндров	Константы цилиндров, Па/ед. шкалы		Пределы измерения градиента скорости
		область I	область II	
S_1	0,98	1,19	5,92	1,5—1310
S_2	0,94	1,23	6,16	0,5—437
S_3	0,81	1,69	8,45	1/6—146
H	0,81	5,89	29,29	1/6—146

Примечание. Константы цилиндров для приборов различных выпусков неодинаковы.

массы. Показания шкалы прибора снимают при крутящих моментах в статическом и динамическом состоянии, т.е. при наматывании нити на ротор. (Обычно статическая и динамическая тарировки дают одинаковые показания.) Тарировка позволит представить и вычислить вязкость по величинам консистентных переменных, а также построить кривую течения (реограмму) в виде функции: градиент скорости — напряжение сдвига (крутящий момент).

Методика расчета реологических характеристик имеет специфические особенности для каждой из двух основных областей состояния структуры продукта.

В области неразрушенной структуры определяют модули упругости, наибольшую вязкость и характер развития деформаций. Измерения начинают после тиксотропного восстановления структуры. Величины деформаций отсчитывают по отклонению стрелки с помощью микроскопа или специальной лупы. Опыт проводят при небольших сдвигающих усилиях, меньших, чем предельное напряжение сдвига, с интервалом записи деформаций 10—20 с.

При переходе к области лавинного разрушения структуры определяют статическое и динамическое предельные напряжения сдвига, пластическую вязкость и зависимость эффективной вязкости от градиента скорости (скорости) или напряжения сдвига, пользуясь реограммами. Обсчет проводят по равновесной кривой, проходящей около всех точек. Вращение ротора вызы-

вает появление внутренних напряжений в продукте, который находится между ротором и стаканом. Эти касательные напряжения пропорциональны сдвигающим усилиям, поэтому графическую и математическую обработку опытов можно проводить в consistentных переменных $\varepsilon(\theta)$ по приведенным выше уравнениям или пользуясь первичными зависимостями $N(m)$, $N(M)$, $N(P)$, полученными непосредственно из опыта.

Модули упругости при сдвиге G (в Па) определяют по закону Гука и графическим зависимостям относительной деформации от времени действия постоянного напряжения:

$$\theta = \varepsilon G$$

или

$$G = \frac{l}{\varepsilon/\theta}, \quad (\text{II—35})$$

где θ — напряжение сдвига, Па;
 ε — относительная деформация продукта;

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\Delta R} \cdot \frac{R_B}{l};$$

δ — отклонение стрелки прибора, м;
 $\Delta R = R_H - R_B$ — толщина слоя продукта между стаканом и ротором, м;

R_B, R_H — радиусы ротора и стакана соответственно;
 l — длина стрелки, м;

ε/θ — относительная деформация, приведенная к единице напряжения сдвига, 1/Па.

Наибольшую эффективную вязкость η'_0 (в Па·с), соответствующую началу пластично-вязкого течения, находят по уравнению Ньютона:

$$\eta'_0 = \frac{\theta}{\Delta\varepsilon/\Delta\tau},$$

или

$$\eta'_0 = \frac{\Delta\tau}{\Delta\varepsilon/\theta}, \quad (\text{II—36})$$

где $\Delta\tau$ — интервал времени, с;

$\Delta\varepsilon/\Delta\tau$ — скорость деформации для прямолинейного участка кривой или аппроксимированного к прямой криволинейного участка с небольшой выпуклостью.

Расчет ньютоновской, или эффективной, вязкости $\eta_{\text{эф}}$ (в Па·с) для любого напряжения можно проводить

по формуле (II—36), но при большом количестве экспериментов удобнее пользоваться зависимостью, предложенной М. П. Воларовичем:

$$\eta_{\text{эф}} = K \frac{m}{N}, \quad (\text{II—37})$$

где K — постоянная прибора;

N — частота вращения ротора вискозиметра, с^{-1} ;

m — масса вращающих ротор грузов, кг (за вычетом величины, компенсирующей трение в подшипниках).

Кроме перечисленных реологических свойств твердообразные системы характеризуются пластической вязкостью и предельным напряжением сдвига. Эти величины рассчитывают по интегральным реологическим зависимостям для разрушенных и неразрушенных структур. Следует особо подчеркнуть, что в области напряжений, превышающих предельное напряжение сдвига, в зависимости от математической модели, характеризующей тело, могут существовать различные реологические константы. В настоящее время наиболее подробно разработаны методы расчета реологических характеристик продуктов, деформационное поведение которых описывается моделью Шведова — Бингама. Ниже приведены основные расчетные зависимости для вычисления реологических характеристик по вискозиметрическим данным, полученным на вискозиметре РВ-8. Эти зависимости можно легко видоизменить применительно к вискозиметрам других типов.

При вычислении реологических свойств возможны два случая [45]:

1. Сдвиг распространяется на всю толщину кольца, когда масса сдвигающей нагрузки m_0 , при которой ротор начинает вращаться, больше массы $m' = K_1 \theta_0$, при которой сдвиг распространяется на всю толщину кольца. Тогда пластическую вязкость η (в Па·с) вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{1}{N} (Km - K_2 \theta_0), \quad (\text{II—38})$$

где $\theta_0 = K_0 m_0$ — предельное напряжение сдвига, Па;

K, K_0, K_1, K_2 — постоянные прибора, имеющие размерности соответственно: $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$; $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$; $\text{м} \cdot \text{с}^2$; 1;

m — масса грузов, вращающих ротор, кг.

2. Сдвиг не распространяется на всю толщину кольца, когда $m_0 \leq m'$. Тогда

$$\eta = \frac{\theta_0}{N} \cdot \frac{1}{4\pi} \left(\frac{m}{m_0} - 1 - \ln \frac{m}{m_0} \right),$$

или

$$\eta = \frac{\theta_0}{N} F \left(\frac{m}{m_0} \right), \quad (\text{II-3})$$

где величина $\frac{1}{4\pi} \left(\frac{m}{m_0} - 1 - \ln \frac{m}{m_0} \right)$ обозначена функциональной зависимостью $F \left(\frac{m}{m_0} \right)$; величина ее дана в табл. 8.

Таблица 8

$\frac{m}{m_0}$	$F \left(\frac{m}{m_0} \right)$	$\frac{m}{m_0}$	$F \left(\frac{m}{m_0} \right)$	$\frac{m}{m_0}$	$F \left(\frac{m}{m_0} \right)$
1,1	0,00037	2,1	0,02849	3,1	0,07706
1,2	0,00140	2,2	0,03276	3,2	0,08249
1,3	0,00299	2,3	0,03716	3,3	0,08801
1,4	0,00505	2,4	0,04174	3,4	0,09358
1,5	0,00752	2,5	0,04644	3,5	0,09923
1,6	0,01034	2,6	0,05139	3,6	0,10494
1,7	0,01348	2,7	0,05623	3,7	0,11072
1,8	0,01688	2,8	0,06131	3,8	0,11656
1,9	0,02054	2,9	0,06645	3,9	0,12245
2,0	0,02441	3,0	0,07173	4,0	0,12839

При вычислениях по формулам (II-38), (II-39) значения величин удобнее брать непосредственно по кривой $N(m)$, которую в процессе расчета корректируют. В окончательном виде кривая должна плавно проходить около всех опытных точек. При этом количество точек с каждой стороны кривой должно быть примерно одинаковым, или, что более точно, сумма положительных и отрицательных отклонений должна быть равна нулю (по среднеарифметическому методу).

Постоянные в приведенных уравнениях определяются по зависимостям, в которые входит поправка на сферический торец ротора:

$$K = \frac{R_{\text{шк}}g}{8\pi^2 \left(\frac{R_{\text{н}}^2 R_{\text{в}}^2}{R_{\text{н}}^2 - R_{\text{в}}^2} h + \frac{R_{\text{н}}^3 R_{\text{в}}^3}{R_{\text{н}}^3 - R_{\text{в}}^3} \right)}; \quad (II-40)$$

$$K_0 = \frac{R_{\text{шк}}g}{2\pi R_{\text{в}}^2 (h + \pi R_{\text{в}}/4)};$$

$$K_1 = 2\pi R_{\text{н}}^2 h / (R_{\text{шк}}g); \quad K_2 = 2,303 \lg (R_{\text{н}}/R_{\text{в}}) / 2\pi,$$

где $R_{\text{шк}}$ — радиус шкива ($R_{\text{шк}} = 0,02235$ м);
 g — ускорение силы тяжести ($g = 9,81$ м/с²);
 $R_{\text{н}}$ — внутренний радиус стакана ($R_{\text{н}} = 0,019$ м);
 $R_{\text{в}}$ — радиус ротора ($R_{\text{в}} = 0,01605$ м);
 h — глубина погружения ротора в продукт, м.

В скобках даны геометрические размеры вискозиметра РВ-8; для различных выпусков прибора возможны некоторые колебания размеров.

Эти константы можно легко вывести из полученных ранее уравнений (II-27) и (II-28) для крутящих моментов и уравнения (II-23) для напряжений сдвига. Для комбинированных измерительных поверхностей, например для полусфероцилиндрической, вязкостную константу K можно считать по цилиндрической поверхности:

$$K = \frac{R_{\text{шк}}g}{8\pi^2 \frac{R_{\text{в}}^2 R_{\text{н}}^2}{R_{\text{н}}^2 - R_{\text{в}}^2} h_{\text{цр}}}, \quad (II-41)$$

где приведенная длина $h_{\text{цр}} = h + h_{\text{эКВ}}$ и

$$h_{\text{эКВ}} = \frac{R_{\text{в}} + R_{\text{н}}}{\left(\frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{н}}}\right) + \left(\frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{в}}}\right) + 1} \approx \frac{R_{\text{в}} + R_{\text{н}}}{3}. \quad (II-41a)$$

При соотношении радиусов 0,7 и более общая ошибка при определении константы по приближенному значению эквивалентной длины не превышает 0,5%. Если ее вычислять по константе напряжения сдвига, то ошибка не превышает 1—2%.

Следует отметить, что в формулах (II-38) и (II-40) имеется несогласованность. Первая ошибка

обусловлена тем, что при выводе константы напряжения сдвига действительная криволинейная эпюра напряжений по высоте полусферы заменена эквивалентной прямолинейной; для приведенных размеров вискозиметра эта ошибка составляет около 1%: вторая — тем, что вязкость, определяемую по уравнению (II—37), рассчитывают по градиенту скорости, входящему в уравнения (II—27) и (II—28), а вязкость, определяемую по уравнению (II—38) — по логарифмическому градиенту [см. уравнение (II—6)]. По-видимому, будет более оправданно, если формулу (II—38) для прямолинейного участка реограммы заменить зависимостью, вытекающей из уравнения Шведова — Бингама:

$$\eta = K \frac{m - m_0}{\dot{\gamma} N}, \quad (\text{II—42})$$

где m_0 — масса, отсекаемая на оси абсцисс при экстраполяции к ней прямолинейного участка реограммы, кг.

Константу K следует считать по уравнению (II—40) или, с ошибкой, не превышающей 2%, по формуле (II—41), где эквивалентная длина для полусферы будет $\frac{\pi R_B}{4}$. Решать эти вопросы целесообразно с учетом экспериментальных данных.

Предельное напряжение сдвига θ_0 (в Па) определяют по выражению

$$\theta_0 = K_0 m_0, \quad (\text{II—43})$$

где m_0 — масса нагрузки (в кг), при которой ротор начинает вращаться; для расчета эту величину определяют графически как отрезок от нуля до точки пересечения кривой $N(m)$ с осью абсцисс.

Текущее значение напряжения сдвига для каждого измерения вычисляют по аналогичной зависимости

$$\theta = K_0 m. \quad (\text{II—43a})$$

Для вискозиметра «Реотест» вращающий момент

$$M = K^* \alpha,$$

где K^* — константа торзiona (K^* определяют тарировкой);
 α — угол закручивания по шкале прибора.

Предельное напряжение сдвига определяют по формуле (II—26), градиент скорости — по уравнению (II—30), эффективную, или ньютоновскую, вязкость —

по уравнению (II—27). Высота продукта в приборе постоянна и определяется высотой ротора. При этом константы, полученные для вискозиметра РВ-8, можно легко использовать для вычисления характеристик по экспериментальным данным, полученным на «Реотесте», если учесть, что у «Реотеста» вращающий момент M , а у вискозиметра РВ-8 $M = mgR_{\text{шк}}$. Поправка на сферический торец не вводится [второй член в знаменателе зависимостей (II—40)], если ротор имеет воздушную подушку. При другой форме торца поправки можно ввести, исходя из изложенных выше соображений [см., например, (II—22), (II—25)].

Результаты первичной обработки экспериментов по определению эффективной вязкости можно представить формулой (I—40):

$$\eta_{\text{эф}} = B\omega_*^{-m} = B \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^{-m}, \quad (\text{II—44})$$

когда вид зависимости для определения градиента скорости неизвестен. Последняя формула представляет собой наиболее общий случай. Далее, пользуясь той или иной зависимостью, можно вычислить градиент скорости и определить эффективную вязкость при единичном его значении.

В качестве примера ниже приведены преобразования, выполненные для вискозиметра РВ-8, который имеет размеры, показанные в пояснении к формулам (II—40). По формуле (II—30) с учетом уравнения (II—3) найдем

$$\varepsilon = 43,8N = 43,8 \frac{\omega}{2\pi R_B} = 434 \omega,$$

где 434 представляет собой коэффициент a в формуле (II—7).

Для $\varepsilon_1 = 1$ из предыдущего соотношения найдем $\omega'_1 = 0,0023$ м/с, причем $\varepsilon_1 = a\omega'_1$. Перепишем уравнение (II—44) в следующем виде:

$$\eta_{\text{эф}} = B \left(\frac{1}{\frac{\omega}{\omega_1} \cdot \frac{\omega'_1}{\omega'_1}} \right)^m = \frac{B}{\left(\frac{\omega'_1}{\omega_1} \right)^m} \left(\frac{1}{\frac{\omega}{\omega'_1}} \right)^m =$$

$$= B_0^* \left(\frac{1}{\frac{\varepsilon}{a} \cdot \frac{1}{\omega_1}} \right)^m = B_0^* \left(\frac{1}{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}} \right)^m, \quad (\text{II-4})$$

где $\omega_1 = 1$ м/с; $\varepsilon = a\omega$.

Таким образом, эффективная вязкость при единичном значении градиента скорости для рассматриваемого примера имеет следующее значение:

$$B_0^* = B \left(\frac{\omega_1'}{\omega_1} \right)^{-m} = B \left(\frac{0,0023}{1} \right)^{-m}. \quad (\text{II-45})$$

Если градиент скорости вычислен по какой-либо другой зависимости, например по уравнению (II-4) то $a = 340$ и $\omega_1 = 0,00295$ м/с; арифметические вычисления выполняются аналогично.

Приведенные преобразования показывают роль вида зависимости для определения градиента скорости. Этими причинами, вероятно, обусловлено мнение о несопоставимости данных ротационной и капиллярной вискозиметрии, т. е. градиент скорости и другие реологические характеристики вычисляли для различных условий и моделей течения.

Методика обобщения экспериментальных данных, полученных с помощью коаксиально-цилиндрических вискозиметров по течению степенной жидкости, имеет свою специфику. В этом случае уравнение (II-13а) можно представить в более простой форме, учитывая, что $\Omega = 2\pi N$:

напряжение сдвига в общем виде

$$\theta = \frac{M}{2\pi R_B^2 h_{\text{пр}}}; \quad (\text{II-4})$$

для вискозиметра РВ-8

$$\theta = \frac{gR_{\text{шк}}}{2\pi R_B^2} \cdot \frac{m}{h_{\text{пр}}}; \quad (\text{II-4})$$

правая часть уравнения (II-13а)

$$B_0^* \varepsilon_1^{1-n} \left\{ \frac{4\pi}{n \left[1 - \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^{2/n} \right]} \right\}^n N^n = B^* N^n, \quad (\text{II-4})$$

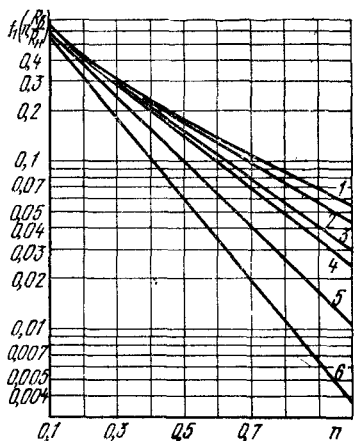
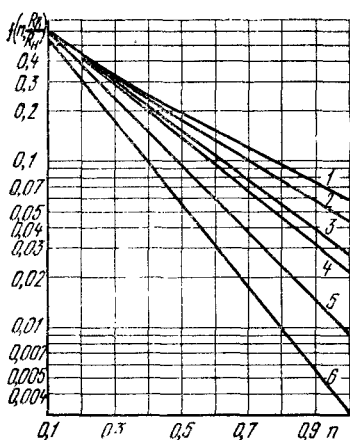


Рис. 9. График для определения функции течения в ротационных коаксиально-цилиндрических вискозиметрах в зависимости от индекса течения при различных отношениях радиусов роторов:

1 — 0,50; 2 — 0,675; 3 — 0,81; 4 — 0,85; 5 — 0,94; 6 — 0,98.

Рис. 10. График для определения функции течения в ротационных коаксиально-сферических вискозиметрах в зависимости от индекса течения при различных отношениях радиусов роторов:

1 — 0,50; 2 — 0,675; 3 — 0,81; 4 — 0,85; 5 — 0,94; 6 — 0,98.

тогда

$$\theta = B^* N^n \quad (\text{II—49})$$

или для вискозиметра РВ-8

$$\frac{\theta}{K_0} = m = B_m N^n, \quad (\text{II—49a})$$

где $B^* = B_0^* \varepsilon_1^{1-n} \left\{ \frac{4\pi}{n \left[1 - \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^{2/n} \right]} \right\}^n$;

K_0 — константа прибора; вычисляется по формуле (II—40).

Примечание. Индекс, отличающий коэффициенты B и градиенты скорости степенной жидкости от ньютоновской, условно опущен.

Уравнение (II—49) решают графо-аналитически. При этом определяют коэффициенты B^* и n в логарифмических шкалах. Затем вычисляют B_0^* по формуле

$$B_0^* = B^* \dot{\epsilon}_1^{n-1} \left\{ \frac{n}{4\pi} \left[1 - \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^{2/n} \right] \right\}^n = B^* \dot{\epsilon}_1^{n-1} f \left(n, \frac{R_B}{R_H} \right), \quad (\text{II-50})$$

где $f \left(n, \frac{R_B}{R_H} \right)$ представляет собой выражение в фигурной скобке в степени n .

Для сокращения времени расчетов эта функция представлена на рис. 9. Если постоянно пользоваться одними и теми же измерительными цилиндрами, то на графике будет одна линия.

Для коаксиально-сферического или полусферического вискозиметра при исследовании течения степенной жидкости с учетом уравнения (II-28а) по аналогии с предыдущим имеем

$$\theta = B_{\text{пс}} N^n, \quad (\text{II-51})$$

где $\theta = \frac{2M}{\pi^2 R_B^3}$ — напряжение сдвига для полусферического вискозиметра;

$\theta = \frac{M}{\pi^2 R_B^3}$ — напряжение сдвига для сферического вискозиметра;

$B_{\text{пс}}$ и n — определяются графо-аналитически.

Тогда действительное, инвариантное, значение эффективной вязкости по формуле (II-28а) для единичного значения градиента скорости можно вычислить по уравнению

$$\begin{aligned} B_{0\text{пс}}^* &= B_{\text{пс}} \dot{\epsilon}_{1\text{пс}}^{n-1} \frac{\pi \Gamma(n+3)}{8\Gamma^2\left(\frac{n+3}{2}\right)} \left\{ \frac{n}{12\pi} \left[1 - \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^{3/n} \right] \right\}^n = \\ &= B_{\text{пс}} \dot{\epsilon}_{1\text{пс}}^{n-1} f_1 \left(n, \frac{R_B}{R_H} \right), \end{aligned} \quad (\text{II-52})$$

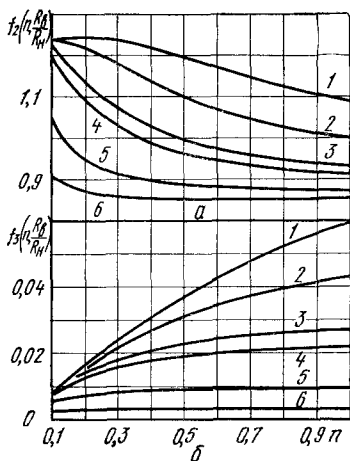
где $f_1 \left(n, \frac{R_B}{R_H} \right)$ представляет собой функцию гамма-функции, индекса течения и отношения радиусов сфер, приведенную на рис. 10;

$\dot{\epsilon}_{1\text{пс}} = 1$ — единичное значение градиента скорости.

При постоянных расчетах полученные выше зависимости удобнее привести к виду уравнения (II-37).

ис. 11. Графики для определения функций течения при расчете эквивалентной длины a) и вязкостной константы b) в коаксиальных полусфероцилиндрических вискозиметрах в зависимости от индекса течения при различных отношениях радиусов роторов:

1 — 0,50; 2 — 0,675; 3 — 0,81; 4 — 0,85; 5 — 0,94; 6 — 0,98.



Применительно к коаксиальному полусфероцилиндрическому вискозиметру

$$\eta_{эф} = K'_{ст} \frac{M}{N} = K'_{ст} \frac{mgR_{шк}}{N} = K_{ст} \frac{m}{N}, \quad (\text{II-53})$$

где $K'_{ст}$ — константа вискозиметра для степенной жидкости, м^{-3} ;

$M = mgR_{шк}$ — вращающий момент, Н·м;

N — частота вращения ротора, об/с;

$K_{ст} = K'_{ст} gR_{шк}$ — константа вискозиметра с падающими грузами (типа вискозиметра РВ-8) для степенной жидкости, $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.

Приведенная длина ротора $h_{пр}$ складывается из длины цилиндрической части, контактирующей с продуктом, h и эквивалентной длины $h_{эkv}$, которая представляет собой цилиндрическую поверхность, причем момент сопротивления вращению на ней равен моменту сопротивления вращению полусферической поверхности:

$$h_{пр} = h + h_{эkv} = h + \frac{\pi R_B}{4} f_2 \left(n, \frac{R_B}{R_H} \right). \quad (\text{II-54})$$

Функция течения определяется по зависимости

$$f_2 \left(n, \frac{R_B}{R_H} \right) = \left[\frac{8\Gamma^2 \left(\frac{n+3}{2} \right)}{\pi\Gamma(n+3)} \right]^{1/n} \left\{ \frac{3 [1 + (R_B/R_H)^{1/n}]}{1 + (R_B/R_H)^{1/n} + (R_B/R_H)^{2/n}} \right\} \quad (\text{II—5})$$

которая для удобства вычислений приведена на рис. 11, а.

Вязкостную константу вискозиметра вычисляют по уравнению

$$K'_{ст} = \frac{f_3 \left(n, \frac{R_B}{R_H} \right)}{2\pi R_B^2} \cdot \frac{1}{h_{пр}}, \quad (\text{II—5})$$

где $f_3 \left(n, \frac{R_B}{R_H} \right) = \frac{n}{4\pi} \left[1 - \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^{2/n} \right]$ — функция течения (ее значения приведены на рис. 11, б).

При индексе течения, равном единице, формулы (II—5) (II—56) принимают вид уравнений (II—37) — (II—40).

Таким образом, кратко обобщая изложенное выше, можно рекомендовать следующую последовательность вычислений.

1. Одновременно с проведением измерений строить графики осей координат напряжение сдвига — градиент скорости или пропорциональных им осей, например $m(N)$;

2. Определить высоту цилиндрической части ротора, на которой он контактировал с продуктом, и по формулам (II—40) (II—43а), (II—46), (II—47) для каждого измерения по приведенной длине рассчитать значения напряжений сдвига;

3. По формуле (II—49) построить графики в логарифмических шкалах и определить вязкостный коэффициент и индекс течения; они не зависят от выбранной модели тела. Эту операцию можно выполнить на ЭВМ с использованием метода наименьших квадратов, если точки хорошо располагаются вдоль прямой линии;

4. Определить приведенную длину по уравнениям (II—50) (II—55) и рис. 11, а. Определить вязкостную константу (II—56) и по рис. 11, б, имея в виду, что при изменении индекса течения она также изменяется. Для ньютоновской жидкости константы прибора вычислить по зависимостям (II—40);

5. Вычислить эффективную вязкость для каждого измерения по формуле (II—53) для неньютоновской степенной жидкости и по уравнению (II—37) для квазиньютоновской жидкости.

6. Аналогично рассчитать градиенты скорости по уравнению (II—13, б) или уравнению (II—30);

7. Построить зависимость эффективной вязкости от градиента скорости;

для степенной жидкости — по формулам (II—53) и (II—136), при этом исходная зависимость (I—39) принимает вид

$$\eta_{\text{эф}}^{\text{ст}} = B_0^* \dot{\epsilon}_{* \text{ст}}^{-m}, \quad (\text{II—57})$$

где индекс «ст» показывает отношение формулы к степенной жидкости;

для квазиньютоновской жидкости — по формулам (II—37) и (II—30), при этом расчетная зависимость имеет вид уравнения (I—39). Кроме того, можно построить зависимости (II—44), имея в виду, что вязкостные константы в уравнениях (I—39) и (II—44) связаны соотношением (II—45);

8. Вязкостные константы, определенные в п. 7, уже найдены в п. 3 по формулам (II—46)—(II—50), однако такой метод вычисления (по п. 3) может давать более существенную ошибку по сравнению с методикой п. 7, особенно при малых значениях индекса течения (0,1—0,3) и при аппроксимации экспериментальных точек в логарифмических шкалах несколькими прямыми. Далее в зависимости от важности для дальнейшего использования реологических параметров в той или иной зоне течения их расчет следует проводить по прямой, аппроксимирующей соответствующие экспериментальные точки.

В заключение необходимо отметить, что прежде чем выбрать ту или иную методику расчета и обобщения результатов экспериментальных исследований, следует для данного вида и состояния продукта провести обобщения различными способами для 5—10 опытов. Если при нагрузке и разгрузке образуются петли гистерезиса, то зависимости эффективной вязкости могут иметь различные единичную вязкость и темп разрушения структуры.

Порядок расчета реологических характеристик для других форм рабочих поверхностей вискозиметров принципиально не отличается.

Пластическую вязкость и предельное напряжение сдвига для бингамовского тела рассчитывают по уравнениям (II—38)—(II—43а). При этом следует иметь в виду, что точки для вычислений необходимо брать непосредственно с кривой (вычислять по точкам кривой, а не по экспериментальным). В процессе вычисления, если величины пластической вязкости получаются неодинаковыми, следует немного изменять ход кривой, особенно при малых числах оборотов. Если величины пластической вязкости получаются увеличивающимися или, наоборот, уменьшающимися, следует немного изменить величину предельного напряжения сдвига (отрезка, отсекаемого кривой на оси абсцисс). Корректи-

ровку кривой можно осуществить в пределах экспериментальных точек так, чтобы кривая не проходила вдали от них.

Капиллярные вискозиметры

Принципиальные схемы капиллярных вискозиметров для ньютоновских и неньютоновских продуктов показаны на рис. 12. Общим для всех приборов этого типа является наличие капилляра, устройства для измерения расхода или объема жидкости и системы обеспечивающей создание гидростатического давления. В качестве капилляра можно использовать трубку диаметром от долей до 2—3 мм для измерения вязкости ньютоновских и не очень вязких неньютоновских жидкостей. Получаемые результаты, как правило, инвариантны, т. е. не зависят от диаметра трубки. Для высоковязких неньютоновских жидкостей и пластично вязких систем диаметр «капилляра» может достигать нескольких десятков миллиметров, а результаты измерений часто зависят от диаметра, т. е. не инвариантны. В двух названных случаях диаметр капилляра, конечно, входит в теоретически полученные формулы для соответствующих моделей тел. Однако в случае движения по трубкам пластично-вязких тел модель течения может зависеть от диаметра, т. е. при разных диаметрах один и тот же продукт имеет разные модели течения, что учесть довольно сложно.

Наиболее простые, традиционные и вместе с тем универсальные капиллярные вискозиметры Оствальда (рис. 12, а) и Уббелоде (рис. 12, б) имеют капилляр два полых шарика для жидкости. Движущая сила процесса истечения — перепад давлений — в вискозиметре Оствальда обусловлена разностью высот жидкости, в вискозиметре Уббелоде — вакуумом или давлением в одном колене трубки. При измерениях приборы обычно помещают в водяную баню.

Вискозиметр Азарова и др. (рис. 12, в) предназначен для измерения вязкости высоковязких и пластично вязких продуктов. Давление истечения создается сжатым воздухом в цилиндре с продуктом, а расчетное давление измеряется специальным датчиком, установленным на капилляре. Масса протекающего продукта н

прерывно регистрируется с помощью тензометрической балки. Цилиндр с продуктом и капилляр снабжены водяной рубашкой.

Вискозиметр Горбатова, Сухановой и др. (рис. 12, *г*) встраивается в технологический трубопровод, транспортирующий пластично-вязкие или высоковязкие продукты. При прохождении продукта через капилляр за счет сил внутреннего трения — напряжения на стенке трубы — происходит его осевое смещение, которое регистрируется датчиком перемещений и записывается прибором. Внутренняя сила, вызывающая перемещение, компенсируется пружинами или сильфонами, которые могут иметь разную жесткость. Для периодического удаления жировой пленки предусмотрен электрообогрев капилляра.

Вискозиметр постоянного давления Виноградова и др. (рис. 12, *д*) обеспечивает протекание жидкости по капилляру при постоянном давлении, создаваемом буферной жидкостью, отделенной от исследуемого продукта упругой мембраной. Продукт в капилляр подается из цилиндра с поршнем, который может иметь электропривод.

Вискозиметр, работающий по принципу «моста» [113], может быть соединен с магистральным трубопроводом для продукта последовательно или параллельно (рис. 12, *е*). При протекании продукта через трубки возникает перепад давлений (небаланс моста). Если меняются пластично-вязкие свойства, то изменяется перепад давлений, который регистрируется прибором. При наличии обратной связи этот прибор, так же как и прибор на рис. 12, *г*, может регулировать консистенцию продукта.

Приборы, изображенные на рис. 12, *г* и 12, *е*, могут быть последовательно соединены, например, с индукционным расходомером, что позволяет приложить к ним теорию капиллярной вискозиметрии в консистентных переменных. В приборах создаются неоднородные поля деформаций, центральная часть потока может двигаться как твердый стержень. Несомненны преимущества приборов для исследования реологических свойств с целью расчета движения материалов по трубам.

Теория капиллярных вискозиметров разработана довольно подробно в трудах советских и зарубежных ученых [62, 159]. Поэтому кратко рассмотрим основные

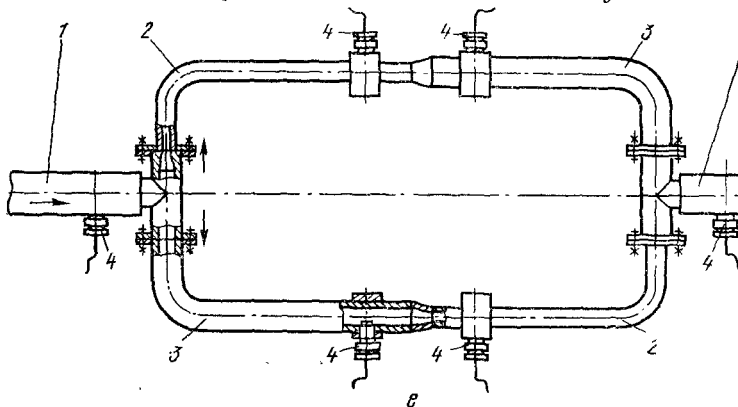
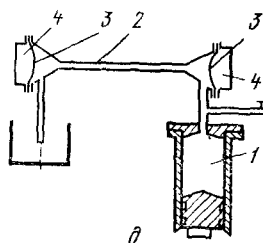
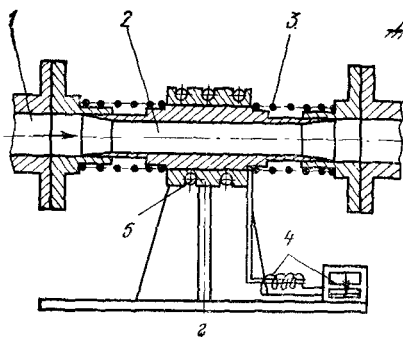
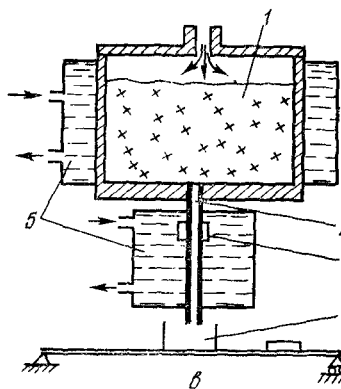
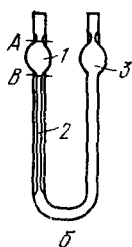
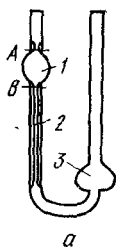


Рис. 12. Принципиальные схемы капиллярных вискозиметров для вязких жидкообразных продуктов:

a — Оствальда; *b* — Уббелоде: 1 — шарик для измерения объема протекающей через капилляр жидкости; 2 — капилляр; 3 — шарик для сбора жидкости; для пластично-вязких (неньютоновских) продуктов; *e* — Азарова и др.: 1 — цилиндр с продуктом; 2 — капилляр; 3 — датчик давления; 4 — сборная емкость, установленная на тензометрической балке; 5 — водяные (термостатирующие) рубашки; *z* — устройство для определения структурно-механических свойств вязкоупругих материалов при их измельчении: 1 — магистральный трубопровод; 2 — подвижной «капилляр»; 3 — упругие элементы (сильфоны, пружины); 4 — индукционный датчик перемещения «капилляра» с регистрирующим прибором; 5 — импульсный подогреватель для удаления жировой пленки; *d* — Виноградова и др.: 1 — цилиндр с поршнем для продукта; 2 — капилляр; 3 — мембрана; 4 — буферная жидкость для измерения перепада давления; *e* — мостового вискозиметра: 1 — магистральный трубопровод; 2, 3 — капилляры — плечи моста с различными диаметрами; 4 — датчики давления.

зависимости, необходимые как для научно обоснованной разработки методики экспериментов, так и для обобщения экспериментальных данных.

Теория капиллярной вискозиметрии основывается на том, что поток в приборе ламинарный, скольжение на стенке отсутствует, скорость сдвига в точке зависит от нагружения в той же точке. Попутно следует отметить, что в некоторых случаях возможно проскальзывание, что неоднократно отмечалось многими исследователями [59, 62]. Однако достаточно надежных способов учета этого явления до сих пор не разработано. Условие равномерного прямолинейного движения выделенного в жидкости цилиндра радиусом r и длиной l , определяется равенством движущей силы — силы давления, приложенной к его торцам:

$$p\pi r^2,$$

где p — перепад давлений на торцах цилиндра,

силе вязкого сопротивления, приложенной к его боковой поверхности:

$$2\pi r l \theta,$$

откуда напряжение на боковой поверхности выделенного цилиндра

$$\theta = \frac{p}{2l} r. \quad (\text{II—58})$$

Из уравнения (II—58) видно, что напряжение на оси трубки равно нулю, а на ее стенке θ_c при радиусе R или диаметре d — наибольшее:

$$\theta_c = \frac{pR}{2l} = \frac{pd}{4l}. \quad (\text{II—59})$$

Тогда

$$\theta = \theta_c \frac{r}{R}. \quad (\text{II—60})$$

Представим истинный градиент скорости $\frac{\partial u(r)}{\partial r}$ где $u(r)$ — скорость слоя радиусом r , в виде функции напряжения сдвига $\dot{\epsilon}(\theta)$:

$$-\frac{\partial u(r)}{\partial r} = \dot{\epsilon}(\theta),$$

где знак «минус» показывает, что скорость с увеличением радиуса уменьшается. Интегрирование в пределах от r до R дает

$$-[u(R) - u(r)] = \int_r^R \dot{\epsilon}(\theta) dr.$$

Поскольку проскальзывание отсутствует, то $u(R) = 0$. Расход жидкости dV_c через элементарный слой dr определяется выражением

$$dV_c = 2\pi r u(r) dr.$$

Подставляя вместо скорости слоя ее значение и интегрируя по частям, получаем расход жидкости во всей трубе

$$V_c = \pi \int_0^R r^2 \dot{\epsilon}(\theta) dr.$$

Из формулы (II—60) получаем $r = \frac{\theta}{\theta_c} R$; $dr = \frac{R}{\theta_c} d\theta$

Тогда последнее выражение легко представить в самом общем виде по аналогии с уравнением (II—16)

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \dot{\epsilon}(\theta) d\theta. \quad (\text{II—61})$$

Для ньютоновской жидкости $\dot{\epsilon}(\theta) = \frac{\theta}{\eta}$.

Элементарное интегрирование уравнения (II—61) позволяет получить уравнение Пуазейля:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta} \quad \text{или} \quad \theta_c = \eta \frac{4V_c}{\pi R^3} = \eta \frac{32V_c}{\pi d^3}. \quad (\text{II—62})$$

Имея в виду, что расход V_c (в м³/с) и среднеобъемная скорость ω (в м/с) связаны соотношением

$$V_c = \frac{V}{\tau} = \pi R^2 \omega = \frac{\pi d^2}{4} \omega, \quad (\text{II-63})$$

где τ — продолжительность протекания объема жидкости V , получаем

$$\theta_c = \eta \frac{4\omega}{R} = \eta \frac{8\omega}{d}. \quad (\text{II-64})$$

В этих выражениях по аналогии с законом вязкого сопротивления Ньютона

$\theta_c = \frac{\rho R}{2l} = \frac{\rho d}{4l}$ — консистентная переменная — «напряжение сдвига»,
 $\dot{\epsilon} = \frac{32V_c}{\pi d^3} = \frac{8\omega}{d}$ — консистентная переменная — «градиент скорости».

Применительно к теории капиллярной вискозиметрии уравнение Пуазейля (II-62) можно записать в следующем виде:

$$\eta = \frac{\pi \rho d^4}{128Vl} \tau. \quad (\text{II-65})$$

При интегрировании общего уравнения (II-61) для степенной жидкости (II-17а) имеем

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \left(\frac{\theta}{B_0^* \dot{\epsilon}_1^{1-n}} \right)^{1/n} d\theta = \frac{4n}{3n+1} \left(\frac{\theta_c}{B_0^* \dot{\epsilon}_1^{1-n}} \right)^{1/n}. \quad (\text{II-66})$$

Далее эту исходную зависимость можно представить в нескольких вариантах: решить относительно расхода, напряжения или перепада давления. Для теории капиллярной вискозиметрии представим уравнение (II-66) в консистентных переменных:

$$\theta_c = B_0^* \dot{\epsilon}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8\omega}{\dot{\epsilon}_1 d} \right)^n, \quad (\text{II-67})$$

или

$$\theta_c = A_1 \dot{\epsilon}_*^n, \quad (\text{II-68})$$

где $A_1 = B_0^* \dot{\epsilon}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n$ — напряжение сдвига на стенке трубы

при единичном значении относительно-
го среднего градиента скорости, Па;

$$\dot{\epsilon}_* = \frac{8\omega}{\dot{\epsilon}_1 d} \text{ — относительный средний градиент скорости (консистентная переменная);}$$

$$n = \frac{\partial [\lg (pd/4l)]}{\partial [\lg (8\omega/\dot{\epsilon}_1 d)]} \text{ — индекс течения; если в логарифмиче-}$$

ских шкалах экспериментальная кривая
линия спрямляется, то он равен отно-
шению логарифмов.

Зная консистентные переменные из экспериментов, отложив экспериментальные точки в логарифмических шкалах и проведя прямую линию, по формуле (II—68) легко определить A_1 и n , а далее вычислить вязкость

$$B_0^* = A_1 \dot{\epsilon}_1^{-1} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n = A_1 \dot{\epsilon}_1^{-1} f_4(n), \quad (\text{II—69})$$

где $f_4(n) = \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n$ — функция индекса течения (она для об-
легчения расчетов построена на
рис. 13, а).

В частном случае для ньютоновской жидкости при индексе течения, равном единице, формулы (II—67) и (II—69) превращаются в уравнение Пуазейля (II—62).

Уравнение (II—67) можно представить так же, как напряжение сдвига на стенке в зависимости от истинного относительного градиента скорости:

$$\dot{\epsilon}_{*нст} = \frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8\omega}{\dot{\epsilon}_1 d}, \quad (\text{II—70})$$

т. е. в виде

$$\theta_c = (B_0^* \dot{\epsilon}_1) \dot{\epsilon}_{*нст}^n, \quad (\text{II—70a})$$

Для облегчения расчетов на рис. 13, б построена функция

$$f_5(n, \dot{\epsilon}) = \left(\frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8\omega}{\dot{\epsilon}_1 d} \right)^n. \quad (\text{II—70б})$$

Индекс течения в дифференциальном уравнении течения и в консистентных переменных, если в логарифмических шкалах получается прямая линия, одинаков. В общем случае [155, 159] для двух названных уравне-

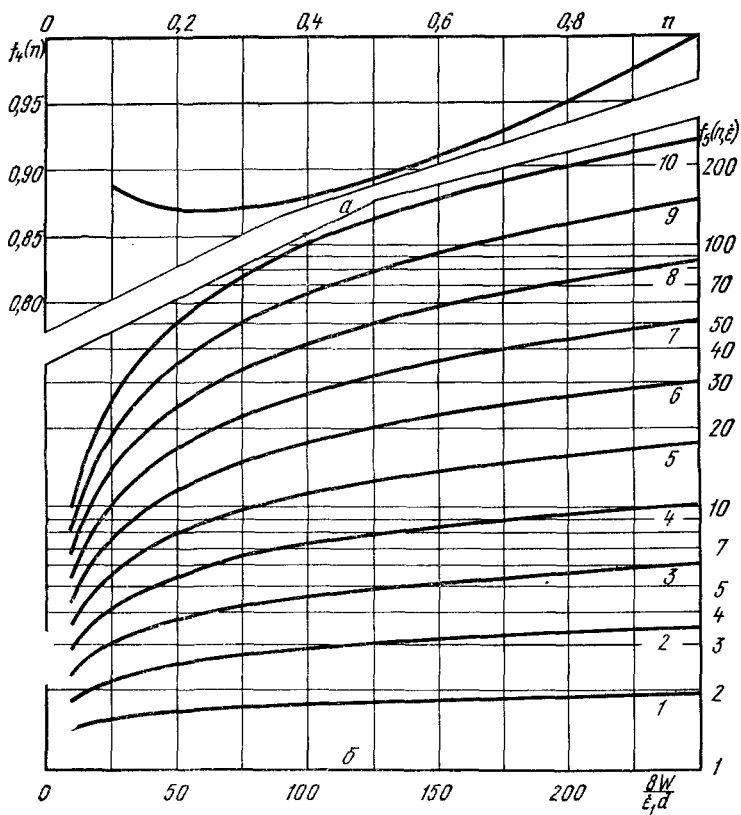


Рис. 13. Графики для определения функций течения в капиллярных вискозиметрах:
 а — функция индекса течения по формуле (II—69); б — функция индекса течения и среднего градиента скорости по формуле (II—70б) в зависимости от числовых значений градиента скорости при различных индексах течения: 1—10 соответствуют индексам течения 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0.

ний индекс течения может отличаться. Тогда по формуле (II—68) будет определен n' и затем истинный градиент скорости на стенке:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_{\text{ст}} = \frac{3n' + 1}{4n'} \cdot \frac{8w}{d}.$$

В дифференциальное уравнение (II—17) $\theta = B_1^* \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^n$

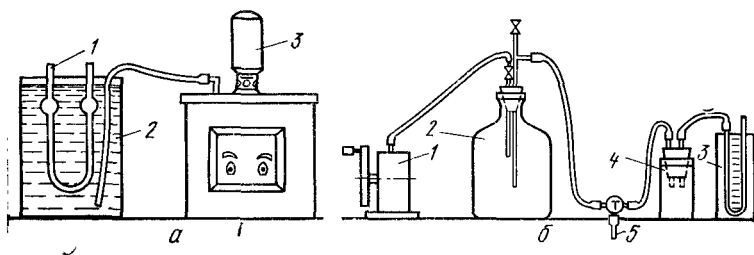


Рис. 14. Стенды для измерения вязкости:

a — при различных температурах: 1 — вискозиметр; 2 — сосуд для термостатирующей жидкости; 3 — ультратермостат; *б* — при различных напряжениях сдвига: 1 — воздушный насос; 2 — бутылка-моностат; 3 — жидкостный манометр; 4 — ловушка для жидкости; 5 — трубка к вискозиметру.

входит истинный индекс течения n , который со средним связан следующими соотношениями:

$$n = \frac{\partial (\ln \theta_c)}{\partial \left[\ln \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \cdot \frac{8\omega}{d} \right) \right]} = \frac{n'}{1 - \frac{1}{3n' + 1} \cdot \frac{\partial n'}{\partial (\ln \theta_c)}}$$

или

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n'} + \frac{\partial \left(\ln \frac{3n' + 1}{4n'} \right)}{\partial (\ln \theta_c)}. \quad (\text{II-71})$$

Вопрос о равенстве индексов течения или применения того или иного его значения решается экспериментально. При постоянных индексах течения кривые течения имеют одинаковую форму, но будут раздвинуты по оси градиентов скорости пропорционально значению $(3n + 1)/4n$.

Методики измерения сдвиговых свойств для большинства приборов этого типа подобны.

Стенд для измерения вязкости (рис. 14, *a*) состоит из вискозиметра, помещенного в открытый или герметичный сосуд, и ультратермостата. Термостатирование исследуемой жидкости в приборе занимает 10—30 мин, что определяется ее объемом. За это время температура достигает температуры жидкости из термостата и восстанавливается структура, т. е. создаются условия, идентичные предыдущему измерению. При кратковременном термостатировании температурные ошибки да-

ют существенные отклонения вязкости от истинных ее значений.

При измерениях вискозиметрами типа Уббелодене необходимо с одной стороны капилляра создавать давление или вакуум. Для этого используют установку (рис. 14, б), состоящую из воздушного насоса, который может работать как компрессор или вакуум-насос; бутылки-моностата объемом 8—10 л с пробкой; U-образного жидкостного манометра или микроманометра; сосуда, который является ловушкой жидкости, выбираемой из манометра, и

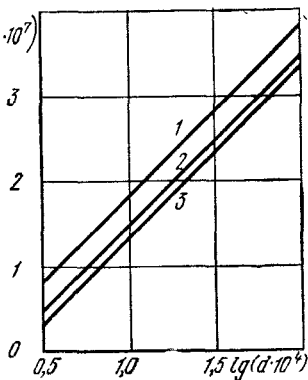


Рис. 15. Диаграмма для определения максимально допустимого диаметра капилляра (в м) при относительной ошибке измерения, не превышающей:

1 — 0,1%; 2 — 0,5%; 3 — 1%.

и трехходового крана для регулирования подачи воздуха. Перед началом измерения давление во всех емкостях должно быть выравнено. Избыточное давление при течении жидкости по капилляру создает возможность турбулизации потока, поэтому проверку на ламинарность по критерию Рейнольдса следует провести особенно тщательно.

Общими условиями в методике работы на всех приборах являются компоновка стенда и строгая горизонтальная или вертикальная установка прибора; заполнение сухого тщательно промытого прибора исследуемым продуктом и его термостатирование при выбранной температуре; измерение времени истечения определенного объема, которое обусловлено вязкостью и разностью высот или гидростатических давлений. Перед рабочими измерениями приборы тарируют по эталонной жидкости — дистиллированной воде, сахарному раствору или касторовому маслу. У абсолютных приборов, не требующих тарировки, константы определяют по размерам рабочих органов в соответствии с уравнением Пуазейля (П—62), (П—65).

При вычислении констант прибора по уравнению Пуазейля следует иметь в виду, что геометрические

измерения необходимо проводить с чрезвычайно высокой точностью. Если капилляр имеет диаметр 0,001 м (1 мм) и измерен с точностью до 0,0001 м (0,1 мм), то относительная ошибка при измерениях достигает 40%. Поэтому капиллярные вискозиметры предпочтительнее тарировать по эталонной жидкости. При большом диаметре капилляра, например в приборах для измерения свойств пластично-вязких тел, относительные ошибки измерения значительно меньше.

Для определения полной относительной ошибки измерения вязкости жидкообразных продуктов в связи с размерами капилляра на рис. 15 приведена диаграмма Г. Барра [11]. Она построена для оптимальной длины капилляра 0,1 м и среднего напора, т. е. разности высот жидкости в двух резервуарах 0,05 м. Если средний напор удваивается, т. е. равен длине капилляра, то линии переносятся параллельно вверх на 0,15 единицы шкалы по оси ординат. Для пользования графиком определяют ожидаемые диапазоны изменения вязкости и плотности, находят логарифм их отношения; точка пересечения горизонтали с линией выбранной ошибки дает на оси абсцисс максимально допустимый диаметр капилляра для этих условий. Область левее наклонной линии имеет меньшие, а правее — большие ошибки, чем указано на самой линии. Графики применимы также при определении пригодности имеющегося вискозиметра для данных измерений. В этом случае построение начинают с оси абсцисс. Диаграмма учитывает необходимость создания ламинарного режима и влияние кинетической энергии струи на показания прибора.

Чрезмерное уменьшение диаметра капилляра при наличии двойного электрического слоя у стенки, как аналитически доказал С. Е. Харин [181], ведет к ограничению действия закона Пуазейля. Он теряет свое значение при наличии двойного электрического слоя с дзета-потенциалом в 50 мВ, если капилляр имеет радиус порядка коллоидных частиц.

У абсолютных приборов капилляр тщательно проверяют на эллипсность сечения, конусность и гофрированность по длине. Для этого заполняют его ртутью и рассматривают под микроскопом или проектором, одновременно определяя диаметр. Объемно-массовым способом при известной длине капилляра можно вычислить

его диаметр по объему ртути. Для относительных приборов возможные погрешности такого рода автоматически учитываются при тарировке. Температурные изменения объема и плотности жидкости в вискозиметре сказываются на результатах измерения. Поэтому вискозиметр заполняют всегда одинаковым объемом при одной и той же температуре жидкости.

Измерения свойств пластично-вязких продуктов принципиально не отличаются от описанных выше, хотя имеются некоторые особенности, которые устанавливаются конструкцией прибора.

Для наиболее распространенных приборов методика определения реологических характеристик кратко изложена ниже.

Вискозиметр Оствальда обычно используют как относительный прибор. На полной тарировочной диаграмме наносят экспериментально полученные время истечения τ_v и вязкость η_v воды. В расчетную формулу вязкости η (в Па·с) жидкости, исходя из уравнения Пуазейля:

$$\eta = \eta_v \frac{\rho \tau}{\rho_v \tau_v},$$

входят плотность воды ρ_v и исследуемой жидкости ρ , которую определяют параллельно с вискозиметрическими измерениями. Давление в уравнении Пуазейля p (в Па), при котором жидкость протекает через капилляр, равно давлению (вакууму) в моностане или определяется по высоте столба жидкости:

$$p = \gamma h = \rho g h,$$

где γ — удельный вес жидкости, Н/м³;
 h — средний напор при истечении жидкости, м;
 ρ — плотность жидкости, кг/м³;
 g — ускорение силы тяжести ($g=9,81$ м/с²).

С учетом этого расчетная формула имеет вид:

$$\eta = K_t \rho \tau, \quad (\text{II}-72)$$

где K_t — водная константа прибора при температуре измерения.

Вискозиметр Уббелодде можно использовать как относительный и абсолютный. В первом случае его тарировать по эталонной жидкости; во втором в соответствии с уравнением Пуазейля определяют константы; их можно установить комплексно, исходя из данных предварительной тарировки и непосредственных геометрических измерений. Для вычисления вязкости пользуются формулой

$$\eta = \eta_{\text{в}} \frac{\rho \tau}{\rho_{\text{в}} \tau_{\text{в}}},$$

или

$$\eta = K \rho \tau. \quad (\text{II}-73)$$

Меняя давление истечения $p_{\text{в}}$, можно построить тарировочные реограммы $1/\tau_{\text{в}} = f(p_{\text{в}})$ или $\epsilon_{\text{в}}(\theta_{\text{в}})$, которые позволят вычислить константы для рабочих измерений. Аналогичные графики строят для результатов измерений исследуемой жидкости.

Предпочтительнее вискозиметрические данные обрабатывать на графиках с консистентными переменными по формулам (II-68) и (II-69). При этом для ньютоновской жидкости произведение $A_1 \epsilon_1^{-1}$ соответствует ее вязкости. При наличии аномалии вязкости можно определить кажущиеся или действительные значения предельного напряжения сдвига как отрезка, отсекаемого реологической кривой на оси абсцисс.

Горизонтальный вискозиметр ВК-4 в работе и тарировке аналогичен вискозиметру Уббелодде. Он предназначен для измерения вязкости крови и имеет две калиброванные трубки. Измерения можно проводить при прямом и обратном движении жидкости в капилляре. Это очень существенно для белковых структурированных жидкостей (крови, молока, бульона и др.), так как позволяет избежать разрушений структурных связей при холостом ходе вискозиметра.

Предельное напряжение сдвига можно измерять прибором А. А. Симоняна. У прибора вхождение поршня в трубу с одной стороны вызывает свободно

* Индекс «в» относится к данным, полученным при тарировке прибора водой или какой-либо другой жидкостью.

истечение продукта с другой стороны, а усилие, необходимое для истечения, воспринимается мембраной и определяется по ее деформации. Пластическое течение начинается, когда усилие на поршень равно сопротивлению цилиндрического слоя вдоль стенки трубы. Устойчивость показаний прибора обеспечена достаточной поверхностью сдвига.

В момент начала движения градиент скорости равен нулю, тогда условие равновесия продукта в цилиндре запишется в виде равенства сил — вдоль стенки поверхности трубы и движущей силы давления, прикладываемой к поршню [см. уравнение (II—59)]:

$$\theta_0 = \frac{d}{4l} p = K\delta, \quad (\text{II—74})$$

где K — константа прибора, учитывающая его геометрические размеры и тарировочные показатели мембраны, Па/м;

δ — прогиб мембраны, м.

Общая ошибка измерений не превышает 10%. Систематические ошибки зависят от точности тарировки мембраны и ее механических характеристик; в процессе эксплуатации прибора они могут увеличиваться. Случайные ошибки обусловлены качеством укладки продукта в измерительную трубу и скоростью вхождения поршня. Упругая мембрана, воспринимающая усилие сопротивления сдвигаемой в трубке массы, требует тарировки на специальном прессе для связи деформации прогиба (по индикатору) с давлением. В результате измерения не вносятся поправки на трение в приборе, так как чувствительным элементом служит мембрана, установленная в торце вытесняющего поршня. Поршни перемещают вручную, что обуславливает возможные субъективные ошибки при измерениях.

Методика проведения эксперимента сводится к следующему. Перед измерением прибор заполняют материалом. Затем вставляют поршень до плотного соприкосновения с продуктом, стрелку индикатора устанавливают на нуль. Рабочее положение прибора горизонтальное. Момент начала сдвига ядра определяют по прекращению прогиба мембраны. Изменением эффективной длины при вытеснении продукта со свободного конца трубы ввиду ее незначительности пренебрегают.

Если измерения проводят при различных температурах, в продукт помещают термометр.

Методика расчета реологических характеристик проще по сравнению с данными ротационной вискозиметрии, подобна ей и кратко сводится к следующему: по результатам измерений вычисляют консистентные переменные по уравнению (II—64) и строят графики $\epsilon(\theta_c)$ или $\theta_c(\epsilon)$, вычисляют индекс течения и напряжение сдвига при единичном значении градиента скорости по формуле (II—68) или ньютоновскую вязкость по (II—64); определяют эффективную вязкость по формуле (II—69) и графикам (рис. 13). Если кривая напряжений сдвига не выходит из нуля, то отрезок, отсекаемый на оси напряжений, показывает предельное напряжение сдвига. Для уточнения расчетов определяют по формуле (II—70) истинный градиент скорости, графически (II—70а) или аналитически с учетом графиков на рис. 13 находят реологические характеристики. Первичную графическую обработку параллельно с проведением опытов можно проводить в осях координат $\frac{1}{\tau}(p)$,

где τ — время замера, p — давление истечения, которые пропорциональны консистентным переменным для данного конкретного прибора.

Пенетрометры, консистометры и другие вискозиметры

Наряду с ротационными и капиллярными вискозиметрами существует огромное количество различных приборов для определения реологических свойств при относительном сдвиге слоев исследуемого продукта. На рис. 16 показаны некоторые типичные конструкции таких приборов, которые были использованы рядом авторов для исследования и контроля свойств мясных и молочных продуктов.

Способ измерения падающим шариком в широкой трубке, реализующий закон Стокса, успешно используют для определения вязкости ньютоновских или слабоструктурированных жидкостей. Однако он неприменим для изучения свойств пластично-вязких, структурированных систем [95]. Двухмерным методом [96] за один

опыт можно измерить температурную зависимость вязкости. Для этого жидкость в цилиндре нагревают сверху, охлаждают снизу, по вертикали пускают шарик. Зная скорость его движения в каждом слое и распределение температур по слоям, можно построить график изменения вязкости от температуры.

При измерении шариковыми вискозиметрами отсчеты производят для зоны равномерного движения шарика. Тогда кинетическая энергия, сообщаемая жидкости шариком, будет равна:

$$\mathcal{E} = \frac{m\omega^2}{2} = \frac{\gamma V}{g} \cdot \frac{\omega^2}{2} = \gamma \frac{\omega^2}{2g} \xi F \omega \tau,$$

где

$m = \frac{\gamma V}{g}$ — масса жидкости, которой сообщена энергия;

$\omega = \frac{h}{\tau}$ — скорость движения шарика на вертикальном отрезке пути h (в м) за время τ (в с);

$V = \xi F h$ — объем жидкости, которому сообщена энергия, если миделево сечение шарика $F = \frac{\pi d^2}{4}$;

ξ — коэффициент сопротивления, учитывающий поправку на объем жидкости, которому сообщена энергия.

Эта энергия равна работе сил вязкого сопротивления на пути движения шарика:

$$A = Ph = P\omega\tau,$$

где P — сила сопротивления.

Имея в виду, что для ламинарного режима движения $\xi = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{\eta 24}{\omega d \rho}$, а сила сопротивления для равномерного прямолинейного движения по закону Архимеда равна силе тяжести шарика в жидкости, т. е. $\frac{\pi d^3}{6} g (\rho_{\text{ш}} - \rho)$, после преобразований получим расчетную формулу

$$\eta = \frac{d^2 (\rho_{\text{ш}} - \rho) g}{18h} \tau = K (\rho_{\text{ш}} - \rho) \tau, \quad (\text{II}-75)$$

где $\rho_{\text{ш}}$ — плотность материала шарика, кг/м³;

ρ — плотность жидкости при температуре измерения, кг/м³;

$K = \frac{d^2 g}{18h}$ — константа прибора, м²/с².

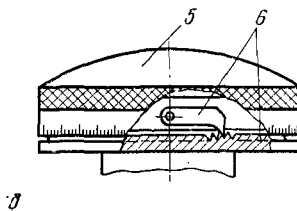
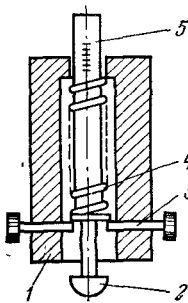
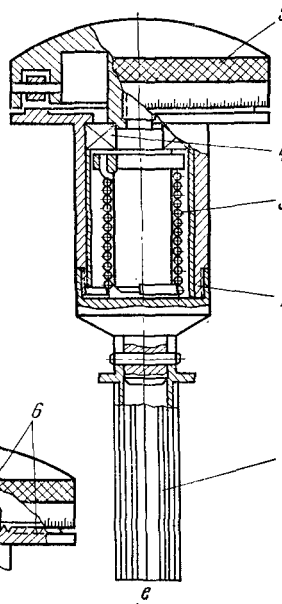
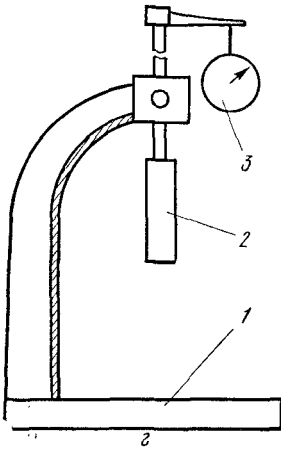
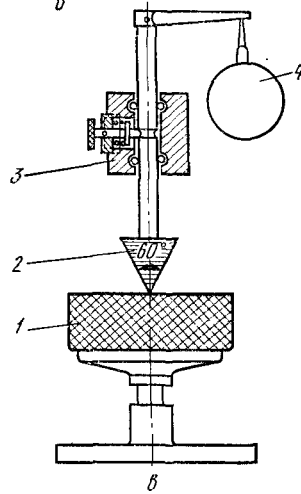
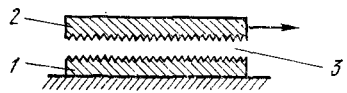
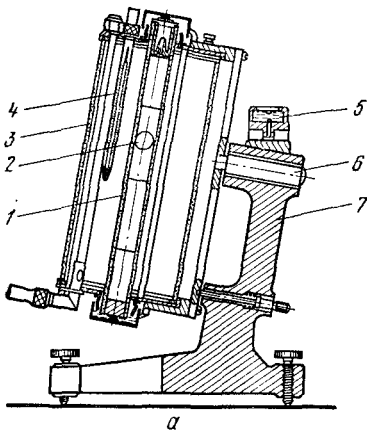


Рис. 16. Принципиальные схемы вискозиметров и пенетрометров:

а — вискозиметр Гепплера: 1 — прецизионная стеклянная трубка; 2 — шарик; 3 — цилиндр для термостатирующей жидкости; 4 — термометр; 5 — ватерпас; 6 — ось для поворота термостата на 180°; 7 — подставка; *б* — вискозиметр (пластоэластометр) с плоскопараллельными пластинами: 1 — неподвижная рифленая пластина; 2 — подвижная рифленая пластина; 3 — исследуемый продукт; *в* — конический пластометр Воларовича: 1 — ювета с исследуемым продуктом; 2 — конус со штангой и поперечиной; 3 — обойма для осевого перемещения штанги с фиксатором; 4 — индикатор часового типа для измерения перемещения штанги; *г* — пластинчатый пластометр Жуховицкого и Гуткина: 1 — подставка с кронштейном; 2 — плоский нож (200×25 мм) со штоком; 3 — индикатор или линейка для регистрации перемещений штока; *д* — переносной консистометр Е. и В. Шарьеров: 1 — полый корпус; 2 — сферический индентор; 3 — фиксаторы; 4 — пружина, работающая на сжатие; 5 — шток с делениями; *е* — консистометр Табачникова и Баркова: 1 — трубчатый пробоотборник с продольными пластинчатыми ребрами и заостренной нижней кромкой; 2 — корпус динамометра; 3 — пружина, работающая на закручивание; 4 — шарикоподшипник; 5 — головка прибора; 6 — собачка с храповым венцом.

Приведенная формула показывает сущность процесса, а константа может учитывать также факторы, не поддающиеся математическому описанию [11].

Из шариковых вискозиметров наиболее распространены вискозиметры Гепплера (рис. 16, *а*), хотя закон Стокса, описывающий движение шарика, в данном случае соблюдается частично, можно ими довольно точно измерять вязкость. Шарик движется в наклонной трубке, образуя узкую щель со стенкой. У структурированной жидкости при проходе через щель структурные связи разрушаются, поэтому точного воспроизведения результатов в двух последовательных замерах может и не быть. Прибор точно протарирован для измерения вязкости ньютоновских или слабоструктурированных жидкостей в диапазоне от $3 \cdot 10^{-4}$ до 60 Па·с. Паспортная ошибка измерения не превышает 0,5% для прецизионной (лабораторной) модели. Прибор неприменим для систем, имеющих предельное напряжение сдвига. Вязкость вычисляют по формуле (II—75) с учетом данных табл. 9.

Размеры шариков выбраны так, чтобы каждая область измерения перекрывалась соседней примерно на 30%. Продолжительность падения шарика должна составлять 30—300 с. Первый шарик набора входит в измерительную трубку с капиллярным зазором, поэтому исследуемую жидкость перед измерением тщательно очищают от взвесей.

Приборы с двумя плоскопараллельными пластинами (рис. 16, *б*) служат для измерения сдвиговых характеристик в области практически неразрушенных структур

Номер шарика	Диаметр $d \cdot 10^3$, м	Масса $m \cdot 10^3$, кг	Плотность $\rho_{ш}$, кг/м ³	Постоянная шарика $K \cdot 10^6$	Пределы измерения вязкости, Па·с
1	15,805	4,9692	2404	0,009747	$(0,3 \div 5) 10^{-3}$
2	15,630	4,8338	2418	0,080	$(3 \div 30) 10^{-3}$
3	15,452	15,6567	8110	0,234	$(15 \div 150) 10^{-3}$
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

при малых величинах деформаций. Приборы такого типа для исследования различных свойств (вязкости, упругости, периода релаксации и пр.) были предложены П. А. Ребиндером, Д. М. Толстым, Б. А. Николаевым и др.

Приборы обычно имеют две рифленые пластины для исключения проскальзывания продукта. Нижняя пластина неподвижна, верхняя может перемещаться с постоянной скоростью — от электропривода; либо при постоянном напряжении — от подвешенных через блок грузов. Теория прибора довольно проста, например при измерении вязкости практически неразрушенной структуры η_0 действует уравнение Ньютона:

$$P = \eta_0 F \frac{1}{h} \cdot \frac{\Delta x}{\tau},$$

откуда

$$\eta_0 = \frac{Ph}{F} \cdot \frac{\tau}{\Delta x}, \quad (\text{II-76})$$

где P — усилие сдвига, Па;

F — площадь пластин, м²;

h — толщина слоя продукта между пластинами, м;

Δx — величина смещения верхней пластины (в м) за длительность измерения τ (в с).

Консистентные переменные в формуле (II-76) будут иметь вид: напряжение сдвига P/F , градиент скорости $\frac{\Delta x}{h\tau}$.

Эти приборы часто дают существенную ошибку, обусловленную неточностью измерения очень малых значений градиента скорости.

Конические пластометры (рис. 16, в) по методу акад. П. А. Ребиндера получили широкое распространение в реологических исследованиях из-за простоты устройства и надежности в работе. Индентор — вводимое в продукт тело — может иметь различную форму: конус, сферу, нож, иглу и пр. Внедрение индентора в продукт обычно происходит за счет массы подвижной части прибора. Устройство приборов такого типа видно из рис. 16, в и 16, г.

Предельное напряжение сдвига θ_0 (в Па) определяют по глубине погружения конуса и вычисляют по формуле

$$\theta_0 = K \frac{m}{h^2}, \quad (\text{II-77})$$

где m — масса подвижной части прибора, кг;
 h — общая глубина погружения конуса, м;
 K — константа конуса (в Н/кг), зависящая от угла конуса 2α при вершине.

Обычно глубину погружения конуса измеряют индикатором часового типа, например в пластометре КП-3 Воларовича. Пружина индикатора оказывает существенное сопротивление перемещению подвижной части прибора (до 0,055 кг), поэтому в формулу (II-77) следует вводить поправку:

$$\theta_0 = K \frac{m - m_c}{h^2},$$

где m_c — величина сопротивления, определяемая тарировкой в каждом частном случае и связанная с величиной перемещения индикатора.

Константу конуса можно определить по данным Н. Н. Агранат [152, 154]:

2α	30°	40°	45°	60°	$89^\circ 20'$	90°
K	9,4	5,2	4,1	2,1	0,82	0,67

Систематические ошибки опытов в значительной степени зависят от точности изготовления и измерения угла при вершине конуса (в интервале 30 — 60° достаточна точность $0,1^\circ$); случайные — от способа укладки продукта в сосуд, исходной позиции конуса и т. д.

При измерении предельного напряжения сдвига одного и того же продукта конусами с различным углом при вершине часто не получаются одинаковые величины. Тогда следует выбрать такой конус, который обес-

печит показания, одинаковые с каким-либо другим прибором, например с ротационным вискозиметром. При этом предельное напряжение сдвига должно соответствовать первой кривой нагружения, определяемой на вискозиметре РВ-8, т. е. области неразрушенных структур. При изменении массы подвижной части прибора его показания, как правило, не изменяются.

Пластометр с пластиной (рис. 16, з) применен С. С. Жуковским и А. М. Гуткиным [66] для измерения предельного напряжения сдвига θ_0 (в Па). Его значение вычисляют по зависимости

$$\theta_0 = \frac{mg}{2bh}, \quad (\text{II}-78)$$

где m — масса подвижной части прибора, кг;
 g — ускорение силы тяжести ($g=9,81 \text{ м/с}^2$);
 b — ширина ножа ($b=0,025 \text{ м}$);
 h — глубина погружения ножа в продукт, м.

Авторы установили, что значения предельного напряжения сдвига, измеренного на указанном приборе и ротационном вискозиметре РВ-4, расходятся только на 5%. При различной начальной глубине погружения ножа окончательная глубина для одного и того же продукта оказывалась всегда одинаковой.

Полусферический консистометр Шарнера (рис. 16, д) для оценки консистенции мяса и колбас имеет полый корпус с подпружиненным полусферическим индентором. Когда индентор прижимается к продукту, сокращается пружина и хвостовик штока с нанесенными делениями выходит из корпуса. Измерения заканчивают при соприкосновении корпуса прибора с продуктом, т. е. изменяются две величины: перемещение штока относительно корпуса и усилие вдавливания, которое определяют степень сжатия пружины.

Приборы со сферическим индентором теоретически обоснованы [23].

Консистометр В. П. Табачникова и Е. Я. Баркова (рис. 16, е) предназначен для отбора пробы и одновременного определения предельного напряжения сдвига сыра и других продуктов [116].

Прибор состоит из трубчатого корпуса-пробоотборника с заостренной нижней кромкой и головки, представляющей собой динамометр вращательного движения.

Наружная поверхность корпуса пробоотборника снабжена продольными пластинчатыми ребрами.

Если шкалу прибора соответствующей тарировкой отградуировать в единицах момента силы, то предельное напряжение сдвига θ_0 (в Па) можно определять по формулам, выведенным из равенства моментов: внешний момент M (в Н·м), приложенный к головке 5, равен моменту силы сопротивления (среза) на цилиндрической части прибора [формула (II—18)] и на торце прибора, который можно уподобить диску [формула (II—20)]:

$$M = \pi \frac{D^2}{2} h \theta_0 + \pi \frac{d^3}{12} \theta_0,$$

откуда

$$\theta_0 = \frac{12M}{\pi (6D^2h + d^3)}, \quad (\text{II—79})$$

где D — максимальный диаметр сдвигаемой массы продукта, равный диаметру цилиндра, описываемого краями ребер при их вращении, м;

h — глубина погружения щупа в сыр, м;

d — внутренний диаметр трубки, м.

Пользуясь формулой (II—79), можно отградуировать также шкалу прибора непосредственно в значениях предельного напряжения сдвига. После отсчета показаний прибор вынимают из сыра, отсоединяют пробоотборник и вынимают из него пробу продукта. В приведенном написании формула справедлива, если срез (сдвиг) происходит по внутреннему диаметру трубки. Если же срез происходит по плоскости торца ребер, то следует пользоваться формулой (II—22), которая в этом случае получается из уравнения (II—79) при $d=D$.

Вискозиметр Энглера — условный прибор, тем не менее широко применяемый в клежеластиновой и мясной промышленности. Наиболее удачное его теоретическое обоснование, соответствующее результатам экспериментальных наблюдений, дано А. Д. Альтшулем [4]. Этим прибором широко пользуются для изучения вязкости жидкости. Он состоит из внешнего и внутреннего цилиндрических резервуаров, соединенных в нижней части капиллярным насадком для истечения жидкости. Насадок сверху закрыт штифтом. В рубашку между резервуарами заливают термостатирующую жидкость. Та-

ривка заключается в определении «водного числа», т. е. времени истечения 200 мл воды при 20° С. Шестикратные измерения должны давать отклонение не выше 0,5 с, а общая продолжительность освобождения резервуара составляет 50—52 с. При рабочих измерениях определяют время истечения 200 мл жидкости при необходимой температуре. Отношением времени истечения жидкости к времени истечения воды выражают условную вязкость в градусах Энглера:

$$^{\circ}E = \tau/\tau_{в}.$$

Для пересчета вязкости из градусов Энглера в единицы кинематической вязкости предложено несколько эмпирических формул.

Подготовка образцов жидкости для вискозиметрических исследований отражается на конечных результатах. Для удаления воздуха жидкость нагревают до температуры выше плавления, но ниже кипения. Испарение даже небольшого количества воды резко сказывается на вязкости. Очищают жидкость от взвесей отстаиванием или фильтрованием. Фильтр не должен поглощать какой-либо компонент, поэтому фильтровальная бумага неприменима; лучшие результаты дают металлические сита. Наряду с описанными выше приборами, применяемыми при традиционных реологических методах измерения, в последнее время используют промышленные и лабораторные приборы, основанные на других способах.

Для контроля структуры и консистенции сыра предложен прибор, в котором рабочим органом является струна [116]. По усилию резания струной можно судить о консистенции сыра.

Готовность фарша при куттеровании определяли приборами с упругой балкой консольного типа [154, 200]. На конце консоли закреплен рабочий орган, состоящий из сферы, пластины, штока и др. В процессе куттерования фарша изгиб балки увеличивается, а при достижении максимума куттер перестает работать.

Большое распространение в мясной и молочной промышленности получил метод среза продукта: по А. С. Большакову и А. К. Фомину [143] — между поверхностями плоских пластин; по Г. Е. Лимонову и др. [133] — между цилиндрами с отверстиями; по П. В. Войсею [193] и Н. Н. Мозенину [210] — между пуансоном и

матрицей с отверстием; по Е. Пуоланне [211] — при вдавливании поршня диаметром 0,04 м в образец колбасы толщиной 0,05 м и т. д.

Представляют также интерес вибрационные вискозиметры [196, 197], которые были использованы для измерения реологических свойств фарша в лабораторных и производственных условиях [132, 133]. Вибрационный вискозиметр ВНИИМПа [133] состоит из зонда, погружаемого в фарш, и электронного блока. Зонд представляет собой металлический герметичный цилиндр, в дно которого впаяна полуволновая магнитострикционная пластинка, одна половина которой выступает за пределы цилиндра, а другая расположена в цилиндре и охватывается вмонтированной в него катушкой с возбуждающей обмоткой. В месте впайки пластинки возникают продольные колебания, частота которых определяется ее длиной. Колебания пластинки, возбуждая в окружающей среде поперечные волны, затухают вследствие обратной реакции среды, зависящей от ее вязкости. Эта зависимость автоматически регистрируется электронным показывающим индикатором.

Вибрационные вискозиметры позволяют измерять вязкость ньютоновских и неньютоновских сред в диапазоне от сотых долей до 10^6 Па·с и использовать их для непрерывного измерения вязкости.

При ограниченном объеме книги описание других существующих приборов для измерения сдвиговых свойств нецелесообразно. Особенно большое количество работ в этой области посвящено определению нежности продуктов, где превалируют устройства сдвигового типа. Для теоретического обоснования работы приборов авторы обычно заимствуют математический аппарат из теории упругости и пластичности.

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПРЕССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Наряду со сдвигом объемное или осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов. В ряде машин (прессов, волчков, дозаторов, шприцев и пр.) продукты находятся при повышенных давлениях, что изменяет их первоначальный объем и плотность. На выходе из маши-

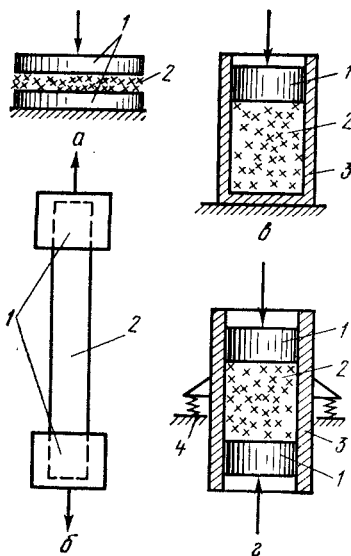


Рис. 17. Принципиальные схемы приборов для измерения компрессионных характеристик: а — осевого сжатия: 1 — пластины; 2 — продукт; б — осевого растяжения: 1 — зажимы; 2 — продукт; в — одностороннего объемного сжатия: 1 — поршень; 2 — продукт; 3 — цилиндр; г — двустороннего объемного сжатия: 1 — поршни; 2 — продукт; 3 — цилиндр; 4 — пружинные подвески цилиндра.

ны объем и плотность так же могут отличаться от начальных. Эти изменения определяют, основываясь на компрессионных характеристиках. Впервые представления об объемном сжатии пластично-вязких тел начали развиваться в связи с процессами уплотнения грунтов, брикетирования торфа и пр.

Основные методы измерения названных характеристик показаны на рис. 17. Сжатие продукта между пластинами (рис. 17, а) используют также для оценки консистенции продукта. В результате исследований Б. А. Николаева, Ю. Ф. Заяяса, А. Ф. Баранова [125, 127] установлена взаимосвязь между химическим составом мяса, его нежирностью и механическими показателями при растяжении (рис. 17, б). Для надежного крепления концов образца мяса по предложению А. Н. Познышева

можно применять замораживание их в жидком азоте. При сжатии продукта в цилиндре поршнем (рис. 17, в) появляются распорные усилия, в результате чего давление и плотность по высоте цилиндра изменяются; этот эффект проявляется тем больше, чем меньше диаметр цилиндра. Двустороннее сжатие продукта (рис. 17, г) может происходить от двух подвижных поршней или от одного неподвижного и одного подвижного, когда цилиндр свободно подвешен, например на пружинах. В последнее время появились машины, рабочие органы которых создают в мясных продуктах трехосное напряженное состояние: в разъемной по оси форме продукт

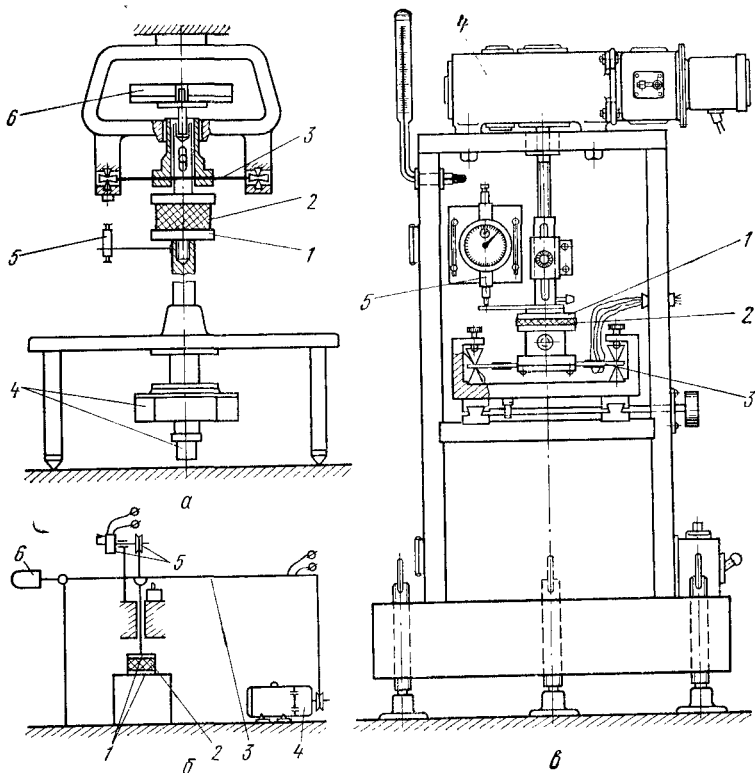


Рис. 18. Устройства для измерения компрессионных характеристик при осевом сжатии продуктов:

a — универсальный прибор ВНИИМПа для исследования реологических характеристик мясopодуKтов; *б* — деформетр МТИММПа для исследования характеристик продуктов при осевом сжатии; *в* — прибор для измерения компрессионных характеристик и адгезии продуктов: 1 — пластины; 2 — образец продукта; 3 — тензoметрическая балка; 4 — электропривод с редуктором к подвижной части прибора; 5 — механический или электрический датчик деформации продукта; 6 — груз.

прессуется по боковой поверхности при ее закрывании и с торцов — поршнями. Этот метод экспериментально не исследован.

Теоретически методы обоснованы (см. главу I). Обычно для каждого продукта используют свои математические модели, на основе которых рассчитывают реологические характеристики. Типичные примеры таких расчетов приведены в главе 4.

Схемы приборов для измерения компрессионных характеристик при осевом сжатии (растяжении) показаны на рис. 18. Они реализуют принцип постоянной скорости деформации, хотя без существенной модернизации могут быть приведены к принципу измерения при постоянном напряжении. Методика работы для всех приборов практически одинакова, хотя они отличаются по способу привода пластины: снизу (рис. 18, а) и сверху (рис. 18, в) от электродвигателя с редуктором через систему винт — гайка и систему рычагов (рис. 18, б).

Универсальный прибор ВНИИМПа [133], выпускаемый небольшими партиями для исследования структурно-механических свойств мясопродуктов (рис. 18, а), состоит из основания, к которому жестко присоединены реверсивный электродвигатель с редуктором и коробка скоростей. На выходном валу коробки скоростей имеется подвижный шток с держателем образца продукта. С помощью переключателя скоростей устанавливают одну из трех скоростей для перемещения подвижного штока. На основании смонтирована стойка с кронштейном и тензобалкой. В центре тензобалки установлен полый патрон со сквозным отверстием, в которое вставляют одно из измерительных приспособлений. В центре кронштейна имеется отверстие, через которое входит хвостовик держателя грузов. На кронштейне и основании прибора установлены концевые выключатели, а на подвижном штоке — микрометрический ограничитель хода. Для определения структурно-механических характеристик прибор снабжен сменными измерительными приспособлениями и держателями рабочего органа. С целью увеличения количества определяемых физических характеристик и повышения точности их определений прибор снабжен дополнительными измерительными органами, которые выполнены как сменные.

Для определения вязкости, напряжения сдвига, деформации и плотности используют дополнительный держатель образца, представляющий собой цилиндр с тензOMETрическими датчиками на наружной поверхности, и штуцер с заглушкой, а дополнительный измерительный орган для определения вязкости — тело в виде шара и полого цилиндра.

Для определения деформации и плотности применяют дополнительный измерительный орган, представляю-

щий собой поршень, который можно смещать относительно цилиндра, а для определения напряжения сдвига — набор конусов с различными углами.

Измерительное приспособление для определения осевого сжатия и адгезии состоит из держателя и измерительного органа, представляющих собой круглые пластины одинаковой площади. Держатель образца закреплен на подвижном штоке, а измерительный орган — в полom патроне, установленном в центре тензобалки.

Пластины изготовлены из различных материалов, применяющихся в пищевой промышленности. К прибору дан набор пластин различной площади.

Приспособление для определения напряжения среза состоит из внешнего полого и внутреннего цилиндров, а также специальной втулки. Внешний полый цилиндр крепится на подвижном штоке, а внутренний — на тензобалке. Оба цилиндра выполнены таким образом, что внутренний цилиндр может перемещаться во внешнем. По высоте внутреннего и внешнего цилиндров имеются три отверстия одного диаметра, оси которых перпендикулярны образующим этих цилиндров. К прибору дается набор измерительных приспособлений различных геометрических размеров для определения напряжения среза.

Дефометр МТИММПа [54] позволяет регистрировать одновременно деформации и нагрузки во времени. Принципиальная схема прибора показана на рис. 18, б. Образец сжимается между двумя полированными пластинами в результате перемещения верхней пластины толкателем, установленным в направляющих. Нижняя пластина неподвижно закреплена на основании. Прибор приводится в действие электродвигателем постоянного тока. Крутящий момент передается через редуктор на шкив и далее при помощи гибкого тросика и рычажной системы с противовесом — на толкатель. Циклические нагрузки на образец создают путем замены шкива эксцентриком. Перемещение толкателя вниз ограничено концевым выключателем. Усилие сжатия воспринимается упругим элементом, на который наклеены тензометрические датчики, подключенные к измерительному самопишущему потенциометру типа КСП-4. Деформацию образца регистрируют резистором переменного со-

противления, подключенным к самопишущему потенциометру типа КСП-4.

Дефометром [154] можно пользоваться для исследования характеристик продуктов при осевых сжатии и растяжении (рис. 18, в). Он имеет корпус, состоящий из верхней и нижней частей. В верхней части установлен столик с тензометрической балкой, которая расположена в фиксированном положении на призмах. На тензометрической балке в средней ее части жестко закреплена бобышка для установки и крепления нижней пластины. Подвижная штанга-гайка получает возвратно-поступательное равномерное движение от вращающегося винта, жестко соединенного с электродвигателем через редуктор и ступенчатый вариатор, позволяющий создавать различные скорости движения штанги-гайки. В ее нижней части крепятся пластина поводка, служащего опорой для ножки индикатора, и верхняя рабочая пластина. На корпусе прибора смонтированы выключатель и переключатель реверса.

Тензометрическая балка воспринимает усилие сжатия или отрыв при малой деформации (0,14 мм при усилии 12,0 Н). На нее наклеены тензодатчик и тензокомпенсатор, которые подсоединены к различным плечам мостовой схемы. Изгиб тензометрической балки вызывает деформацию растяжения тензодатчика, вследствие чего изменяется его электрическое сопротивление и нарушается баланс моста. Электрический сигнал усиливается тензоусилителем и записывается шлейфовым осциллографом на фотоленте. Блок электрического питания и осциллограф получают электроэнергию из электросети через стабилизатор напряжения.

Для повышения чувствительности схемы на тензобалке размещены четыре датчика, являющиеся плечами моста. Принципиальная схема такого соединения представляет собой двойной мост с параллельным питанием. Два датчика расположены на одной поверхности тензометрической балки и два — на другой, т. е. чувствительность схемы в два раза выше. Второй мост предназначен для монтажной и рабочей балансировки схемы.

При определении величины адгезии тензометрическая балка опирается на верхние призмы, удерживаемые винтами, которые поджимают ее к нижним. Во избежание смещения тензометрической балки на одной

ее стороне имеются две риски для установки острия призм. В корпусе прибора при условии термостатирования предусмотрены нагревательные элементы и дверца с уплотнением. Результаты испытания прибора на мясных фаршах и мясе показали возможность определения на нем как компрессионных характеристик, так и величин адгезии.

Прибор имеет пластины разной площади — от 0,0005 до 0,0025 м², изготовленные из различных материалов. Перед началом опытов тарируют прибор с помощью стандартных грузов. Затем между пластинами помещают образец продукта, верхнюю пластину подводят к образцу без нагрузки и устанавливают «зайчик» осциллографа на нуль при помощи скользящего реохорда моста. Во время опыта при включенном приводе механизма подъема — опускания пластины записывают напряжение — время. После этого привод выключают и записывают нисходящую ветвь кривой релаксации напряжений. По окончании опыта «зайчик» осциллографа вновь устанавливают на нуль, если произошло его смещение. Опыты повторяют при различной скорости деформации образцов. Образцы продукта подготавливают высечкой, либо формовкой в цилиндре. Случайные ошибки в экспериментах не превышают $\pm 3\%$.

Особое значение имеет подготовка образцов продукта к эксперименту. Для этого можно рекомендовать приспособление, изготовленное в лаборатории реологии МТИМПа [120, 163]. Оно состоит из набора входящих друг в друга полых цилиндров с ходовой посадкой. Внутренний диаметр каждого цилиндра равен наружному диаметру пластины, установленной в шаблон. При этом цилиндры меньшего диаметра опускают на необходимую глубину, замеренную глубиномером, и фиксируют стопорным винтом. Объем от поверхности пластины до кромки наружного цилиндра заполняют продуктом, а излишки снимают специальной лопаткой. Высоту слоя контролируют с точностью до 0,05 мм. Для исключения влияния загрязнений на результаты измерений обе пластины перед нанесением образцов следует обезжиривать бензином, промывать, высушивать фильтровальной бумагой и обезвоживать этиловым спиртом. Схемы приборов для исследования компрессионных характеристик при объемном сжатии представлены на рис. 19.

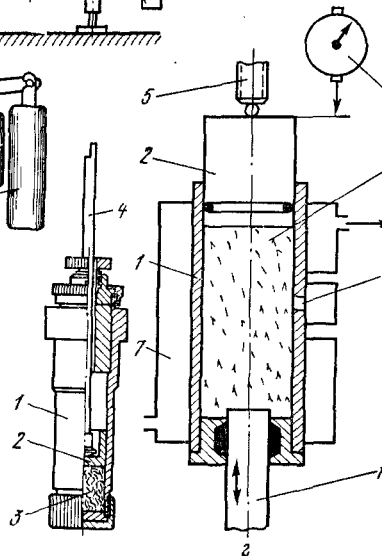
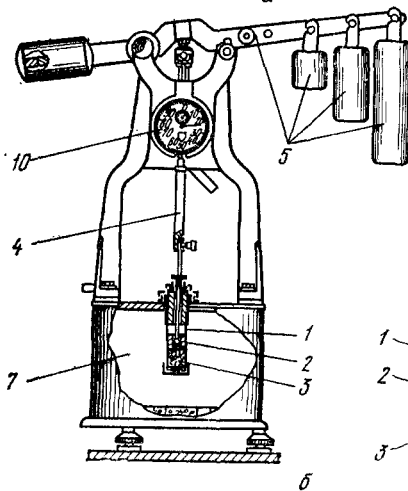
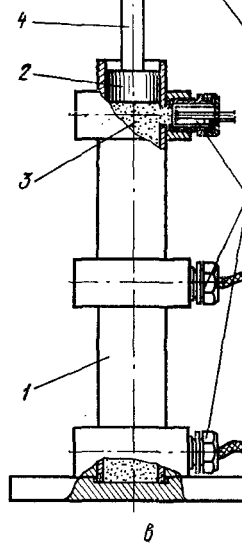
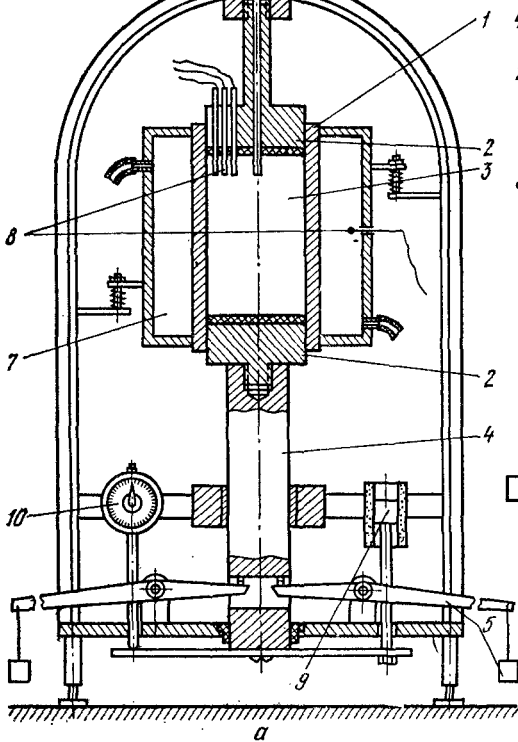


Рис. 19. Приборы для измерения компрессионных характеристик при объемном сжатии продуктов:

a — компрессионный калориметр; *б* — консистометр Гепплера; *в* — устройство для измерения бокового давления и распределения давления по высоте цилиндра; *г* — виброкомпрессионное устройство: 1 — цилиндр для продукта; 2 — поршень; 3 — продукт; 4 — шток, передающий усилие давления; 5 — устройство, создающее давление; 6 — тензодатчики давления; 7 — водяная рубашка; 8 — термопары; 9, 10 — датчики перемещения поршня, соответственно индукционная катушка и индикатор часового типа; 11 — вибропоршень.

Компрессионный калориметр Московского мясокомбината и МТИММПа [22, 38], изображенный на рис. 19, *a*, позволяет определить как реологические, так и теплофизические свойства пластично-вязких масс при различных давлениях. Такое преимущество достигается тем, что в цилиндре с противоположных его сторон установлены поршни, к штоку одного из которых симметрично подведены грузовые рычаги. Прибор снабжен водяной рубашкой, а внутри продукта для измерения температуры установлены термопары. Двустороннее сжатие обеспечивается подвижностью цилиндра с продуктом. Прибор состоит из подвешенного на пружинах к корпусу цилиндра с водяной рубашкой для размещения навески исследуемой массы. В цилиндре с противоположных сторон установлены поршни, между которыми закладывают исследуемую навеску. Поверхность соприкосновения поршней с исследуемой массой термоизолирована эбонитовыми прокладками. Верхний поршень закреплен неподвижно на корпусе, нижний — на подвижном штоке, который посредством грузов, навешиваемых на рычаги, осуществляет поступательное движение, обеспечивая первоначальную подпрессовку исследуемой навески фарша. Шток и поршень в нерабочем состоянии уравновешены (с учетом массы фарша).

Для измерения температуры фарша в различных точках установлены термопары игольчатого типа. Высота расположения горячего спая термопар составляет половину столба фарша. Температуру греющей (охлаждающей) среды измеряют термопарой, расположенной в водяной рубашке, и записывают электронным потенциометром типа КСП-4.

Со штоком неподвижно соединен плунжер индукционной катушки с помощью рычага, на который опирается также конец стержня индикатора часового типа. Деформации можно наблюдать визуально и записывать

с помощью потенциометра по сигналам, получаемым от перемещения сердечника в индукционной катушке.

Консистомер Гепплера (рис. 19, б) применяют лабораторных и производственных условиях. Недостатком прибора является то, что измерительный цилиндр его вмещает всего несколько граммов продукта. Модернизация прибора [38], заключающаяся в изготовлении новых цилиндров различного диаметра, позволила устранить этот недостаток. Прибор работает подобно описанному выше.

По результатам экспериментов, проведенных на этих приборах, можно вычислить относительные деформации и построить кинетические зависимости. Поскольку масса продукта в цилиндре известна, эксперименты позволяют определить плотность при различных давлениях.

Цилиндры снабжены водяной рубашкой, а в продукте помещены терморпары, поэтому приборы можно рассматривать в качестве акалориметров и измерять на них теплофизические характеристики продуктов.

Для определения коэффициентов бокового давления предлагаются два основных способа. По первому способу в продукте, находящемся в сжатом состоянии, располагаются вертикально и горизонтально две полосы. Коэффициент бокового давления определяют как отношение усилия выдергивания этих полос. Метод в определенном смысле является относительным, на величину усилия влияет сила трения в щели цилиндра, по которой перемещается полоса. Второй способ основан на непосредственном измерении бокового давления соответствующими датчиками, если вертикальное давление обеспечивается постоянной нагрузкой [99]. Этот метод считают первичным и более точным, чем предыдущий.

Для вычисления коэффициента бокового давления и определения характера распределений давления по высоте цилиндра, продукт в него закладывают на 5—10 мм выше верхней месдозы (рис. 19, в). Давление на продукт от поршня можно рассчитать по массе грузов, давление на стенку — измерить месдозами. Зная боковое давление в трех точках по высоте цилиндра и коэффициент бокового давления, можно составить полную картину распределения давлений в цилиндре [52].

Для изучения влияния вибраций при объемном сжатии продукта Ю. А. Мачихин и А. С. Максимов [103]

предложили прибор, изображенный на рис. 19, г. Он имеет цилиндр с водяной рубашкой, датчик давления и поршень, нагружаемый винтовой системой, что позволяет реализовать метод постоянной деформации. В нижней части прибора установлен вибропоршень, жестко связанный с эксцентриковым вибратором и создающий колебания в продукте.

В ряде стран для определения реологических свойств мяса и готовых мясопродуктов [133] применяют универсальную испытательную машину «Инстрон» (Англия) различных моделей. На машине можно испытывать образцы на растяжение, сжатие, знакопеременные нагрузки, кручение. Образец мяса зажимают в специальном устройстве, а затем подвергают различным деформациям. С помощью машины определяют релаксацию напряжений, чувствительность продукта к скорости деформации, подсчитывают энергию деформации и релаксации.

Для определения и записи нагрузки на образец используют датчики давления, а также электронный чувствительный прибор и фольговые тензометрические датчики. Сигнал с последних передается на высокоскоростной самопишущий прибор, обеспечивающий регистрацию различных показателей при всех условиях и диапазонах нагрузки с точностью около 0,5%. Подвижная траверса машины приводится в движение двумя винтами и свободным от люфта устройством. Скорость измерения реологических свойств регулируется системой синхронного привода, которая независимо от нагрузки обеспечивает постоянную скорость деформации образца. Большая точность показаний машины позволяет применять ее для контроля некоторых качественных характеристик мяса и мясопродуктов.

Существуют приборы, которые моделируют разжевывание продукта, раздавливание и пр. [133, 208, 210].

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТОВ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

Поверхностные свойства пищевых продуктов — адгезия и внешнее трение — проявляются на границе раздела между продуктом и твердой стенкой. Они имеют существенное значение в разнообразных технологических про-

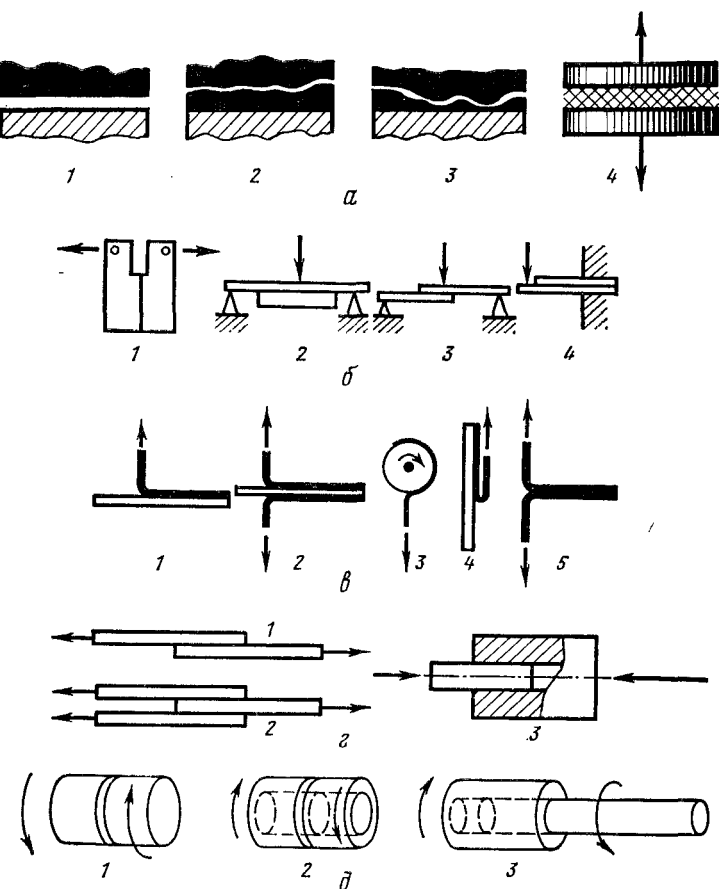
деляется линейной скоростью штока или нити, отрывающих пластину, и жесткостью (величиной деформации регистрирующего упругого элемента и других подвижных частей. Скорость тангенциального смещения продукта по поверхности влияет на коэффициент трения, который в статическом состоянии больше, чем в динамическом. В самом деле, чтобы сдвинуть продукт, нужно разрушить молекулярные связи. При дальнейшем движении его с постоянной скоростью количество разрушенных и восстановленных связей будет находиться в динамическом равновесии, поэтому здесь на разрыв связей расходуется меньше энергии, чем в начальном момент.

Кроме того, адгезия и внешнее трение зависят от ряда технологических характеристик: влажности, состава продукта, степени измельчения и т. д.

При измерении адгезии реализовать перечисленные требования позволяют описанные выше дефометры (см. рис. 18) либо без модернизаций, либо с незначительной модернизацией, а также специально сконструированные в лаборатории реологии МТИММПа адгезиометр [154] и другие приборы. При этом образцы измерения подготавливают так же, как и при изучении осевого сжатия.

Качественно адгезию можно охарактеризовать двумя способами [14, 16]: нарушением контакта одновременно на всех участках площади (рис. 20, а, г, д) или же путем последовательного отрыва отдельных участков — расслаиванием, отдираанием (рис. 20, б, в). Оба способа определения адгезионной прочности нашли практическое применение. При первом методе разрушающую нагрузку прилагают в направлении как перпендикулярном к плоскости контакта поверхностей, так и параллельной ей и обычно относят к единице площади поверхности контакта. При втором методе определяют силу, необходимую для расслаивания склейки, ее относят к единице длины. Очень часто адгезию, определяемую при расслаивании, характеризуют не силой, а работой, которую необходимо затратить на отделение адгезива от субстрата.

Отмечено [198], что при использовании метода отрыва не соблюдаются условия перпендикулярного направления отрывающего усилия к микроучасткам поверхности, а для случая расслаивания большая часть работы



ис. 20. Принципиальные схемы приборов для измерения адгезионной прочности:

— для нормального отрыва: 1 — адгезионный; 2 — когезионный; 3 — смешанный; 4 — схема устройства для осуществления отрыва; б — для расслаивания жестких материалов: 1 — внецентричное растяжение; 2 — изгиб для плиточного листового материала; 3 — изгиб для листового материала; 4 — консольный изгиб для листового материала; в — для расслаивания гибких материалов: 1, 2, 3 — от жесткой подложки под углом 90° ; 4 — от жесткой подложки под углом 180° ; 5 — от гибкой подложки; г — для сдвигового разрушения: 1 — при растяжении одностороннего соединения; 2 — то же, двустороннего; 3 — при скатин соединения цилиндра со стержнем; д — для сдвигового разрушения при кручении: 1 — по торцу цилиндров; 2 — по кольцевой поверхности торца полых цилиндров; 3 — по боковой поверхности цилиндра и стержня.

тратится на изгиб отслаиваемой пленки, поэтому использование каждого метода обосновывается состоянием исследуемых тел. При сцеплении двух твердых тел более пригоден метод отрыва, так как в этом случае отсутствие гибкости затруднит углубление краевых трещин. При определении адгезии в эластических склейках наиболее применим метод раздира. Помимо методов отрыва и расслаивания в практике используют метод сдвига, позволяющий определять усилие, необходимое на сдвиг слоев (рис. 20, г, д).

Наиболее часто в адгезиометрах для мясных и молочных продуктов [120, 163] реализуется схема, изображенная на рис. 20, а, она может отличаться способами приложения силы и регистрации отрывающего усилия. Например, в приборе Б. А. Николаева мгновенно отрывается верхний диск с помощью рычажного механизма; в приборе А. Г. Кульмана постепенно отрывается нижний диск при наполнении подвешенной к нему емкости водой [24]. Во всех случаях разделение контактирующих тел может происходить по трем вариантам: адгезионные — по границе раздела продукт — стенка, когезионные — по слою продукта и смешанное (рис. 20, а). Для мясных и молочных продуктов адгезия в чистом виде часто не наблюдается, поэтому измеряют удельное усилие разделения двух тел без конкретизации его вида (рис. 20, а). Полученное значение величины по предложению проф. Б. А. Николаева [124] называют давлением прилипания или липкостью. Это понятие будет использовано при описании соответствующих исследований в дальнейшем.

Универсальный адгезиометр МТИММПа [77], показанный на рис. 21, позволяет менять в широком диапазоне геометрические, кинематические, динамические и другие параметры измерения. Он имеет корпус, устройство с микрометрическим винтом для установки пластин с продуктом и устройство для нагружения и отрыва верхней пластины. Пластина фиксируется держателем, который смонтирован на тензобалке, и имеет хвостовик для обеспечения соосности подвижной части системы. Для создания предварительного контакта на тензобалку устанавливают грузы. В каждой серии опытов тензобалку тарируют, получая зависимость: величина нагрузки — отклонение «зайчика» на осциллограмме.

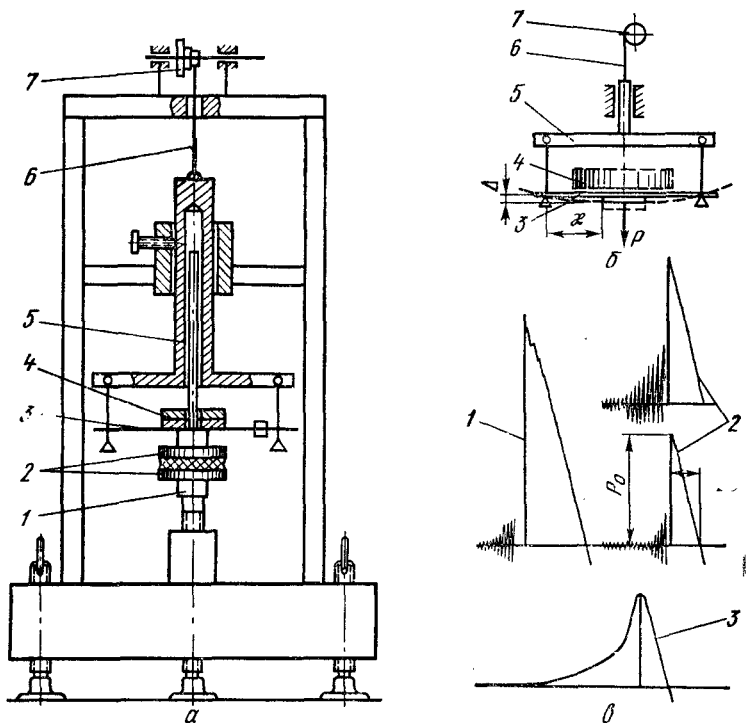


Рис. 21. Стенд для измерения адгезии пищевых продуктов:

a — универсальный прибор; 1 — подъемный столик; 2 — пластины с продуктом; 3 — тензобалка; 4 — грузы для создания предварительного контакта; 5 — поперечина с хвостовиком; 6 — нить; 7 — набор приводных шкивов; *b* — измерительная часть прибора; *в* — осциллограммы нагружения: 1 — при толщине слоя 0,0003 м и продолжительности контакта 300 с; 2 — при толщине слоя 0,0003 м и продолжительности контакта 3 с; 3 — при толщине слоя 0,005 мм и продолжительности контакта 300 с.

Вертикально вверх тензобалка перемещается серьгами, которые оканчиваются призмами и шарнирно укреплены на поперечине с хвостовиком. Последний перемещается во втулке посредством нити и набора шкивов, которые приводятся во вращение от электродвигателя через редуктор (на рисунке условно не показаны). Для увеличения продолжительности отрыва (уменьшения скорости приложения силы) в тянущую систему последовательно можно вставить пружину различной жесткости.

Давление предварительного контакта можно задавать от 300 до $3,5 \cdot 10^5$ Па, основные рабочие пределы составляют от 300 до 6180 Па. Длительность предварительного контакта выбирают произвольно. Для исследования влияния на показания прибора достаточно взять следующие значения: 3, 60, 180, 300, 600 с. Пластины с различной чистотой обработки поверхности и стали Ст. 3, нержавеющей стали 1X18H9T, дюралюминия, чугуна, фторопласта, латуни имеют площади 0,0005; 0,0007; 0,0010; 0,0015 м². При изучении влияния толщины слоя продукта на показания прибора ее изменяют от 0,0003 до 0,003 м. Скорость отрыва верхней пластины от продукта определяют частотой вращения и диаметром шкивов, на которые наматывается тянущая нить. Она составляет 0,00167; 0,00358; 0,0093; 0,0193 м/с. Скорость приложения силы (Н/с) зависит от скорости отрыва и величин деформаций нити, тензобалки и продукта между пластинами. На нее также влияет способ проведения измерения: с разгрузкой до измерения пластин от грузов, обеспечивающих предварительный контакт, или без разгрузки.

На рис. 21, а, б изображены типичные осциллограммы записи процесса отрыва, из которых видно, что сила нарастает линейно, скорость нарастания характеризуется тангенсом угла наклона линии. Липкость рассчитывают по нагрузке, соответствующей пику на линии нагружения. После отрыва тензобалка имеет колебательные движения, что также записывается на осциллограмме. Если между пластинами находится пластично-вязкий продукт, например колбасный фарш (рис. 21, б), то линия срыва может быть не вертикальной, а наклонной, что в большей мере проявляется при увеличении толщины слоя продукта. Это объясняется наличием перемычек продукта между пластинами после их разрыва.

Коэффициент внешнего трения для машиностроительных материалов изучен довольно подробно как экспериментально, так и теоретически. При этом для объяснения трения металлов и высокоэластичных полимеров используют молекулярно-кинетическую теорию, основы которой для жидкого состояния разработаны Я. И. Френкелем.

Классический тип прибора для измерения коэффициента внешнего трения представляет собой пару тел, со-

прикасающихся плоскими поверхностями, площадь которых может быть от долей квадратных миллиметров до десятков квадратных сантиметров. Одно из тел смещается относительно другого (рис. 22). Для малых скоростей трения используют прямолинейное смещение поверхности. При больших скоростях смещения в качестве одной из рабочих поверхностей применяют поверхность горизонтального диска, вращающегося на вертикальном валу; боковую поверхность вращающегося цилиндра, поверхность бесконечной ленты, вращающейся на двух барабанах с параллельными осями, и т. д. Для сыпучих материалов определяют угол естественного откоса [8].

На внешнее трение влияют те же факторы, что и на липкость. Следовательно, статическое трение должно быть больше динамического (рис. 23). При первоначальном сдвиге часть усилия расходуется на выход частиц или молекул одного тела из неровностей или молекулярных ям другого, остальное — на разрыв молекулярных и других контактов, которые во время движения не успевают полностью восстанавливаться. Достаточно малая скорость относительного движения трущихся тел может вызывать скачки, т. е. прерывистость движения: тело переходит из одного статического положения в другое, где вновь образуются контакты с поверхностью скольжения. При больших скоростях и неизменном состоянии поверхности скольжения подобные эффекты обычно не наблюдаются.

Для исследования трения мясopодуKтоB был использован трибометр с тележкой (рис. 22, а), позволяющий определить и вычислить истинный и эффективный коэффициенты внешнего трения [165]. Исследуемый продукт помещают в рамку, установленную на плоскую поверхность тележки, перемещающейся от электродвигателя посредством тянущей нити. Для изменения скорости тележки имеется четырехступенчатый шкив, на который наматывается нить. Рамка соединена с тензобалкой; запись изменения электрического сигнала при деформации тензодатчика производится на ленте осциллографа и по тарировочным кривым переводится в усилие (см. рис. 23). Прибор позволяет менять геометрические (размер площади поверхности контакта, чистоту обработки поверхности и пр.), кинематические

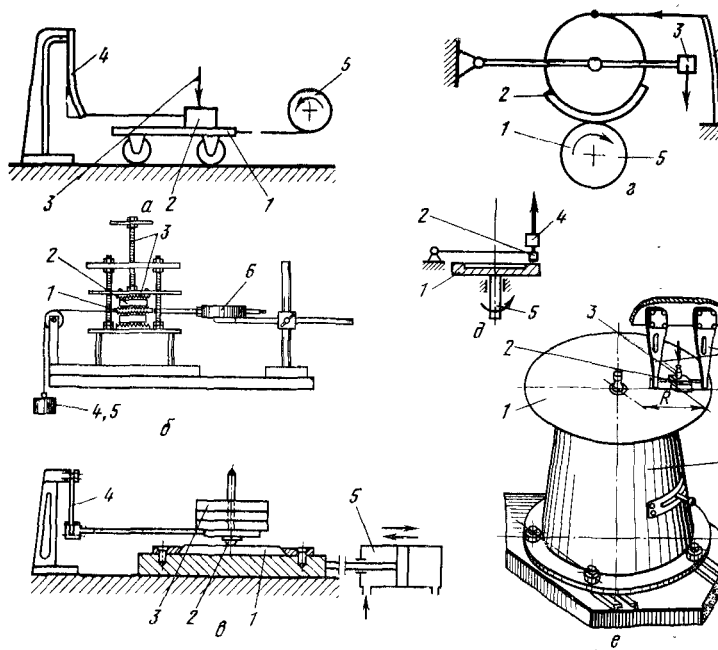


Рис. 22. Схемы приборов для измерения коэффициента внешнего трения при малых и высоких скоростях движения продукта:

a — трибометр с тележкой и электроприводом; *б* — трибометр с параллельным смещением пластины и приводом от падающих грузов; *в* — трибометр с приводом от гидроцилиндра; *г* — трибометр проволоочного типа; *д* — кинетический адгезиометр — трибометр; *е* — трибометр дискового типа: 1 — материал, которому определяется трение продукта; 2 — исследуемый продукт (или продукт); 3 — устройство для создания давления контакта; 4 — устройство для измерения силы трения и отрыва (тензометрическое или грузозовое); 5 — система привода; 6 — устройство для измерения перемещения (индикатор).

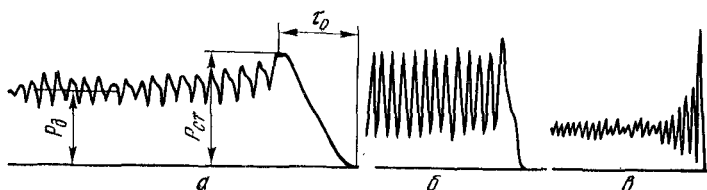


Рис. 23. Типичные осциллограммы трения:

a — измельченная на волчке говядина по сухой поверхности; *б* — то же, смоченной поверхности; *в* — говядина по сухой поверхности (скорость скольжения соответственно: 0,00547; 0,0171; 0,0513 м/с.)

(скорость смещения тележки, время предварительного контакта и пр.) и динамические (давление предварительного контакта, скорость нарастания силы и пр.) факторы. На тележку могут быть установлены пластины из различного материала.

Привод пластины от груза с подпрессовкой образцов винтовым механизмом (рис. 22, б) реализован в устройстве Н. Н. Мозенина [210] для изучения характеристик твердых продуктов, например сыра. Смещение пластины измеряют индикатором часового типа. Прибор можно использовать для измерения как внешнего трения, так и вязкости при малых градиентах скорости. Несколько видоизмененный прибор этого типа был использован для динамических исследований при вибрационных воздействиях, направленных параллельно плоскости сдвига [210].

Устройство (рис. 22, в) с приводом подвижной части от гидроцилиндра и регистрацией усилий с помощью тензометрической балки применяют для изучения трения при малой поверхности контакта и значительных нормальных усилиях [163]. При измерении больших усилий трения система гидропривода имеет преимущества по сравнению с электроприводом (см. рис. 22, а), кроме того, гидропривод обеспечивает бесступенчатое регулирование скорости.

Модифицированный прибор Б. В. Дерягина и др. можно использовать для изучения фрикционных свойств масел [63]. Если в зоне контакта цилиндров по окружности установить проволоку, то можно обеспечить давление контакта до $1,5 \cdot 10^9$ Па; при установке пластины давление контакта можно варьировать в широких пределах. Исследуемый продукт наносят на поверхность вращающегося цилиндра. Давление контакта обеспечивается от цилиндра с грузовым рычагом. При вращении цилиндра в зоне контакта возникает сила трения, которая поворачивает в верхний цилиндр и через нить вызывает деформацию тензобалки.

А. С. Ахматов и Ю. В. Ашкеров [6, 7] провели интересные исследования трения и кинетической адгезии смазочных масел к стали. В приборе ползун, установленный на масляной пленке, отрывается от вращающегося диска нормально, усилие отрыва измеряют по деформации тензобалки (рис. 22, д).

Трение мяса по стали [139] изучали на специально сконструированной установке (рис. 22, *e*). Диск приводится во вращение от электродвигателя постоянного тока, частоту вращения его можно плавно регулировать, обеспечивая окружную скорость в месте контакта с продуктом от 0,1 до 72 м/с. Исследуемый продукт помещали в рамку, укрепленную на двух тензобалках; служат для измерения силы трения. Модернизированный тип прибора имеет ванну для охлаждения диска.

Методика проведения экспериментов на адгезиометрах и кометрах кратко сводится к следующему: подготовка прибора и электронной аппаратуры к измерениям; выбор параметров, которых следует проводить эксперименты; подготовка образцов и установка на приборе и измерения. Поскольку на адгезию и трение влияет множество факторов, следует заранее разработать план всех экспериментов и в каждой серии опытов менять по три фактора при постоянных остальных. Зависимость адгезии и трения при некоторых условиях измерения от варьируемых факторов может оказаться незначительной и лежать в пределах ошибки эксперимента. Тогда условия измерения следует изменить и подобрать их экспериментально так, чтобы изучаемая зависимость была бы явно выражена.

ГЛАВА III

СДВИГОВЫЕ СВОЙСТВА МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

СДВИГОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Твердообразные продукты (мясные фарши, творожные массы и пр.) характеризуются предельным напряжением сдвига, поэтому их свойства рассматривают обычно в области напряжений, меньших предельного, и в области напряжений, превышающих предельное.

Структурно-механические свойства в области практически неразрушенных структур. Эти свойства [33] можно характеризовать законом Гука. Деформация остается постоянной во времени, а после снятия напряжения мгновенно и полностью исчезает (рис. 24). Модуль мгновенной упругости, например сосисочного фарша, для этой зоны составляет $1,23 \cdot 10^4$ Па. При увеличении напряжения наблюдается процесс упругого последействия, который после снятия напряжения сопровождается мгновенным уменьшением деформации на величину начальной $\varepsilon_0 = 8,35 \cdot 10^{-3}$, а затем постепенным уменьшением деформации до нуля. Переход от упругих деформаций к процессу упругого последействия наблюдается при напряжениях, превышающих предел упругости, лежащей в интервале 100—150 Па. Модуль сдвига упругого последействия $G_3 = 0,8 \cdot 10^4$ Па по кривой 2 составляет

$$G_3 = \frac{\theta_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_0}, \quad (\text{III}-1)$$

где ε_2 — полная величина замедленно развивающейся (эластической) относительной деформации.

Для расчета модуля сдвига в этой зоне можно пользоваться теоретической формулой, выведенной П. А. Ребиндером [148] на основе термодинамических представлений:

$$G_3 = \frac{2ckT}{\rho\delta^3}, \quad (\text{III}-2)$$

где c — концентрация дисперсной белковой фазы, кг/м³ (140);
 k — постоянная Больцмана, Дж/К ($1,38 \cdot 10^{-23}$);

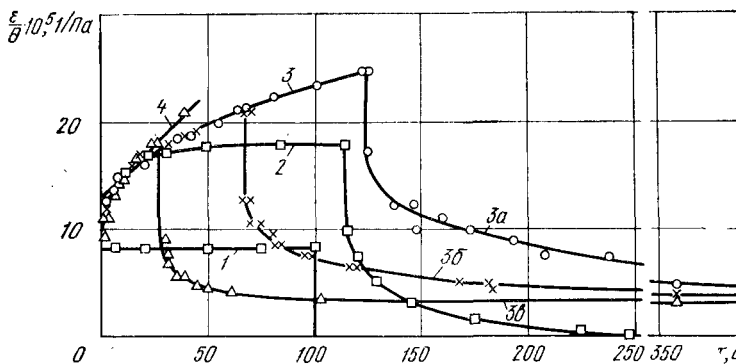


Рис. 24. Кинетические кривые развития сдвиговых деформаций сосисочном фарше при напряжениях:

1 — 102,5 Па; 2 — 154; 3а — 225; 3б — 266; 3в и 4 — 306 Па.

T — абсолютная температура, К (300);

ρ — плотность молекул, кг/м³ (1000);

δ — эффективный диаметр молекул, м (по В. А. Пчелину [145]

50 Å, т. е. $50 \cdot 10^{-10}$ м).

При применении формулы (III—2) для определения модуля сдвига фарша следует иметь в виду, что концентрация белков в жидкостных прослойках отличается от общей концентрации сухих веществ и размер белков зависит от степени их деструкции при механической обработке мяса. Расчетная величина модуля $0,9 \cdot 10^4$ Па близко совпадает с определенной экспериментальной (III—1).

При дальнейшем увеличении напряжения наблюдается ползучесть (кривые 3). После снятия напряжения деформации сначала уменьшаются мгновенно на величину начальной, а затем постепенно до некоторой остаточной величины, которая для всех напряжений (кривые 3а, 3б, 3в) при одном и том же времени после разгрузки постоянна. При наибольшем напряжении (кривая 4), близком к пределу текучести, происходит частичное разрушение структуры и начинается пластично-вязкое течение с малым градиентом скорости. Оно характеризуется наибольшей эффективной вязкостью (около $5 \cdot 10^5$ Па·с). Эффективная вязкость, соответствующая состоянию ползучести, имеет величину, примерно в 3 раза большую ($16 \cdot 10^5$ Па·с), так как течение

продукта происходит практически без разрушения структуры.

Результаты экспериментов, проведенных по описанной выше методике (см. рис. 24), позволили вычислить спектр распределения периодов релаксаций деформаций при различных, но постоянных для каждого опыта напряжениях сдвига. Расчеты могут быть выполнены по методике проф. В. Е. Гуля [61], которая сводится к следующему. На графике $\ln \varepsilon = f(\tau)$ по рис. 25 экстраполяцией прямолинейного участка кривой до $\tau=0$ находим ε_1 , а по углу наклона прямой τ_{θ_1} — первый наибольший период релаксации деформации при постоянном напряжении. Далее эта операция повторяется несколько раз;

$$\ln(\varepsilon - \varepsilon_1) = f(\tau),$$

$$\ln[(\varepsilon - \varepsilon_1) - \varepsilon_2] = f(\tau) \text{ и т. д.}$$

Аналогично для каждого графика определяют ε_2 и τ_{θ_2} , ε_3 и τ_{θ_3} и т. д. При этом время, для которого реализуется один из периодов релаксации, будет увеличиваться. Названные графики описываются уравнением

$$\varepsilon - \varepsilon_i = \varepsilon_{i+1} \exp\left(\frac{\tau}{\tau_{\theta}}\right) = a \cdot 10^{-b} \theta \exp\left(\frac{\tau}{\tau_{\theta}}\right), \quad (\text{III}-3)$$

где a — эмпирический коэффициент.

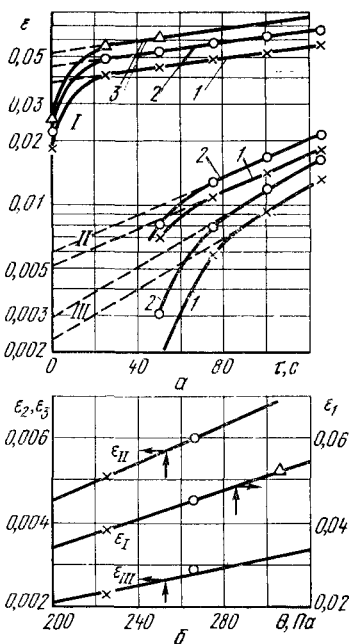


Рис. 25. Спектр распределения периодов релаксаций деформаций:

a — зависимость относительных деформаций от длительности действия напряжений: I — кинетические кривые деформаций, II , III — соответственно первые и вторые разности при различных напряжениях сдвига; 1 — 225 Па; 2 — 266; 3 — 306 Па; b — зависимость экстраполированных к нулю значений деформаций от напряжения сдвига (индекс соответствует номеру операции и цифрам на рис. 25, a).

Ошибка при вычислениях по уравнению (III—3) превышает $\pm 4\%$. Значения коэффициента a и период релаксации приведены ниже.

τ , с, более	25	50	75	100
a	17,0	4,8	2,25	1,05
τ_0	310	150	97	72

Обобщение всех этих данных дает расчетную зависимость

$$\epsilon - \epsilon_t = 0,115\tau^{-2\theta} \exp\left(\frac{\tau}{7300\tau^{-1}}\right), \quad (\text{III—})$$

которая справедлива в исследованном диапазоне изменения переменных. Отклонение экспериментальных значений от вычисленных лежит в пределах $\pm 12\%$. Экспоненциальный член в уравнении (III—3, a) включает себя период релаксации, который зависит от длительности действия напряжения, но не от его величины $\tau_0 = 7300\tau^{-1}$ (ошибка $\pm 6\%$).

Особенностью кривых, изображенных на рис. 24, является то, что они выходят из одной точки на оси ординат: $8,15 \cdot 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$. Это показывает, что при мгновенно приложенных напряжениях (до 300 Па) фарш будет подчиняться закону Гука, а остаточные деформации после снятия напряжения равны нулю.

Описанные результаты получены по экспериментальным данным для малых относительных деформаций при абсолютных деформациях до $170 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ в области начала лавинного разрушения структуры. В качестве измерительного прибора использован ротационный вискозиметр РВ-8, приспособленный для этих опытов.

Структурно-механические свойства от начала течения до предельного разрушения структуры. Эти свойства характеризуются эффективной, пластической вязкостью и предельным напряжением сдвига. Поскольку их определяют при сравнительно высоких градиентах скорости и напряжениях сдвига, они наиболее существенны по сравнению с другими для расчета перемещения продуктов в рабочих органах машин и аппаратов и, кроме того, более глубоко характеризуют внутреннюю структуру объекта, т. е. его качественные показатели.

Следует отметить, что три названные характеристики для области лавинного разрушения структуры, так же как и характеристики для области практически

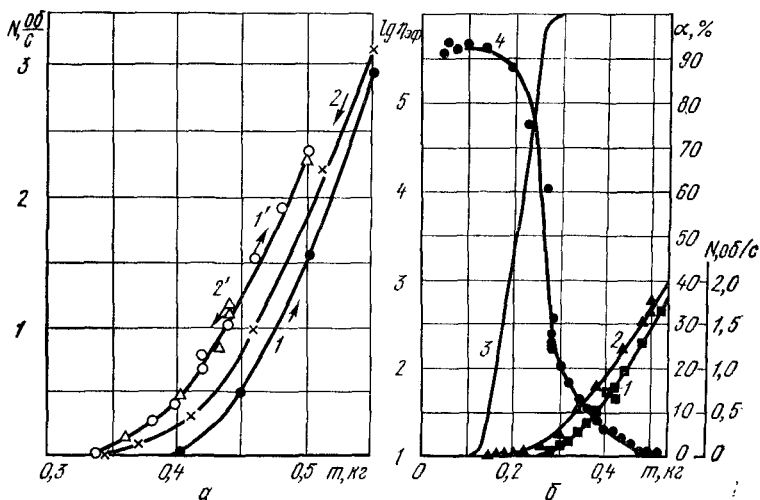


Рис. 26. Типичные зависимости изменения реологических характеристик:

a — глиняной пасты с относительной влажностью 0,65; *b* — фарша сосисок свинных; 1—1' — реограмма при нагрузке; 2—2' — то же, при разгрузке; 3 — степень разрушения структуры; 4 — эффективная вязкость.

разрушенных структур, соответствуют определенной модели реального тела [см. уравнения (I—31) и (I—32)]. Для другой математической модели тела физические величины, характеризующие его поведение в процессе деформирования, могут быть иными. В реологии полимеров, торфа, глинистых и строительных растворов, смазок, битумов и других материалов таких величин для описания деформационного поведения материалов множество.

На рис. 26 приведены типичные интегральные реологические зависимости течения фарша, кривые степени разрушения структуры и эффективной вязкости. Представляют интерес зависимости частоты вращения ротора вискозиметра в секунду (градиент скорости) от массы сдвигающих грузов (напряжение сдвига) для не полностью разрушенной (1) и разрушенной (2) структуры (по петле гистерезиса). Они являются продолжением кривой 4 (см. рис. 24), но для больших деформаций. Кривые 1 и 2 показывают, что для неразрушенной структуры предельное напряжение сдвига выше, а пла-

стическая вязкость несколько меньше, чем для раз-
 шенной. Это, как правило, характерно для всех тон-
 измельченных фаршей. Расчет величин реологическ
 свойств по кривым 1 и 2 (рис. 26, б) выполнен по фо
 муле (II—39) и приведен в табл. 10. Значения пост
 янных для этого опыта следующие: $t=16,5^{\circ}\text{C}$; $K_0=0,079$ м; $K=35,2$; $K_0=1480$; $K_1=8,15 \cdot 10^{-4}$; $K_2=0,0$

Таблица 1

m	N	$\frac{\theta_0}{N}$	$\frac{m}{m_0}$	$F\left(\frac{m}{m_0}\right)$	η
-----	-----	----------------------	-----------------	-------------------------------	--------

Кривая 1 (см. рис. 26, б)

0,275	0,02005	$1,845 \cdot 10^4$	1,10	0,00037	6,83
0,300	0,0731	$5,061 \cdot 10^3$	1,20	0,00140	7,09
0,350	0,2565	$1,442 \cdot 10^3$	1,40	0,00505	7,28
0,400	0,562	$6,583 \cdot 10^2$	1,60	0,01034	6,80
0,450	0,950	$3,894 \cdot 10^2$	1,80	0,01688	6,57
0,500	1,400	$2,643 \cdot 10^2$	2,00	0,02441	6,45
0,525	1,640	$2,256 \cdot 10^2$	2,10	0,02849	6,43

Кривая 2 (см. рис. 26, б)

0,215	0,0123	$2,358 \cdot 10^4$	1,10	0,00037	8,72
0,254	0,0995	$2,914 \cdot 10^3$	1,30	0,00299	8,71
0,294	0,249	$1,165 \cdot 10^3$	1,50	0,00752	8,75
0,335	0,460	$6,304 \cdot 10^2$	1,71	0,01382	8,71
0,392	0,815	$3,558 \cdot 10^2$	2,00	0,02441	8,68
0,480	1,465	$1,979 \cdot 10^2$	2,45	0,04409	8,72
0,510	1,710	$1,696 \cdot 10^2$	2,60	0,05139	8,71

Массы грузов, входящие в расчетные формулы, им
 ют величины для кривой 1 $m_0=0,250$ кг, $m'=0,338$ к
 для кривой 2 $m_0=0,196$ кг, $m'=0,260$ кг. Значения ре
 логических свойств продуктов, вычисленные по даннь
 рис. 26, приведены в табл. 11.

Из анализа кривых (см. рис. 24 и 26) видно, ч
 фарш можно рассматривать как твердообразную сист
 му, имеющую упруго-пластично-вязкие свойства и опр
 деленную пространственную структуру. Последняя п
 своему характеру относится к коагуляционной, что по
 тверждают результаты микроскопических исследований
 [152].

Рисунок	Кривая	Предельное напряжение сдвига Па	Пластическая вязкость, Па·с
26, а	1	640	1,9
	2	530	2,3
26, б	1	370	6,8
	2	290	8,7

Реограммы (см. рис. 26) образуют петли гистерезиса, объясняемые отсутствием равновесия при замерах в связи с постепенным разрушением структурной сетки. Каждому значению градиента скорости соответствует определенное равновесное состояние системы, которое наступает при медленных его изменениях [67]. А. А. Багров [9] рассматривает гистерезисные явления по развиваемой удельной мощности (она пропорциональна площади между реограммой и осью ординат). Прохождение участка кривой вверх — вниз (по напряжениям) позволяет получить равновесные значения напряжения и градиента скорости (кривая 2, рис. 26) для соответствующей степени разрушения структуры. Равновесные величины на вискозиметре РВ-8 получаются в том случае, если за время между измерениями структура не успевает существенно упрочниться и разница между прикладываемыми напряжениями в двух следующих один за другим замерах незначительная. Обобщают гистерезисные явления криволинейные поверхности зависимости эффективной вязкости от напряжения сдвига и длительности его приложения.

По кривой 4 (см. рис. 26) можно вычислить степень разрушения структуры — кривая 3, уравнение (I—41). Верхний участок кривой 4 показывает значения эффективной вязкости в области практически неразрушенных структур. Далее при увеличении напряжения сдвига начинается лавинное разрушение структуры. В этом же интервале кривая 3 резко возрастает, стремясь к 100%. Дальнейшее увеличение напряжения (выше предельного) вызывает более медленное уменьшение эффективной вязкости (нижний участок кривой 4). Подобный вид имеют зависимости эффективной вязкости от градиента скорости.

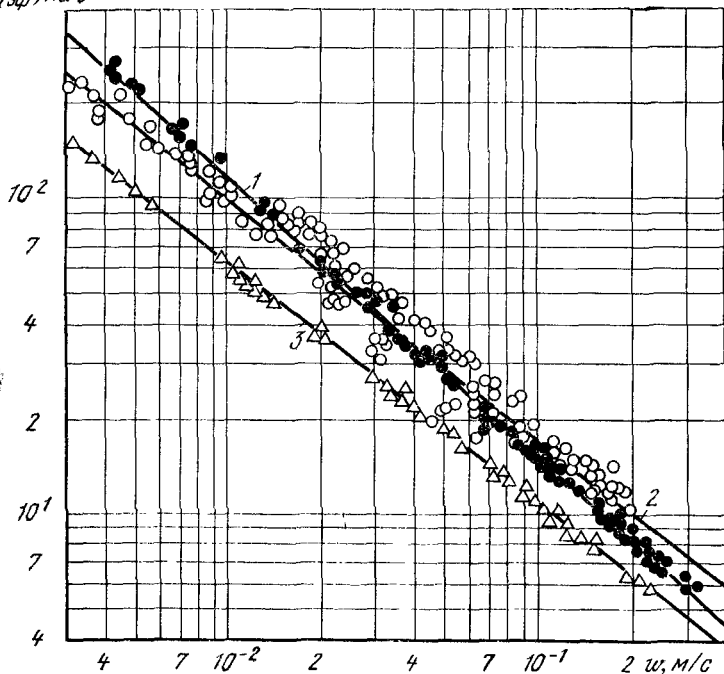


Рис. 27. Зависимость от окружной скорости вращения ротора эффективной вязкости:

1 — глиняной пасты с относительной влажностью 0,65; 2 — фарша свиных сосисок; 3 — фарша русских сосисок.

Зависимость между эффективной вязкостью и скоростью боковой поверхности ротора вискозиметра, которая пропорциональна градиенту скорости, в логарифмических шкалах изображена прямой линией (рис. 27) и может служить основной характеристикой при расчете рабочих органов машин и аппаратов в интервале от предельного напряжения сдвига до напряжения, соответствующего предельному разрушению структуры. Таким образом, движение с развитым градиентом скорости начинается при напряжениях, превышающих предельное, и во всей области имеется степенная зависимость между эффективной вязкостью и скоростью [41]. Такая зависимость обосновывается уравнениями (I—40). Не-

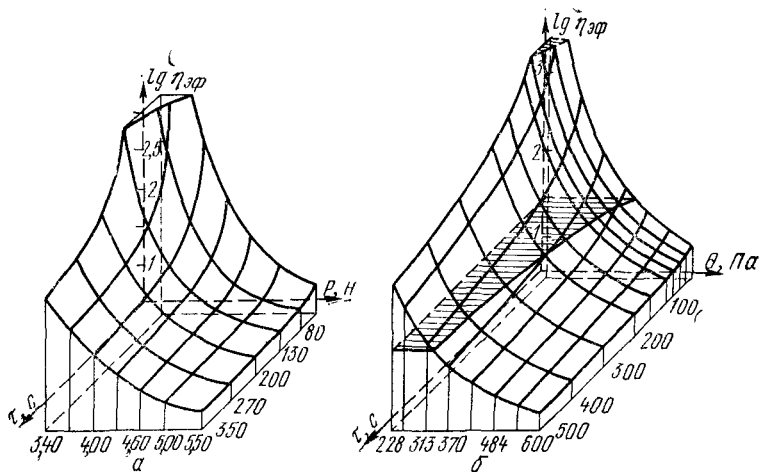


Рис. 28. Зависимость от напряжения сдвига и длительности его приложения логарифма эффективной вязкости:

а — глиняной пасты; б — фарша русских сосисок.

сколько позже, исходя из молекулярно-кинетической теории, Г. М. Бартенев и Н. В. Ермилова [12] дали фундаментальное теоретическое обоснование уравнениям типа (I—39), (I—40).

Параллельно поставленные опыты не дают точного воспроизведения величин реологических свойств, о чем можно судить по отклонениям экспериментальных точек от равновесной кривой (см. рис. 27). Обычно точки образуют семейство параллельных линий. Это в большей мере проявляется у фарша, в меньшей — у глины, для которой воспроизводимость опытов практически полная.

На графике в трехмерной системе координат (рис. 28), построенном по данным рис. 26, 27, однозначно связаны эффективная вязкость, сдвигающее напряжение и общая длительность его приложения. Таким образом, при известной длительности приложения напряжения можно определить эффективную вязкость. Проекции кривых, полученных при постоянных времени или сдвигающем усилии, на соответствующие координатные плоскости дают семейство кривых, которые поз-

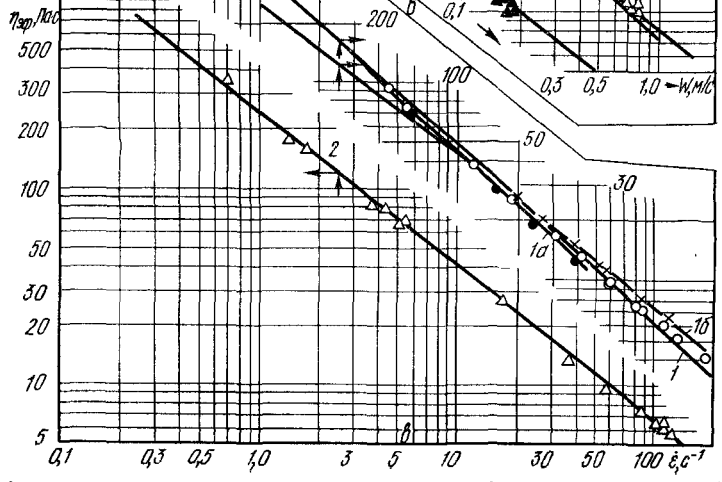
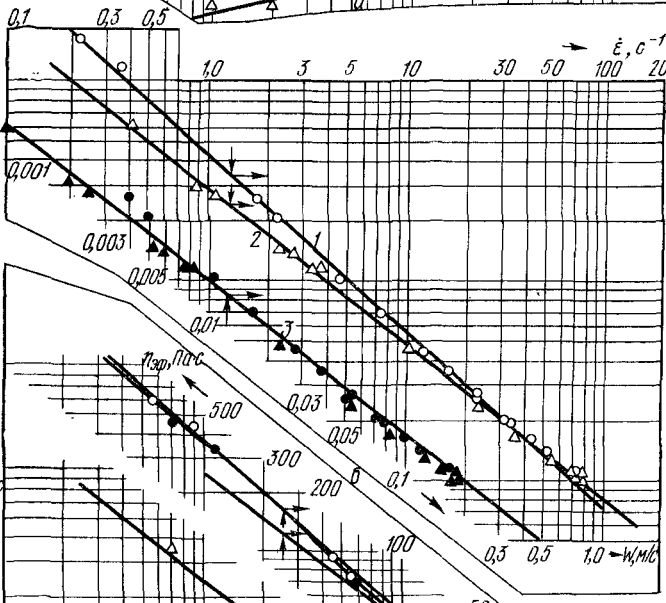
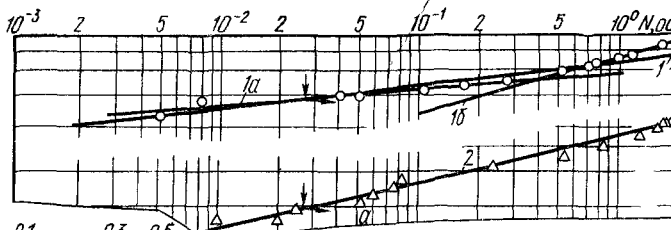


Рис. 29. Логарифмические зависимости реологических характеристик, полученных на вискозиметре РВ-8 для свиных сосисок, от кинематических факторов (см. табл. 12):

a — реограммы; *b* — эффективная вязкость, вычисленная по уравнениям квази-ньютоновской жидкости; *v* — эффективная вязкость, вычисленная по уравнениям степенной жидкости; *γ* — при нагружении системы (*1a* — область до начала лавинного разрушения структуры; *1b* — область лавинного разрушения структуры); *2* — при разгрузке системы; *3* — зависимость от окружной скорости ротора.

воляют обобщить данные при различных условиях проведения опыта.

Криволинейные поверхности течения объясняют важную особенность движения фарша — способность во время движения изменять величины реологических свойств. Например, в насосе фарш подвергается кратковременному воздействию высоких напряжений и его эффективная вязкость резко уменьшается. Затем фарш поступает в трубу, где напряжение сдвига меньше, чем в насосе, поэтому эффективная вязкость увеличивается во времени за счет проявления эластичных свойств измельченной ткани мяса и тиксотропного восстановления структуры. В какой-то момент ее значение достигнет величины, при которой создаваемое насосом давление в данном месте не сможет продавить фарш через трубу вследствие возрастания гидравлических сопротивлений. Произойдет заклинивание трубы, насос же, продолжая подавать фарш, вызывает его сжатие в трубе до места заклинивания. Наконец, упругие силы становятся достаточными для продвижения фарша и произойдет истечение порции, т. е. подача будет пульсирующей. Косвенно учитывая фактор времени, это явление можно описать кривой, изображенной на рис. 27: при высоких скоростях смещения в насосе эффективная вязкость мала, при небольших скоростях в трубе велика. Следовательно, и напряжение, необходимое для транспортировки, возрастает. Равномерное движение фарша по трубе с малыми скоростями возможно в том случае, когда касательные напряжения в рабочем органе насоса меньше, чем в транспортирующей трубе.

Пример графо-аналитической обработки этих же данных по методике, изложенной в главе II, наглядно показан на рис. 29. Обработка существенно упрощается, если формулу (II—49) представить в виде зависимости массы грузов от частоты вращения (II—49а). Тогда по

реограммам в логарифмических координатах легко определить индекс течения и вязкостной коэффициент B_m , который связан с коэффициентом B^* формулы (II—49) соотношением

$$B^* = B_m K_0. \quad (\text{III—})$$

Далее по формуле (II—50) следует вычислить эффективную вязкость при единичном значении градиент скорости. На рис. 29, *a, в* кривая 1 аппроксимирована тремя прямыми: 1 — по всем экспериментальным точкам, 1*a* — по точкам в области до начала лавинного разрушения структуры и 1*б* — в области лавинного разрушения структуры. Аналогично кривую 2 можно аппроксимировать, но первая зона менее протяженная. Кривая 3, которая характеризует зависимость эффективной вязкости от окружной скорости вращения ротора [41], удовлетворительно аппроксимирует все экспериментальные точки по двум первым кривым. Представляет интерес, что в области лавинного разрушения структуры (кривые 1*б*, 2, 3) индекс течения и темп разрушения структуры постоянны. Если гистерезисные явления незначительны, то экспериментальные данные, полученные при нагрузке и разгрузке, можно обобщать совместно. В этом смысле предложенный ранее автором метод [41] обобщения по окружной скорости вращения ротора обычно дает хорошие результаты (кривая 3).

Реологические характеристики, полученные различными способами (по традиционным формулам и выведенным здесь впервые), представлены в табл. 12 на основе экспериментальных данных рис. 29.

С учетом изложенной выше методики можно легко сопоставить все константы и освоить последовательности выполнения расчетов. Выбор той или иной модели течения при обобщении опытов решается экспериментально в зависимости от применимости полученных результатов для дальнейшего использования. Следует ожидать, что такой подход к ротационной вискозиметрии исключит полемику между сторонниками различных методов изучения реологических свойств пищевых продуктов. При этом существенно, чтобы исходные математические модели течения были одинаковы.

Таким образом, для одного типичного примера раскрыта сущность нескольких способов обобщения данных ротационной вискозиметрии.

Номер кривой рис. 29	Коэффициенты и номер формулы, по которой они вычислены									
	Bn , кг·с ² [уравнение (II-49a)]	B^* , кг·м ⁻¹ ·с ² [уравнение (II-49)]	$B_{осг}^*$, кг·м ⁻¹ ·с ⁻¹ [уравнение (II-50)]	n [уравнение (II-49a)]	B , Па·с [уравнение (II-44)]	B_0^* , Па·с [уравнение (II-30), (II-37), (I-39)]	K , м ⁻¹ ·с ⁻² [уравнение (II-40)]	$B_{осг}^*$, Па·с [уравнение (II-53), (II-136), (II-57)]	m [уравнение (I-38)]	$K_{сг}$, м ⁻¹ ·с ⁻² [уравнение (II-53), (II-56)]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Рис. 29, а				Рис. 29, б			Рис. 29, в		
1	0,434	642	362	0,12	—	430	35,2	364	0,88	12,9
1а	0,387	573	365	0,09	—	—	35,2	367	0,91	9,8
1б	0,458	676	253	0,23	—	320	35,2	254	0,77	20,5
2	0,450	650	243	0,23	—	290	35,2	244	0,77	20,5
3	—	—	—	—	2,8	—	35,2	—	0,77	—

Примечание. Величины по графам 5, 10, общие для всех зависимостей, приведенных на рис. 29.

Таблица 13

Продукт	Предельное напряжение сдвига, Па	Пластическая вязкость, Па·с	Коэффициенты к уравнению (II-44), (I-39)		
			B	B_0^*	m
Госвядина куттерованная	700	18—20	6,1	510	0,73
Свинина полужирная куттерованная	650	19—22	6,0	480	0,72
Колбаса					
любительская	700	18—28	5,0	610	0,79
докторская	540	16—19	4,3	430	0,75
чайная	500	—	3,5	430	0,79
ливерная					
при 30°С	2200	—	6,0	780	0,80
» 60°С	100	—	3,0	390	0,80
Сосиски свиные	450	9—11	3,0	320	0,77
Котлеты	400	9—14	3,5	360	0,76
Сырковая масса	800	22	5,5	390	0,70
Особая творожная масса	100	15—25	2,7	105	0,60
Глина влажностью 0,65	315	—	1,6	320	0,87

Значения основных структурно-механических свойств производственных композиций ряда мясных и молочных продуктов приведены в табл. 13 [33, 120].

Они получены для области лавинного разрушения структуры, т. е. при напряжениях сдвига больше предельного. Результаты экспериментов обработаны по традиционной методике [26, 41, 45] и учитывают также показатели, измеренные с помощью конического пластометра и сдвигомера с трубкой.

Следует иметь в виду, что значения для производственных композиций могут отличаться от значений, указанных в табл. 13: для предельного напряжения сдвига до $\pm 15\%$, единичной вязкости до $\pm 7\%$, темпа разрушения структуры до $\pm 3\%$. Это обусловлено различной степенью механической обработки, влажностью и другими факторами, так как состав и готовность фарша определяет оператор; основываясь на своем опыте в связи с отсутствием для этих целей объективных экспресс-методов.

В таблице видно, что величины структурно-механических свойств различных видов фарша отличаются довольно существенно. Имеются перспективные попытки [32] все виды фарша разделить на три группы, объединив в каждой группе те виды фарша, величины реологических свойств которых мало отличаются друг от друга. Эти свойства в определенной мере характеризуют качественное состояние структуры продукта, т. е. его химический состав (влажность, жирность, содержание говядины и свинины и пр.), степень механической обработки и пр. [42, 43, 49, 160]. Причем, величины свойств, определенные в области лавинного разрушения структуры, более наглядно и глубоко отражают внутреннюю сущность объектов по сравнению с реологическими свойствами, измеренными в области практически неразрушенных структур, так как высокие напряжения всесторонне проявляют особенности продукта.

Таким образом, данные табл. 13 содержат необходимые значения величин структурно-механических свойств для расчета перемещения продуктов в рабочих органах машин, а также для оценки некоторых технологических показателей. Следует отметить, что в обобщенную табл. 13 не вошли показатели ряда других продуктов [85, 107, 130 и пр.], так как по методике обобщения они

несколько отличаются от данных, приведенных в этой таблице. Названные продукты рассмотрены отдельно в следующих разделах книги.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Мясные фарши

Влияние температуры [43, 50]. Реологические свойства фарша изучали в пределах температур от 2 до 35° С, которую измеряли термомпарами, вмонтированными в стакан вискозиметра РВ-8. В процессе технологического цикла температура колебалась от 2 до 20° С (рис. 30), но при термообработке она достигала 70—80° С. За верхний исследованный предел взята температура 35° С, которая примерно соответствует началу денатурации белков, и фарш из пластично-вязкого состояния переходит в упругое. При измерении эффект начала денатурации выражается в разрыве сплошности фарша и проскальзывании ротора по нему.

Анализ реограмм показывает, что увеличение температуры вызывает снижение значений всех реологических свойств, за исключением темпа разрушения структуры. С повышением температуры связи в водно-белково-солевых прослойках ослабляются за счет уменьшения вязкости растворителя и более интенсивного теплового движения молекул. Это ведет к ослаблению прочности структуры в целом. Кроме того, на температурные изменения прочности структуры, по-видимому, влияют, также диффузионно-осмотические процессы. Отношения вязкости фарша при различных температурах примерно равны отношениям вязкости воды при этих же температурах. Так, при температуре от 25 до 35° С отмеченная пропорциональность сохраняется в меньшей мере, например при 2 и 23° С отношение вязкости воды 1,78, фарша русских сосисок — 1,70; при 2 и 35° С соответственно — 2,32 и 2,56.

Увеличение темпа разрушения структуры при 2—23° С обусловлено более быстрым разрушением структуры (ее прочность уменьшается); уменьшение темпа при 25—35° С — началом проявления денатурационных

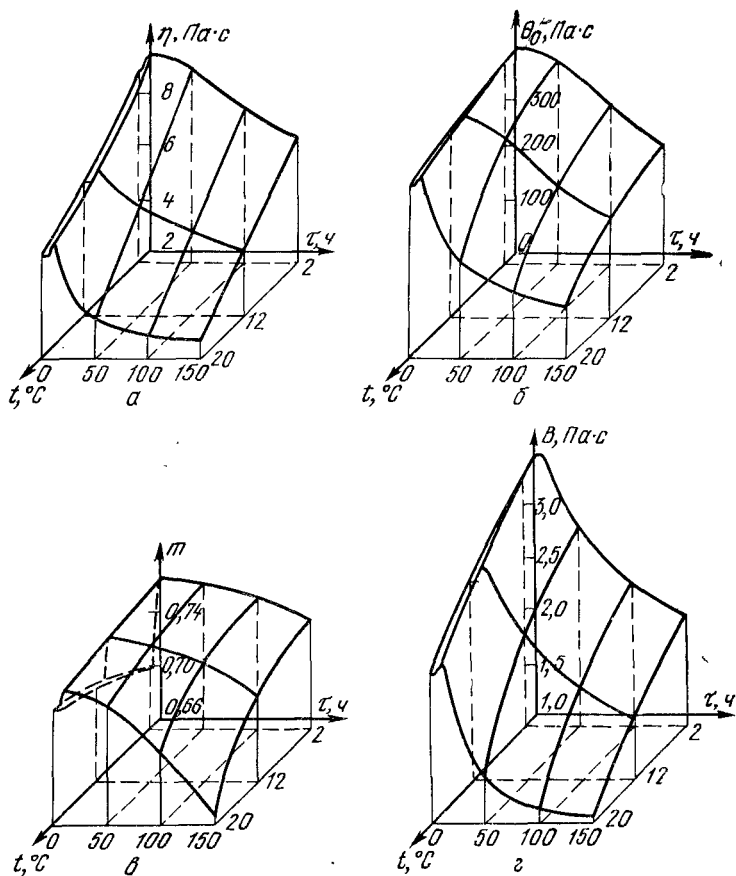


Рис. 30. Зависимость от длительности старения и температуры реологических свойств фарша докторской колбасы:

a — пластической вязкости; *б* — предельного напряжения сдвига; *в* — темпа разрушения структуры; *г* — эффективной вязкости при единичной скорости.

процессов, которые препятствуют разрушению структуры.

Температурные зависимости изменения структурно-механических свойств фарша в интервале 2—23°С при малой продолжительности его выдержки аппроксимированы прямыми с ошибкой, не превышающей $\pm 3\%$ (см.

рис. 30). Аналогичная аппроксимация вязкости воды дает такую же ошибку.

Влияние концентрации водородных ионов (рН). Проф. Р. Хамм с сотрудниками [207] установил, что при рН около 5 достигается определенный минимум текучести (вязкости, предельного напряжения сдвига и пр.). При добавлении к фаршу соляной кислоты этот минимум сдвигается в сторону меньшего значения рН. При изменении рН на единицу в сторону увеличения или уменьшения от значения, соответствующего минимуму вязкости, ее величины могут возрасти в 4—5 раз. Добавление нейтральной соли (например, поваренной) смещает изоэлектрическую точку лиофильного белка в область меньших значений рН и увеличивает набухание частиц, а также и влагоемкость. При трупном окоченении (1—2 сут) рН уменьшается, что в свою очередь влечет сокращение миофибрилл. При этом в зависимости от начальной величины рН вязкость изменяется неоднозначно.

Для изменения рН в целых тканях мяса в широких пределах (от 5,6 до 7,0) животным перед убоем инъецируют лекарственные препараты (эпинефрин) [190]. Жесткость мышц в процессе тепловой обработки в течение 1 ч при температуре 65 и 90°С снижается примерно в 3 раза с увеличением конечной величины рН от 5,6 до 6,9. При этом потери жидкости уменьшаются линейно, а рН при варке увеличивается, например, у сырого мяса — 5,4, у вареного — 5,8.

Влияние процесса старения — выдержки¹ (τ в ч) на реологические свойства фарша [50]. В первые два часа старения фарша величины его реологических свойств неизменны. В результате выдержки в течение 4—10 ч реограммы становятся более пологими, а реологические характеристики увеличиваются до максимума (см. рис. 30). Таким образом, продолжительность выдержки является критической; при этом заканчивается процесс самопроизвольного упрочнения, влага полностью насыщает все имеющиеся связи.

¹ В производственных условиях продолжительность выдержки ограничена. Однако описанные исследования проведены с целью установления влияния времени выдержки на СМС фарша при длительном хранении.

Дальнейшая выдержка вызывает уменьшение значений всех характеристик, что, по-видимому, объясняется ослаблением структуры или ее элементов под воздействием микробиологических и биохимических процессов. Подобная картина — нарастание и спад прочности во время старения — наблюдается при исследовании геля яичного альбумина [72]. Для неорганических систем, например пасты бентонитовой глины, ослабление прочности структуры не отмечено. Таким образом, наибольшая прочность структуры фарша достигается к 4—10 выдержки. Этот вывод имеет важное значение для подготовки колбасных изделий к термической обработке. Установленная продолжительность старения (2—3 ч) в течение которой величины свойств практически не меняются, позволяет проводить исследования при одинаковых начальных и конечных условиях.

Влияние температуры и продолжительности выдержки на структурно-механические свойства фарша. При комплексных исследованиях влияния на значения структурно-механических свойств фарша температуры и продолжительности выдержки (см. рис. 30) одновременно было определено изменение количества микроорганизмов (рис. 31). Для тонкоизмельченных видов фарша обнаружено во время выдержки три общих периода: упрочнение структуры и логарифмический рост микроорганизмов; ослабление структурных связей и логарифмический или экспоненциальный рост микроорганизмов; качественное изменение структуры, сопровождающееся уменьшением темпа роста микроорганизмов с одновременным их отмиранием.

Первый период делится на три фазы. В первой фазе длительностью 2—4 ч (чем ниже температура, тем продолжительнее время) величины структурно-механических свойств фарша практически не меняются. Относительный рост количества микробов незначителен. Эту фазу можно назвать потенциальной, когда формируются предпосылки для дальнейших количественных и качественных изменений состояния фарша. Во второй фазе длительностью около 2 ч значения структурно-механических свойств фарша увеличиваются на 10—22% наблюдается процесс тиксотропного упрочнения структуры. В третьей фазе (от 3—4 ч при 22° С до 46 ч при 3° С) величины структурно-механических свойств фарша

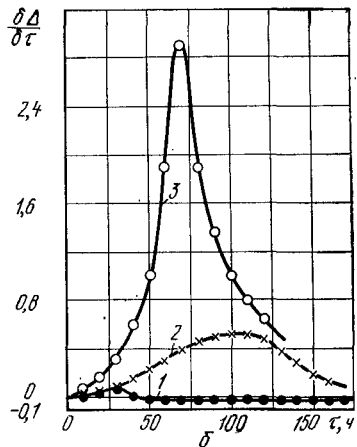
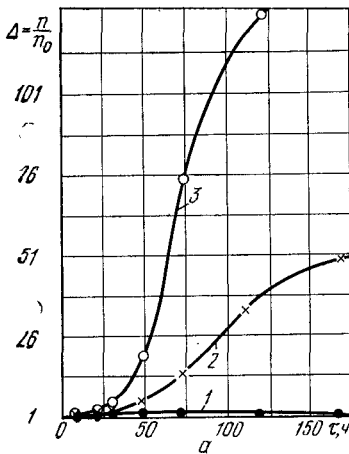


Рис. 31. Кривые изменения общего числа микроорганизмов (а) и скорости их относительного приращения (б) в фарше русских сосисок в процессе старения при температурах: 1 — 2—4; 2 — 12—14; 3 — 20—22° С.

ша имеют наибольшее значение, процесс тиксотропного упрочнения заканчивается. Предельное напряжение сдвига θ_0 (в Па) в конце первого периода и его продолжительность $\tau_{\text{пр}}$ (в ч) можно определить:

для фарша русских сосисок	для фарша докторской колбасы
$\theta_0 = 520 - 11t;$	$\theta_0 = 400 - 3t;$
$\tau_{\text{пр}} = 57,6 - 2,12t;$	$\tau_{\text{пр}} = 33 - t.$

Во втором периоде значения свойств фарша уменьшаются, а темп роста микрофлоры резко ускоряется. Конец второго периода характеризуется экстремальным значением кривой роста количества микробов (см. рис. 31, б) и точкой перегиба на временных кривых изменения структурно-механических свойств (см. рис. 30). Резкое уменьшение значений структурно-механических свойств связано с качественными изменениями фарша и ослаблением структурных связей и его разложением. В третьем периоде общее число микроорганизмов увеличивается, но наряду с этим начинается процесс их отмирания, структурно-механические свойства достигают наименьшего значения.

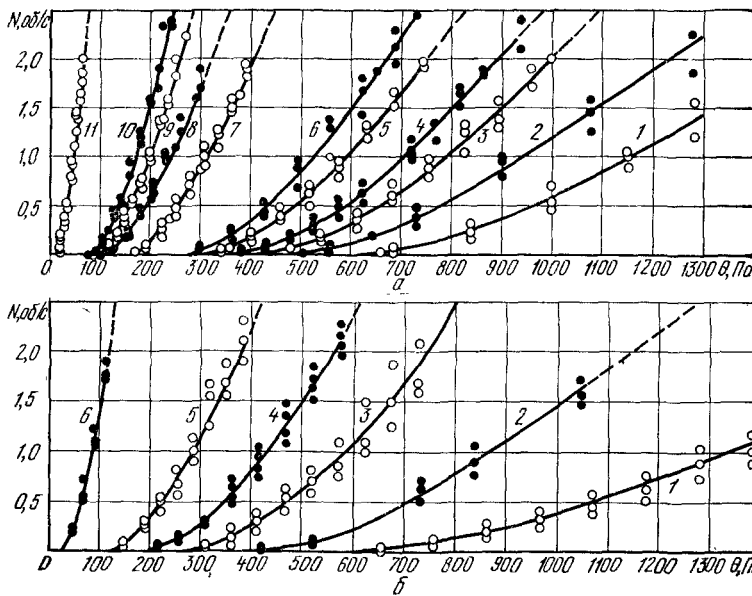
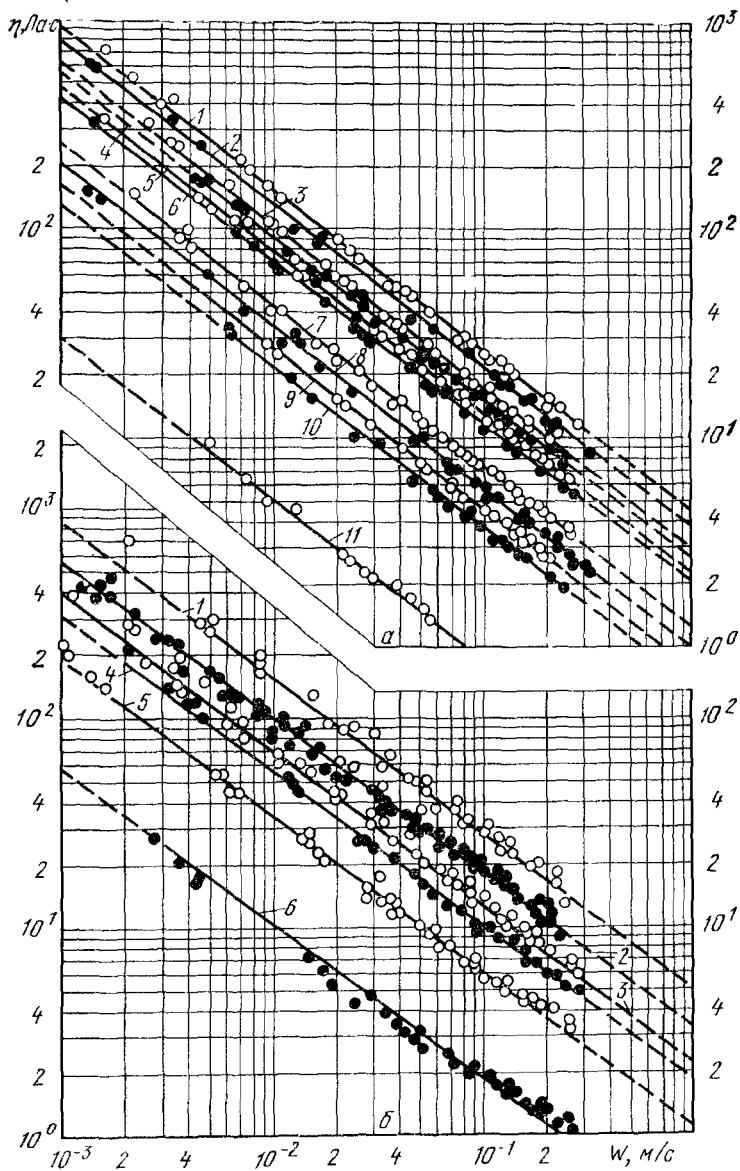


Рис. 32. Реограммы и зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для фарша:

а — сосисок русских при влажности: 1 — 0,685; 2 — 0,705; 3 — 0,716; 4 — 0,735; 5 — 0,735; 6 — 0,750; 7 — 0,773; 8 — 0,780; 9 — 0,805; 10 — 0,815; 11 — 0,820;
 б — докторской колбасы при влажности: 1 — 0,606; 2 — 0,642; 3 — 0,680; 4 — 0,699; 5 — 0,742; 6 — 0,820.

Влияние на значения реологических свойств фарша влажности и температуры. Исследования, проведенные при продолжительности выдержки до 2—3 ч, позволили получить наиболее устойчивые показатели величин реологических свойств [43]. Отклонения в экспериментах были в пределах $\pm 5\%$, что обусловлено в основном различной длительностью куттерования проб фарша [200]. Изменение относительной влажности W находилось в пределах от 0,60 до 0,84 кг влаги на 1 кг общей массы сырого фарша (рис. 32). До нужной влажности фарш доводили разбавлением водой и тщательным перемешиванием.

С повышением влажности фарша утолщаются жидкие прослойки дисперсионной среды между частицами, уменьшается концентрация белков в растворе при



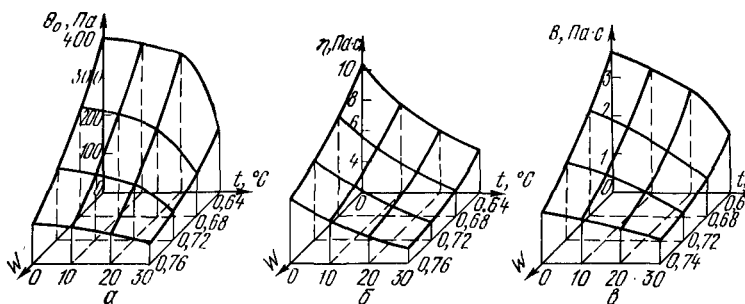


Рис. 33. Зависимость от температуры и влажности реологических свойств фарша докторской колбасы:

а — предельного напряжения сдвига; б — пластической вязкости; в — эффективной вязкости при единичной скорости.

слоек, снижается их вязкость, а следовательно, прочность структуры и значения структурно-механических свойств (рис. 32, 33). При этом темп разрушения структуры от влажности не зависит и при ее изменении остается постоянным: на рис. 32 все линии параллельны. Одновременно проведенные гистологические исследования при увеличении влажности фарша указывают на развитие встречного процесса — увеличение диаметра мышечных волокон, что само по себе должно было бы вести к возрастанию значений свойств, так как поверхность частиц увеличивается и некоторое количество влаги поглощается клетками. В неорганической системе — пасте бентонитовой глины [154] — при увеличении влажности водные прослойки между частицами утолщаются, возможно диспергирование крупных частиц. Изменение влажности от 0,66 до 0,76 в кг влаги на 1 кг общей массы уменьшает предельное напряжение сдвига и единичную вязкость глины примерно в 14—18 раз, т.е. практически вся влага участвует в прямом процессе — утолщении прослоек между частицами. Такое же увеличение влажности фарша вызывает снижение этих величин в 2,5—3,5 раза. Следовательно, прямой процесс (утолщение водных прослоек), снижающий прочность структуры, хотя и наблюдается, но значительно тормозится обратным процессом (набуханием мышечных волокон, увеличением их поверхности и связыванием влаги), который способствует возрастанию

прочности. Суммарное действие этих процессов дает в итоге сравнительно небольшое снижение прочности структуры фарша (см. рис. 33).

Для многих пищевых продуктов (фарша, теста и пр.) влажность является одним из главнейших технологических показателей. Вместе с тем пока нет достаточно надежных экспрессных и непрерывных способов ее измерения. Поэтому для контроля качественных показателей продуктов большое значение имеет разработка как методов измерения значений, как структурно-механических свойств, так и влажности; при непрерывном измерении этих характеристик и наличии обратной связи к обрабатывающей машине возможны оперативный контроль и регулирование качества продукта.

Проф. Р. Хамм установил [206], что влияние добавленного количества воды на вязкость фарша зависит от содержания в нем жира: чем больше жира, тем меньше снижается вязкость. В этих опытах для изменения жирности к гомогенатам длиннейшего мускула спины добавляли свиной топленый жир. С увеличением добавления жира (от 0 до 50%) пределы текучести и вязкости сильно возрастали при 15° С, незначительно — при 20° С и снижались при 30° С. Увеличение температуры приводило к снижению предела текучести и вязкости, которое было тем сильнее, чем выше содержание жира в фарше. В модельных фаршах без добавления жира температура оказывала лишь незначительное влияние на реологические характеристики. Приблизительно при 24° С содержание жира почти не отразилось на реологических свойствах фарша. По нашим данным [152], для свиного топленого жира критической температурой является 26,5° С. Если температура ниже, жир приобретает сплошной пространственный каркас кристаллизационного типа. Вполне реально, как определил Р. Хамм, что в смеси с водой и гомогенатами мышечной ткани эта температура снижается до 24° С.

Влияние влажности, температуры и давления на значения структурно-механических свойств фарша. Комплексные исследования позволили получить эмпирические зависимости для вычисления величин свойств фарша при выдержке после приготовления 3 ч [42].

Одновременно с вискозиметрическими были проведены гистологические исследования, для которых брали

исходный фарш и пробы из стакана вискозиметра после проведения опыта. Повышение влажности (от 0,67 до 0,76 кг/кг) ведет за счет осмотической диффузии влаги к увеличению диаметра мышечных волокон (от 35 до 50 мкм) вначале быстро, затем медленнее; толщина соединительнотканых прослоек (эндомизия) меняется с 3 до 8 мкм в начале медленно, затем быстрее. Повышение гидростатического давления вызывает увеличение диаметра волокон при нижнем значении влажности и уменьшение — при верхнем (после снятия давления). Жидкостные прослойки между частицами при высокой влажности фарша уменьшаются при изменении давления от 0 до $2 \cdot 10^5$ Па, затем толщина их остается постоянной. При низкой влажности размер прослоек увеличивается до давления $(2 \div 5) 10^5$, затем уменьшается.

На основе вискозиметрических исследований (рис. 34) получены зависимости для расчета величин структурно-механических свойств фарша русских сосисок — ФРС — и фарша докторской колбасы — ФДК

$$\left. \begin{aligned} Z &= a_1 (1 - a_2 t) \exp [-a_3 X (1 - a_4 \lg Y)], \\ m &= a_1 (1 + a_2 \lg Y) + a_3 t, \end{aligned} \right\} \quad (\text{III—})$$

где Z — предельное напряжение сдвига, пластическая эффективная вязкость в области напряжений, превышающих предельное напряжение сдвига (табл. 14);

a_1, a_2, a_3, a_4 — эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 14;

$Y = p \cdot 10^{-5} + 1$ — модуль (числовое значение) абсолютного давления;

p — избыточное гидростатическое давление, Па;

$X = W - W_{\text{кр}}$ — избыточная влажность фарша, кг воды на 1 кг фарша;

W — относительная влажность, кг воды на 1 кг сырого фарша;

$W_{\text{кр}}$ — критическая влажность фарша: для русских сосисок — 0,48; для докторской колбасы — 0,4.

Критическая влажность соответствует точке перехода от квазитвердого тела (пластичного) к пластично-вязкому. Ее значения определены экстраполяцией.

Пределы применимости уравнений: температуры от 3 до 23° С; давления от 0 до $10 \cdot 10^5$ Па, влажности для фарша русских сосисок от 0,65 до 0,77; для фарша докторской колбасы — от 0,60 до 0,76. В приведенных обобщениях криволинейные температурные изменения

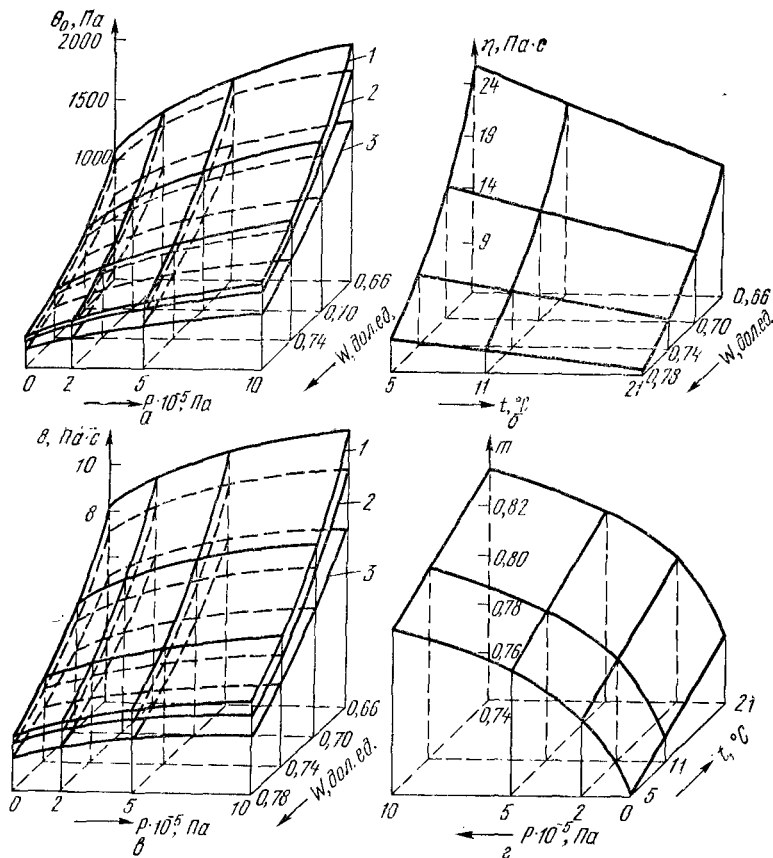


Рис. 34. Зависимость от относительной влажности и давления при различных температурах (1—5, 2—11, 3—21°С) реологических свойств фарша русских сосисок:

а — предельного напряжения сдвига; б — пластической вязкости; в — эффективной вязкости при единичной скорости; г — темпа разрушения структуры.

структурно-механических свойств аппроксимированы прямыми, что значительно упрощает расчетные зависимости, давая ошибки в указанных пределах изменения переменных для $\eta(t)$ —1,7%; $\theta_0(t)$ —3%; $B(t)$ —1,2%; $m(t)$ —0,5%. Разброс точек и округления дают ошибку не более 5%, которая имеет порядок ошибки измерения свойств, составляющей $\pm 6\%$.

Структурно-механические свойства	Коэффициенты к уравнениям (III-5)							
	Фарш русских сосисок				Фарш докторской колбасы			
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_1	a_2	a_3	a_4
θ_0 , Па	10100	0,0185	12,0	0,280	5200	0,0133	11,5	0,380
η , Па·с	200	0,020	10,8	0	28	0,020	4,75	0
B , Па·с	64	0,020	10,8	0,173	26	0,020	8,8	0,40
m	0,732	0,091	0,0017	—	0,708	0,0635	0,0017	—

При увеличении давления значения всех свойств увеличиваются, исключение составляет пластическая вязкость, которая практически не зависит от давления: отклонение опытных величин от расчетных не превышает $\pm 6\%$. Изменение величин свойств при различных давлениях объясняется главным образом перераспределением дисперсионной среды в системе и изменением размера частиц и гидратных оболочек. Кроме того, приложенное давление вызывает переориентацию частиц, более компактную их упаковку с одновременным деформированием; количество и объем воздушных полостей сокращаются. Все это ведет к упрочнению связей между частицами и для разрушения системы требуются более интенсивные внешние воздействия.

Представляют интерес эксперименты, в которых изучали структурно-механические свойства фарша при неоднократной нагрузке его гидростатическим давлением и разгрузке в ротационном вискозиметре [42]. Такой процесс может быть в обрабатывающих машинах. При этом наряду с ориентацией частиц в потоке последовательно происходит упрочнение и ослабление структурных связей; изменение структурно-механических свойств при последовательных нагружениях давлением происходит менее интенсивно, чем при однократном (рис. 35). Уменьшение величин структурно-механических свойств при измерениях после сброса давления (см. рис. 35, кривая 4) обусловлено ослаблением структуры фарша предыдущими воздействиями на нее. Таким образом, эти эксперименты показывают, что история нагружения образца гидростатическим давлением оказывает влияние на величины СМС.

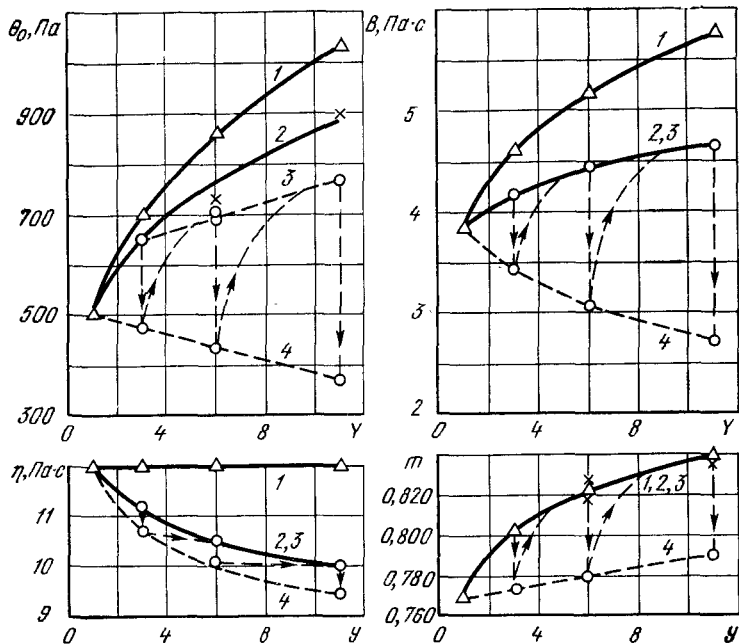


Рис. 35. Кривые изменения реологических свойств фарша при различных методах измерения:

1 — под давлением с заменой каждый раз образца фарша новым; 2 — при увеличивающихся давлениях на одном образце фарша; 3 — последовательно при повышенном давлении и после сброса его до нуля; 4 — последовательно после сброса давления до нуля.

Влияние механической обработки на реологические свойства фарша. Комплексные исследования структурно-механических и ряда технологических характеристик фарша при куттеровании [48, 49, 135, 201] позволили научно обоснованно подойти к расчету, осуществлению и прогнозированию этого процесса с целью получения готовых продуктов высокого качества при стабилизированных выходах. В результате любого механического воздействия (перемешивания, растирания, измельчения, резания и пр.) на продукт изменяются величины его физических свойств и технологические показатели [110, 154, 174]. Для получения желаемого эффекта необходимо подвести к продукту определенное количество полезной энергии, которая вызывает изменение качества

продукта. Другая часть энергии из общей расходуется на преодоление сил сопротивления и трения, преобразуясь в тепло. Например, при куттеровании полезная энергия составляет 5—10% от общей подведенной (оценивается по косвенным измерениям). В связи с этим при рассмотрении механической обработки изучают необходимую длительность проведения процесса: для каждой машины длительность будет иметь свое значение [35]. Однако для практических целей такой способ оценки механического воздействия вполне приемлем.

При куттеровании происходит тонкое измельчение (резание) мяса, что позволяет получить фарш с определенными технологическими характеристиками, которые определяют качество готовых изделий. На качество продукта влияют тип измельчающей машины (куттер, куттер-мешалка, эмульсатор и пр.), но это не принципиально, т. е. процессы независимо от применяемых машин аналогичны, протекают одинаково, отличаются лишь значения свойств и длительность достижения заданное ранее заданных их величин.

Процесс куттерования вызывает не только механические изменения в фарше, но и химические, что ведет к связыванию воды с белком и к эмульгированию жира. Для этих процессов большое значение имеет содержащийся в мясе белок актомиозин, состоящий из актина и миозина. В процессе куттерования к фаршу добавляют фосфаты, которые расщепляют актомиозин на актин и миозин¹. Они лучше поглощают воду и легче переводятся в растворимое состояние, чем актомиозин. Такого расщепления можно достичь при своевременном добавлении соли (поваренной, нитрита) к парному мясу (предварительный посол мяса). При этом важным является равномерное распределение соли в продукте в течение 6—8 ч после убоя животного. Для этого мясо измельчают, смешивают с солью и хранят длительное

¹ Влияние различных добавок на реологические и технологические свойства фарша, начиная с работ профессоров А. А. Соколова и Ю. Ф. Заяса [160, 161], рассматривали советские и иностранные авторы [25, 114, 156, 207, 212]. Было установлено, что добавки солей, плазмы крови, растительных белков изменяют реологические свойства фарша, улучшая в ряде случаев качество готовых изделий. Однако этот вопрос в большей мере относится к технологии и поэтому вследствие небольшого объема книги здесь не рассматривается.

время в замороженном состоянии или в холодильнике при 0—2°С в течение 3 дней. Растворимость актина и миозина улучшается при концентрации соли около 5%. Измельчение клеток в процессе куттерования мяса способствует освобождению белка, который затем связывается с водой. Перед добавлением воды и льда мышечные волокна лучше измельчаются, так как находятся в относительно сухом состоянии, причем измельчение парного мяса более эффективно, чем остывшего. В процессе куттерования мясо не должно перегреваться. Поэтому интенсивное предварительное измельчение перед добавлением в куттер воды или льда приемлемо для обработки замороженного мяса.

Для получения стабильной системы высокого качества необходимо одновременное достижение оптимальных степени измельчения и конечной температуры продукта. Она не может быть получена, если сильно измельчена жировая ткань или слишком высокая локальная температура в области резания явилась причиной неблагоприятных изменений белка, или за непродолжительный период куттерования не освобождено достаточное количество белка для связывания с водой.

Измельчение на куттере относится к весьма интенсивным механическим процессам, резко меняющим физические свойства продукта. Комплексное изучение процесса куттерования позволило выбрать оптимальный режим его проведения и разработать эффективные способы регулирования качественных показателей сырого фарша и готовых изделий из него. В качестве главных независимых переменных выбраны: длительность измельчения как характеристика процесса и влажность как характеристика объекта.

Процесс куттерования состоит из трех основных периодов, в которых структурно-механические свойства сырого фарша и готовых изделий претерпевают указанные изменения. На рис. 36 показаны типичные зависимости изменения величин свойств фарша от влагосодержания и длительности куттерования на куттере вместимостью 0,080 м³ и с тремя серповидными ножами.

В начальном (подготовительном) периоде куттерования размер частиц уменьшается незначительно; добавленная в куттер вода перемешивается с частицами мяса и образует около них толстые прослойки, облег-

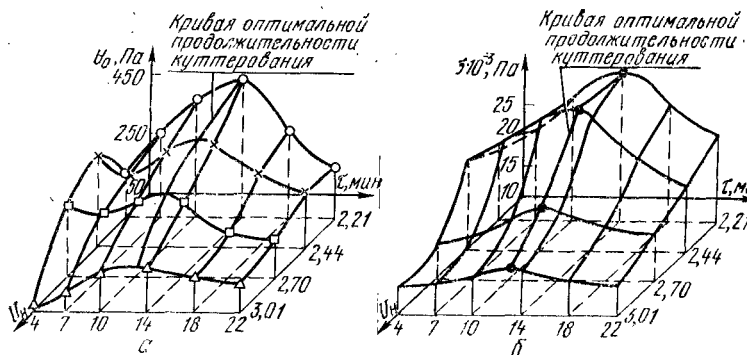


Рис. 36. Зависимость от длительности куттерования и влагосодержания реологических свойств русских сосисок:

a — предельного напряжения сдвига сырого фарша; *b* — предельного напряжения среза изделий после термической обработки.

чающие деформацию; предельное напряжение сдвига имеет в конце периода минимальное значение.

В первом, основном, периоде осуществляется интенсивное разрезание частиц, их общая поверхность увеличивается, влага из свободной переходит в поверхностно-связанную, происходит процесс образования новой структуры фарша. К концу периода предельное напряжение сдвига достигает максимального значения (см. рис. 36). Дальнейшее продолжение процесса (второй период) ведет к некоторому «размочаливанию» волокон, предельное напряжение сдвига уменьшается, наблюдается «перекуттерование» фарша. Начиная со второго периода, повышение температуры, увеличение числа мельчайших частиц, аэрирование массы и эмульгирование жира [15] ведут к вторичному структурообразованию (первичная структура фарша образуется в первом периоде). Одновременно происходят коллоидно-химические изменения [15]. Названным экстремальным точкам в конце подготовительного и первого периода соответствуют экстремальные точки других характеристик (водосвязывающая способность, выход готовых изделий и пр.). Длительность процесса, при которой все показатели фарша при данной влажности и готовых изделий

достигают экстремальных значений (конец первого периода), а строение его наиболее однородно при компактной укладке частиц, названа оптимальной продолжительностью куттерования ($\tau_{\text{опт}}$, мин).

При увеличении влажности (влагосодержания) фарша значения его сдвиговых свойств уменьшаются по экспоненциальному закону (см. рис. 33, 34). При куттеровании добавление воды к мясу способствует более быстрому разделению мышечных волокон [201], т. е. хорошо гидратированное мясо измельчается лучше [204], причем считают, что добавлять воду при куттеровании нужно постепенно. Следовательно, при увеличении влагосодержания (U в кг воды на 1 кг сухого вещества) оптимальная продолжительность куттерования уменьшается. При определенном для каждого вида продукта значении влагосодержания — назовем его первым критическим или оптимальным U_1 — готовые изделия имеют наилучшие технологические, в том числе и качественные, показатели. Это значение влагосодержания почти одинаково для различных измельчающих машин, соответствует точке перегиба зависимости характеристик от влагосодержания при оптимальной продолжительности куттерования (кривая 1, рис. 36, б). Из этих соображений, основанных на результатах обширных экспериментальных исследований, следует чрезвычайно важный практический вывод, приемлемый, по-видимому, для самых различных пищевых продуктов: оптимальная продолжительность механического воздействия (куттерования, перемешивания и пр.) и оптимальный химический состав сырья (влагосодержание, жирность и пр.) соответствуют эталонным условиям его обработки и позволяют получить готовый продукт с эталонными значениями структурно-механических свойств и требуемыми технологическими показателями. Эталонные показатели, как правило, постоянны для продукта каждого вида. Отсюда следует, что эталонные условия измельчения фарша позволяют получить высококачественный продукт при стабилизированном выходе и свойствах и требуют наименьших затрат машинного времени, т. е. экономически наиболее выгодны.

При дальнейшем увеличении влагосодержания оптимальная продолжительность куттерования уменьшается и достигает минимума при втором критическом влаго-

содержании сырого фарша U_2 . При влагосодержании сырого фарша больше второго критического, значения оптимальной продолжительности куттерования вновь увеличивается (рис. 36), что объясняется утолщением водно-белковых прослоек между частицами и, следовательно, уменьшением сил сцепления между элементами коагуляционной структуры. Таким образом, частицы на ходятся как бы в плавающем состоянии и их относительные смещения облегчены. Согласно существующей теории куттерования наилучшие условия для измельчения создаются, когда продолжительность воздействия ножа на продукт равна периоду релаксации упругих деформаций или меньше его, т. е. продукт можно рассматривать, как упруготвердое тело. При высоком влагосодержании, т. е. при обводнении фарша, его состояние отличается от упругого.

Для характеристики степени измельчения фарша выяснения сущности процесса и причин изменения структурно-механических свойств были проведены исследования эффективного диаметра частиц [154, 172]. Типичные кривые распределения размеров частиц показаны на рис. 37. Экстремум соответствует оптимальной продолжительности куттерования. При построении зависимостей эффективного диаметра частиц от влагосодержания при оптимальной продолжительности куттерования экстремумы кривых показывают оптимальное влагосодержание фарша.

Изменение геометрических характеристик частиц фаршей говяжьих сарделек и докторской колбасы подобны, исключение составляет продукт с максимальной жирностью — фарш свиных сарделек. Для этого фарша размер частиц достигает минимума при оптимальной продолжительности куттерования, а затем увеличивается за счет слипания капелек жира. Одновременно были проведены гистологические исследования при различной длительности куттерования; они показали аналогичные результаты.

При эталонных режимах обработки эффективный диаметр частиц составляет для фарша говяжьих сарделек 1,5—1,6 мм, докторской колбасы 0,8—0,9, свиных сарделек 1,2 мм. Частицы большего размера обычно получаются при измельчении на куттер-мешалке за счет худшего измельчения соединительной ткани.

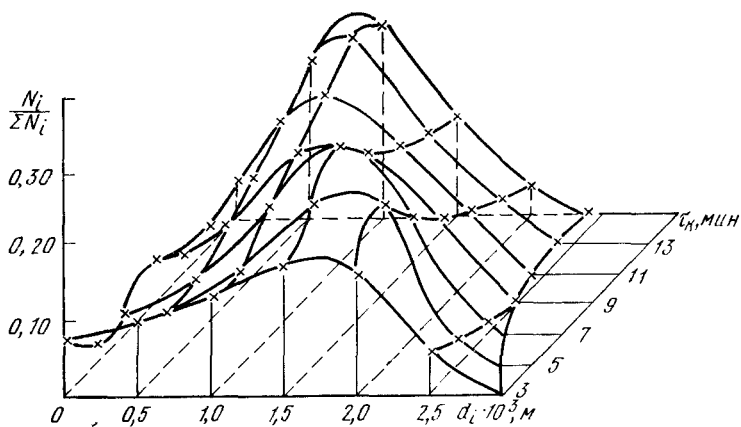


Рис. 37. Кривые изменения содержания частиц данного размера по отношению ко всему количеству частиц фарша докторской колбасы в зависимости от их размера и длительности куттерования.

Эталонные показатели продуктов, полученные в результате комплексных исследований сдвиговых, компрессионных, тепло- и электрофизических свойств, качества и ряда технологических характеристик фарша и готовых изделий приведены в табл. 15. Кроме того, на ос-

Таблица 15

Продукт	Содержание говядины, кг на 1 кг мяса	Характеристика сырого фарша					Характеристика готового продукта	
		влажностное содержание, кг воды на 1 кг сухого вещества	предельное напряжение сдвига θ_0 , Па	пластическая вязкость η , Па·с	единичная вязкость B , Па·с	температура разрушения структуры t , мин	влажностное содержание, кг воды на 1 кг сухого вещества	напряжение среза, $\sigma \cdot 10^{-3}$, Па
Говяжьи сардельки	0,90	3,90	300	3,88	1,94	0,82	3,54	31,6
Русские сосиски	0,50	2,40	320	6,96	2,35	0,76	2,22	20,2
Докторская колбаса	0,25	1,80	310	4,86	2,05	0,74	1,66	—
Свиные сардельки	0,00	1,34	160	3,02	1,01	0,80	1,25	14,2

Примечание. Реологические характеристики могут отличаться от указанных в таблице в пределах $\pm 5\%$, влажностное — $\pm 1\%$.

новании результатов исследований получены эмпирические зависимости для расчета основных характеристик процесса куттерования.

Выход готовой продукции $m_{\text{вых}}$ (в кг на 1 кг мяса) связан с влагосодержанием и определяется из материальных балансов [35]:

$$m_{\text{вых}} = \frac{M_{\text{г.и}}}{M_{\text{м}}} = \frac{M_{\text{г.и}}}{M_{\text{с.ф}}} (1 + m_{\text{в}}) = \frac{1 + U_{\text{к}}}{1 + U_{\text{м}}} . \quad (\text{III}-6)$$

Потери жидкости — бульона — при варке $m_{\text{ж}}$ (в кг на 1 кг сырого фарша, набитого в оболочку) определяются по разности влагосодержаний:

$$m_{\text{ж}} = \frac{M_{\text{с.ф}} - M_{\text{г.и}}}{M_{\text{с.ф}}} = \frac{\Delta U}{1 + U_{\text{н}}} . \quad (\text{III}-7)$$

Выход готовой продукции на сухое вещество исходного мяса объективно характеризует качество работы фаршеизготовителей и определяется выражением

$$m_{\text{вых.а.с}} = \frac{M_{\text{г.и}}}{M_{\text{сух.м}}} = \frac{1}{1 - W_{\text{к}}} = 1 + U_{\text{к}} . \quad (\text{III}-8)$$

Относительная влажность W (в кг влаги на 1 кг продукта — фарша, мяса, готового изделия) и влагосодержание U в кг влаги на 1 кг сухого вещества связаны соотношением:

$$W = \frac{U}{1 + U} \quad \text{или} \quad U = \frac{W}{1 - W} . \quad (\text{III}-9)$$

В формулах (III-6) — (III-9) величины имеют следующие значения:

$M_{\text{г.и}}$ — масса готового изделия, кг;
 $M_{\text{м}}$ — масса исходного соленого мяса, включая жир, кг;
 $M_{\text{с.ф}}$ — масса сырого фарша, кг;
 $U_{\text{м}}$ — влагосодержание исходного соленого мяса и жира, кг/кг;

$U_{\text{к}}$ — влагосодержание готового изделия, кг/кг;

$U_{\text{н}}$ — влагосодержание сырого фарша, кг/кг;

$\Delta U = U_{\text{н}} - U_{\text{к}}$ — разность влагосодержаний готового изделия и сырого фарша, кг;

$m_{\text{в}}$ — количество добавленной воды, кг на 1 кг соленого мяса;

$M_{\text{сух.м}}$ — масса сухого вещества в мясе, кг.

При известной влажности мяса и эталонной влажности фарша (см. табл. 15) можно рассчитать количе-

ство воды и льда, которое необходимо добавить в куттер:

$$m_{\text{в}} = \frac{W_{\text{н.эт}} - W_{\text{м}}}{1 - W_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н.эт}} - U_{\text{м}}}{1 + U_{\text{м}}}. \quad (\text{III}-10)$$

Эталонное влагосодержание фарша можно определить по эмпирической формуле

$$U_{\text{н.эт}} = \exp(1,2m_{\text{гов}} + 0,28), \quad (\text{III}-11)$$

где $m_{\text{гов}}$ — содержание говядины, кг на 1 кг исходной смеси мяса (говядины и свинины).

Для расчета оптимальной продолжительности куттерования ($\tau_{\text{к.опт}}$, мин) при эталонном влагосодержании получена обобщенная зависимость [49]

$$\tau_{\text{к.опт}} = K \exp(0,25m_{\text{гов}} + 0,46) 10^5 \Omega^{-1}, \quad (\text{III}-12)$$

где K — коэффициент пропорциональности, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$;

10^5 — коэффициент пропорциональности;

Ω — обобщенная кинематическая характеристика измельчающей машины, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{мин})$.

Коэффициент K определяют по правилу аддитивности:

$$K = K_{\text{гов}}m_{\text{гов}} + K_{\text{св}}m_{\text{св}} + K_{\text{п}}m_{\text{п}}, \quad (\text{III}-13)$$

где $m_{\text{гов}} + m_{\text{св}} + m_{\text{п}} = 1$ и обозначают соответственно содержание в кг на 1 кг исходной смеси мяса без воды; говядины, свинины и прочих добавок;

$K_{\text{гов}}$, $K_{\text{св}}$, $K_{\text{п}}$ — коэффициенты пропорциональности (для говядины II сорта $K_{\text{гов}}=1$; I сорта $K_{\text{гов}}=0,95$; высшего сорта $K_{\text{гов}}=0,90$; для полужирной свинины $K_{\text{св}}=1$; жирной $K_{\text{св}}=0,95$; для жира-сырца $K_{\text{св}}=0,90$; для прочих добавок $K_{\text{п}}=1$).

Обобщенная кинематическая характеристика куттера учитывает режущую способность $f_0 = \frac{zn_{\text{н}}F_{\text{д}}}{M}$, окру-

жную скорость вращения ножей $\omega_{\text{н}} = \frac{2\pi r_{\text{н}}n_{\text{н}}}{60}$ по их

наибольшему радиусу $r_{\text{н}}$ и скорость подачи фарша под режущий механизм по оси вращения ножей $\omega_{\text{ф}}$:

$$\begin{aligned} \Omega = f_0 \frac{\omega_{\text{н}}^2}{\omega_{\text{ф}}} &= \frac{F_{\text{д}}zn_{\text{н}}}{M} \cdot \frac{\omega_{\text{н}}^2}{\omega_{\text{ф}}} = \frac{\pi}{30} F_{\text{д}} \frac{(r_{\text{н}}n_{\text{н}})^2}{MR} \times \\ &\times z \frac{n_{\text{н}}}{n_{\text{к}}} \approx \frac{\sigma_{\text{F}}z}{60\rho} \left(\frac{r_{\text{н}}n_{\text{н}}}{R} \right)^2 \frac{n_{\text{н}}}{n_{\text{к}}}, \end{aligned} \quad (\text{III}-14)$$

где z — число ножей режущего инструмента;
 n_k, n_n — частота вращения чаши куттера и ножей соответственно, об/мин;
 M — масса фарша в куттере, кг;
 R — расстояние от оси вращения чаши до оси вращения ножей, м;
 ρ — плотность фарша, кг/м³;
 F_d — площадь сечения ножом слоя фарша за один оборот, м²;
 a_F — коэффициент площади.

Поскольку между периферийной кромкой ножа и чашей куттера всегда имеется зазор (h , м), то действительная площадь сечения фарша ножом будет меньше геометрической, определяемой по уравнению тела вращения, на величину зазора, т. е.

$$F_d = F_{\text{геом}} - F_{\text{зазора}} = \frac{M}{2\rho R} - 1,93r_n h \left(\frac{M}{\rho R r_n^2} \right)^{0,41}.$$

При зазоре между чашей и ножом 0,005 м коэффициент площади равен 0,92. Он возрастает при увеличении массы загрузки и уменьшается при увеличении зазора; его значения обычно не выходят за пределы 0,95—0,98. При измельчении фарша на других машинах формула (III—14) принципиально не меняется, хотя геометрические и кинематические характеристики определяются конструкцией машины.

Наряду с изменением структурно-механических и технологических показателей куттерование вызывает химические изменения белков мяса [69]. Для экспериментов использовали лабораторный куттер с чашей вместимостью 0,008 м³ при измельчении «модельного» фарша: 0,5 размороженной говядины высшего сорта, 0,3 размороженной нежирной свинины (длиннейший мускул спины) и 0,2 шпика. В качестве химического показателя определяли экстрагируемость белков. В первом периоде (табл. 16) она увеличивается за счет разрушения оболочек мышечных волокон и перехода миоплазмы и миофибрилл в дисперсионную среду фарша, что способствует формированию коагуляционной структуры фарша. Во втором периоде экстрагируемость уменьшается в результате локальных перегревов и механической денатурации белков.

Из табл. 16 видно, что количество белков, экстрагируемых боратым буфером с ионной силой 1,0, примерно

Таблица 16

Показатели	Количество экстрагируемых белков (в % к общему азоту) при длительности куттерования, мин						
	1	3	6	10	13	16	20
Азот белков, экстрагируемых растворителем							
с низкой ионной силой (за вычетом небелкового азота)	8,5	8,7	9,0	9,6	10,4	9,4	8,2
с высокой ионной силой	19,0	20,5	23,6	27,7	30,2	28,7	24,6

в 2,5—3 раза больше, чем белков, экстрагируемых фосфатным буфером с ионной силой 0,15. На основании этого сделано [69] предположение, что прочностные свойства фарша и его водосвязывающая способность предопределяются состоянием белков, главным образом миофибриллярных, и их способностью переходить в раствор и образовывать стабильную коагуляционную структуру.

Максимум кривой экстрагируемости, как видно из табл. 16, приходится на длительность измельчения от 10 до 13 мин. При такой же продолжительности куттерования все остальные структурно-механические и технологические показатели фарша и готовых изделий имеют оптимальные значения.

При куттеровании существенно повышается температура фарша, так как большая часть энергии, подводимой к ножам, расходуется на преодоление сопротивления трения и перемешивание. Особенно велик темп нарастания температуры в первые минуты куттерования. К концу начального периода температура смеси повышается в 2—3 раза, причем более интенсивно в смеси с меньшим количеством воды. В этот период — период неустановившегося режима работы — происходит измельчение, перемешивание фарша с добавляемой водой и распределение его по чаше куттера. Измерение и запись самопишущим ваттметром развиваемой мощности показывает, что двигатель работает на предельной мощности. При загрузке фарша одновременно большими порциями в момент их прохождения под ножами (2—

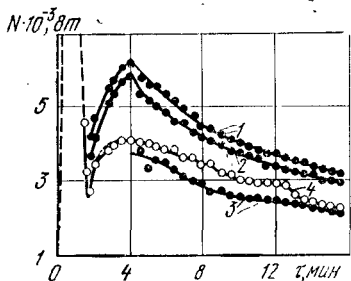


Рис. 38. Зависимость от длительности куттерования расчетной мощности по температуре:

1 — в центре чаши куттера; 2 — в пристенном слое; 3 — в центре чаши, если за начальную взята температура при четырехминутном куттеровании (1, 2, 3 — мощность, рассчитанная по температуре); 4 — мощность электродвигателя, записанная ваттметром.

4 с) двигатель работает с перегрузкой до 25—40% (рис. 38, кривая 4). Максимальная температура 30° С была получена на куттере с чашей вместимостью 0,08 м³ за 22 мин. В периферийном пристенном слое температура на 1—1,5° С ниже температуры в центральной части потока.

Для установившегося периода работы общее повышение температуры Δt (в К) с момента загрузки говядины можно определить из теплового баланса по количеству подведенного тепла Q (в Дж):

$$Q = cM\Delta t = 10^6 [a_1 - a_2 U_H (1 - a_3 \lg \tau_{\text{кут}})], \quad (\text{III}-15)$$

где c — удельная теплоемкость фарша, Дж/(кг·К);

M — общая масса загрузки, кг;

a_1, a_2, a_3 — коэффициенты, зависящие от кинематических характеристик куттера, мощности, развиваемой режущим механизмом, и упругопрочностных свойств сырья.

Для области температур 20—70° С эффективная удельная теплоемкость колбасного фарша различных видов [56] находится в пределах 3750—4050 Дж/(кг·К). Если ее вычислять по правилу аддитивности [56], то следует учитывать скрытую теплоту плавления жира или его эффективную теплоемкость.

В производственных условиях при куттеровании повышение температуры незначительно, так как в фарш добавляют лед с водой при 0° С. Тогда в расчетную формулу для температуры следует ввести поправку на скрытую теплоту плавления льда.

По количеству подведенного тепла Q (в Дж) можно определить развиваемую режущим механизмом мощность N (в Вт):

$$N = \frac{Q}{60\tau_{\text{кут}}} \quad (\text{III—16})$$

При использовании уравнения (III—16), даже если в куттер добавляют лед, поправку в формулу (III—15) не вводят.

На рис. 38 представлены типичные для куттеров кривые изменения мощности по длительности куттерования. Показания ваттметра (кривая 4) в начальный период неустойчивы, двигатель работает с кратковременными перегрузками. В начале первого, установившегося, периода мощность увеличивается и достигает максимума в связи с интенсивным измельчением частиц мяса. Затем начинается уменьшение мощности, что обусловлено окончанием основного этапа резания. Проведение процесса до оптимальной продолжительности куттерования преследует цель формирования структуры фарша. При этом процесс сопровождается повышением температуры, не менее интенсивным, чем в начальный период. Некоторая задержка спада мощности наблюдается в области оптимальной продолжительности куттерования (горизонтальная площадка на кривой 4). Дальнейшая обработка вызывает структурные, биотермические и механохимические изменения фарша и сопровождается продолжающимся спадом мощности.

Кривая 3 построена по температуре фарша [см. уравнение (III—16)]. За начальную принята температура при четырехминутном куттеровании, когда истинная мощность (по ваттметру) наибольшая. Можно считать, что кривая 3 монотонно убывает, подчиняясь экспоненциальному закону. Мощность, вычисленная по температуре (теплу) от самого начала процесса (кривые 1 и 2), больше истинной по ваттметру. Это объясняется тем, что в начальный период куттер развивает максимальную мощность. Приобретаемый фаршем запас тепла суммируется и увеличивает кажущуюся расчетную мощность на всем дальнейшем протяжении процесса. Полученные данные для определения увеличения температуры при куттеровании позволяют заранее установить температуру фарша и, если она оказывается выше нормы, принять меры к ее уменьшению (добавлять вместо воды лед, переохлаждать мясо и т. д.).

В качестве примера в табл. 17 приведены сравнительные данные изготовления сосисок русских по эта-

лонному и произвольному (обычному) режимам обработки фарша. Эксперименты были проведены в производственных условиях. Сосиски варили в естественной оболочке диаметром около 20 мм по существующей технологии. Из табл. 17 видно, что эталонный режим во всех опытах имеет преимущества по сравнению с обычным. Для всех опытных партий мяса, кроме партии Б, выход готовых изделий выше. Например, для менее влажного мяса опытная партия А дает выход на 6% больше, при лучшем качестве на 0,4 балла; для более влажного мяса опытная партия Б — выход меньше на 1,7%, но качество опытной партии выше контрольной на 0,5 балла. Следует отметить, что органолептическая оценка качества при прочих равных условиях зависит от диаметра оболочки, в которой варились сосиски.

Таблица 17

Показатели	Способ изготовления фарша и опытные партии мяса			
	обыч- ный	опти- маль- ный	опти- маль- ный	обыч- ный
	А		Б	
Относительная влажность шрота, кг воды на 1 кг сырого фарша				
говядина	0,727		0,723	
свинина	0,433		0,473	
средняя смеси	0,580		0,598	
Количество добавленной воды, кг на 1 кг мяса	—	0,41	0,37	—
Относительная влажность фарша	0,6974	0,7020	0,7066	0,7267
Выход готовых изделий				
кг на 1 кг сухого мяса	2,80	2,94	2,99	3,01
кг на 1 кг мяса	1,175	1,235	1,202	1,219
Относительная влажность готовых изделий				
по анализу	0,634	0,648	0,652	0,659
по расчету	0,643	0,659	0,665	0,670
Общая сенсорная оценка качества готовых изделий	3,7	4,1	3,7	3,2

Показатели	Способ изготовления фарша и опытные партии мяса			
	обыч- ный	опти- маль- ный	опти- маль- ный	обыч- ный
	В		Г	
Относительная влажность шрота, кг воды на 1 кг сырого фарша				
говядина	0,721		0,723	
свинина	0,441		0,417	
средняя смеси	0,581		0,570	
Количество добавленной воды, кг на 1 кг мяса	—	0,434	0,472	—
Относительная влажность фарша	0,6945	0,7005	0,7088	0,7058
Выход готовых изделий				
кг на 1 кг сухого мяса	2,77	2,92	2,98	2,80
кг на 1 кг мяса	1,160	1,220	1,280	1,200
Относительная влажность готовых изделий				
по анализу	0,639	0,656	0,636	0,613
по расчету	0,639	0,656	0,665	0,642
Общая сенсорная оценка качества готовых изделий	3,9	3,9	3,7	3,6

Организация эталонного режима изготовления фарша требует соблюдения следующих условий:

посол шрота (отдельно говядины и свинины) должен происходить в емкостях вместимостью, соответствующей одной или нескольким закладкам мяса в куттер;

каждая емкость должна иметь ярлык с указанием влажности шрота и его массы;

продолжительность куттерования следует рассчитывать для изделий данного вида и определенного куттера один раз.

Организация самого процесса куттерования включает в себя следующие операции: по влажности шрота определяют количество добавляемой воды и льда; куттеруют в течение 0,5—2 мин (в зависимости от вида куттера) говядину с частью воды, затем загружают свинину и остальную воду. Перечисленные операции позволяют

стабилизировать выход и качество готового продукта. Г. В. Бакунц [10, 138] аналитически описал два основных периода куттерования: образование первичной структуры фарша — второй член в формуле (III—17); разрушение первичной и образование вторичной структуры — третий член в формуле (III—17). Оба процесса протекают одновременно, и наложение одного на другой дает типичные кривые изменения основных характеристик фарша (см. рис. 36, 37) с наличием экстремума.

Комплексная характеристика процесса куттерования — крутящий момент на шаровом вискозиметре M (в Н·м) — зависит от вида фарша, геометрических, кинематических и динамических параметров прибора (см. рис. 7) и измельчающей машины; определяется уравнением:

$$M = M_0 + \frac{\tau_k}{a + b\tau_k} - c\tau_k^2, \quad (\text{III—17})$$

где M_0 — начальная характеристика процесса (крутящий момент), Н·м;

τ_k — продолжительность процесса куттерования, мин;

a, b, c — эмпирические коэффициенты, постоянные для определенного прибора и измельчающей машины, но различные для каждого вида фарша.

Путем преобразований уравнения (III—17) получена формула для вычисления оптимальной продолжительности куттерования

$$\tau_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{a}{2b^2c}} - \frac{2}{3} \cdot \frac{a}{b}. \quad (\text{III—18})$$

Формула не учитывает влагосодержания фарша и имеет частный характер. Однако как полученный результат, так и сама методика рассмотрения процесса представляют несомненный интерес.

Для куттера с чашей вместимостью 0,08 м³ и тремя серповидными ножами значения коэффициентов a, b, c приведены в табл. 18.

Таблица 18

Фарш	a , мин/(Н·м)	b , 1/(Н·м)	c , Н·м/мин ²
Докторской колбасы	17,5	22,5	0,00035
Отдельной колбасы	38,0	10,8	0,00028
Сосисок русских	130,0	20,0	0,00063

Проверка формул, по нашим экспериментальным данным [48, 49, 200, 201], показала хорошее совпадение для фарша русских сосисок. но для фарша докторской колбасы дала заниженные результаты.

Взаимосвязь различных физических свойств. Мясопродукты, являясь сложнейшими биологическими соединениями, обладают разнообразными физическими свойствами. В критических точках обычно внутренняя структура и величины свойств претерпевают кол-

личественные и качественные изменения. Все это создает предпосылки для автоматического контроля различных процессов по изменению одного или нескольких показателей, наиболее легко определяемых для данного процесса.

Высказанные соображения наглядно подтверждаются при изучении изменения предельного напряжения сдвига (θ_0), удельной электропроводности (κ), относительной деформации осевого сжатия (ϵ) и проницаемости ИК-энергии через слой фарша в зависимости от степени измельчения. Для этого длиннейший мускул спины от говяжьей туши несколько раз пропускали через мясорубку с отверстиями диаметром 3 мм. На рис. 39 показана зависимость названных величин от кратности измельчения, которая определяет глубину обработки и влияет на формы связи влаги с фаршем, изменяя тем самым характеристики продукта.

Гистологические срезы фарша отличаются постепенным исчезновением исчерченности при увеличении степени измельчения. Также увеличивается количество аморфной массы фарша. Отчетливо заметны ядра в исходном мясе, затем они встречаются все реже. Жировые клетки исчезают, превращаясь в довольно крупные (до $0,025 \text{ мм}^2$) капли. Соединительная ткань не претерпевает существенных изменений и представляет собой

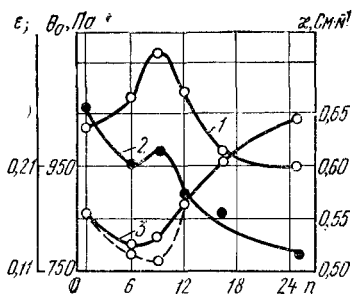


Рис. 39. Зависимость физических характеристик фарша из говядины от кратности пропуска его через мясорубку: 1 — удельная электропроводность; 2 — относительное осевое сжатие; 3 — предельное напряжение сдвига.

включения в аморфную массу и обрывки мышечной ткани. К концу измельчения фарш представляет собой более «гомогенную» систему.

С увеличением степени измельчения возрастает физическая поверхность частиц, что приводит к увеличению адсорбционно связанной влаги. При невысокой степени измельчения (1 и 3 раза) незначительно изменяются свойства системы. Поскольку содержание влаги в фарше ограничено и ее связываемость в рассматриваемом аспекте зависит от поверхности частиц, следует ожидать, что при достижении определенной поверхности значения свойств фарша, зависящие от формы связи влаги, станут инвариантными. При этом достижение инвариантности зависит от вида диспергирующей машины и влагосодержания продукта.

Как видно из графиков (см. рис. 39) критические точки приходятся на кратность измельчения 9. При увеличении степени измельчения темп изменения свойств замедляется.

Микросрезы для шестнадцатикратного измельчения имеют аморфную структуру, хотя и сохраняют отдельные мышечные волокна. При куттеровании (см. рис. 36, 37) общая картина изменения величин свойств подобна. Однако в этом случае удастся получить более глубокую деструкцию всех тканей мяса, а при большой длительности процесса фарш превращается в аморфную массу, содержащую большое количество мелких воздушных пузырьков.

Удельная электропроводность в процессе куттерования [33, 152] имеет несколько экстремумов (до четырех), которые совпадают с экстремальными значениями реологических свойств или с точками перегиба кривых.

Температурные изменения электропроводности носят практически линейный и положительный характер до температуры 48—52°С. Затем интенсивность ее роста понижается в результате выделения бульона, что связано с денатурацией белков.

В области температур 50—72°С следует говорить уже о проводимости сложной системы фарш — бульон. При 72°С значения электропроводности на 7—10% меньше экстраполированных значений по первоначальной области.

Рыбные фарши

Изучение структурно-механических свойств рыбных фаршей началось несколько лет назад [107, 142, 144, 173]. Следует отметить, что реологическое состояние рыбных фаршей при воздействии аналогичных технологических факторов подобно состоянию мясных вследствие общности их внутренней сущности. Значения величин свойств рыбных и мясных фаршей также близки между собой.

Влияние степени измельчения мяса рыбы на реологические свойства рыбного фарша [142, 144]. Исследования проводили на куттере «Саксония» (масса загрузки 50 кг, три серповидных ножа с частотой вращения 1480 об/мин). Из рис. 40 видно, что все характеристики имеют экстремальное значение при определенной продолжительности куттерования, которая определяется геометрией и кинематикой измельчающей машины. Оптимальный размер частиц [144] составляет около 100×10^{-6} м, т. е. имеет такой же порядок, как и для мясного колбасного фарша. Оптимальная продолжительность куттерования рыбного колбасного фарша на 20—30% выше [144], чем у мясного. Качество готовых изделий получается наилучшим при добавлении около 0,2 кг воды на 1 кг мяса рыбы.

Влияние температуры и влажности на реологические характеристики рыбного фарша [107, 144]. Реологические характеристики рыбного фарша изменяются в результате изменения температуры и влажности подобно характеристикам мясного фарша при аналогичных воздействиях [см. рис. 30, 33, 34]. Заслуживает внимания тот факт, что одни и те же характеристики, определенные разными исследователями независимо друг от друга [107, 144], имеют одинаковый порядок для рыбного фарша разных видов, а некоторые, например темп разрушения структуры, или индекс течения, совпадают. Однако следует отметить, что темп разрушения структуры у рыбного фарша, так же как и у мясного, при увеличении температуры возрастает незначительно (на 5—10%). Например, соответственно при температуре 3, 15 и 40°С числовые значения темпа разрушения структуры составляют 0,765; 0,785 и 0,815 [107]. Тем не менее учитывать их необходимо, так как в широком диапазоне

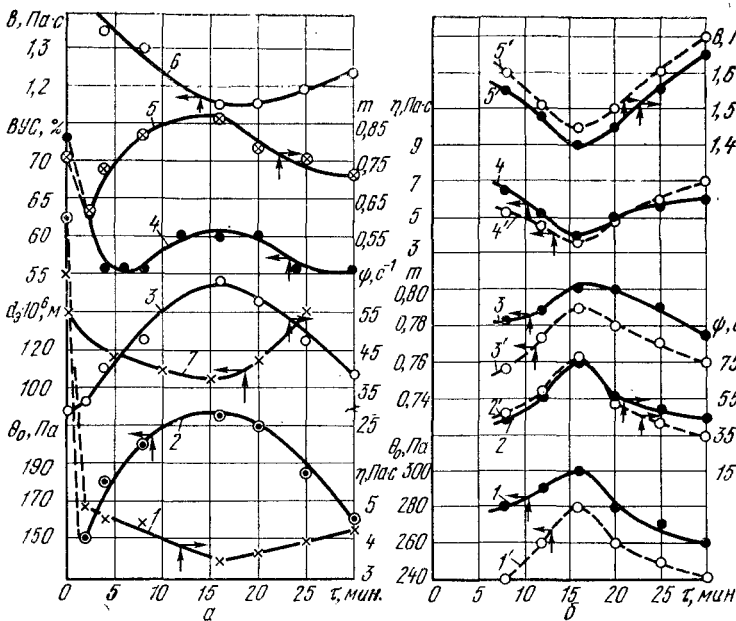


Рис. 40. Зависимость от продолжительности куттерования реологических и технологических характеристик:

a — рыбной массы с водой: 1 — пластическая вязкость; 2 — предельное напряжение сдвига; 3 — пластичность (отношение предельного напряжения сдвига к пластической вязкости); 4 — водоудерживающая способность; 5 — темп разрушения структуры; *б* — колбасного фарша: 1 — предельное напряжение сдвига; 2 — пластичность; 3 — темп разрушения структуры; 4 — пластическая вязкость; 5 — единичная вязкость (индекс «штрих» — кривые для фарша с добавлением 0,5% фосфата).

градиентов скоростей темп разрушения структуры существенно влияет на эффективную вязкость.

Творожно-сырковые массы

Реологические свойства творожно-сырковых масс определяли на вискозиметрах «Реотест» и РВ-8 и при одинаковых способах обобщения получили совпадающие результаты [120]. Химический состав и реологические характеристики творожных масс показаны в табл. 19. Массу готовили по технологии особой творожной массы но с различным содержанием составляющих компонен

тов с целью выяснения их влияния на реологические свойства.

Для обобщения результатов исследований эмпирически подобрали комплексный коэффициент

$$K = ж + U + б + \frac{с}{б} - \frac{с}{U}, \quad (\text{III}-19)$$

где *ж* — жиросодержание, или отношение массы жира к общей массе продукта без жира, кг/кг;

U — влагосодержание, т. е. отношение массы влаги к массе сухого остатка, кг/кг;

б — содержание белка и золы, т. е. отношение массы белка и золы к общей массе продукта без них, кг/кг;

с — содержание сахара, или отношение массы сахара к общей массе продукта без сахара, кг/кг.

Т а б л и ц а 19

№ пробы	Химический состав. кг/кг				Коэф-фициент К	Реологические характеристики			
	<i>ж</i>	<i>U</i>	<i>с</i>	<i>б</i>		$\sigma_{\text{д. Пд}}$	$\eta_{\text{Па-с}}$	<i>B</i>	<i>t</i>
1	0,333	0,484	0,541	0,0787	6,65	64	7	1,2	0,59
2	0,351	0,484	0,518	0,0787	6,42	73	21	2,1	0,59
3	0,282	0,725	0,354	0,1100	3,85	93	15	2,4	0,59
4	0,316	0,730	0,321	0,1050	3,77	102	25	2,9	0,61
5	0,220	0,811	0,389	0,1012	4,49	58	11	1,5	0,60
6	0,282	0,725	0,429	0,0638	7,21	88	30	3,3	0,58
7	0,282	0,736	0,368	0,0953	4,47	58	11	1,5	0,60
8	0,316	0,650	0,357	0,1150	3,63	73	21	2,2	0,59
9	0,282	0,780	0,352	0,0894	4,64	58	11	1,3	0,61
10	0,282	0,767	0,368	0,0835	5,06	73	12	1,7	0,61
11	0,250	1,840	—	0,1792	2,27	263	30	5,7	0,62

Из табл. 19 видно, что темп разрушения структуры незначительно изменяется при изменении химического состава продукта; остальные реологические характеристики имеют экстремальные значения при $K=4,5 \div 5,0$. В пробе № 11, из которой приготовлены образцы массы с четным номером, отсутствие сахара и повышенное содержание белков приводит к большим значениям структурно-механических свойств по сравнению с остальными образцами, что можно объяснить упрочне-

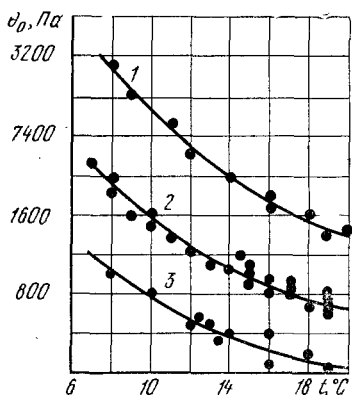


Рис. 41. Зависимость предельного напряжения сдвига творожно-сырковой массы от температуры и кратности прохождения через эксцентриково-лопастной насос:

1 — до насоса; 2 — однократное прохождение; 3 — многократное.

нием структуры вследствие усиления сцепления между коагуляционными частицами.

Обобщение экспериментальных данных по комплексному коэффициенту дает ошибку до $\pm 20\%$.

Механическое воздействие на сырковую массу ведет к разрушению ее структуры. На рис. 41 показано изменение предельного напряжения сдвига сырковой массы в зависимости от температуры и кратности прохождения через эксцентриково-лопастной насос; измерения проведены с помощью сдвигомера Симоняна. Интенсивное мятые и перетираные продукта вызывает резкое снижение предельного

напряжения сдвига. В итоге из пластично-вязкого тела продукт превращается в жидкообразную систему без статического предельного напряжения сдвига. Аналогичные результаты наблюдаются при длительном перемешивании творога и особенно творожно-сырковой массы.

Сыр и плавленые сырки.

Работы, связанные с изучением реологических свойств сыров, выполнены в НПО «Углич» (В. П. Табачников, П. Ф. Крашенинин, Г. Г. Шилер и др.) и в других организациях [116].

Для инструментального определения реологических показателей использовали конические, сферические и другие инденторы, способы резания ножом, струной и т. д., способы сдвига без разрушения и с разрушением структуры, методы сжатия, растяжения и множество других [116] (см. рис. 16). Однако сопоставление значений физических величин, измеренных разными способами, практически отсутствует. По предельному напряжению сдвига (среза), измеренной прибором Табачникова, можно судить о консистенции сыра (табл. 20)

Консистенция	Предельное напряжение сдвига ($\theta_0 \cdot 10^{-3}$ Па) для сыра			
	швейцарского, советского	костромского, голландского	бескоркового (армянского, лори и т. д.)	расольного (чанах и т. п.)
Отличная	Меньше 73	Меньше 14—21	Меньше 26	Меньше 23
Хорошая	74—89	22—31	27—38	24—31
Довлестворительная	90—105	31—44	38—50	32—43
Вердая, грубая	Больше 110	Больше 45	Больше 51	Больше 43

При контроле консистенции сыра с помощью конических и сферических инденторов обычно получают условные единицы показателя консистенции, которые хорошо коррелируют с органолептической оценкой. Несомненно, ценность этих данных повысилась бы при выражении их в физических величинах. В этом смысле заслуживают внимания исследования [24], в которых через массу сыра проводили сферический индентор диаметром 0,016 м с постоянной для каждого опыта скоростью (рис. 42).

Предельные давления определяли как отношение силы к площади поверхности полусферы. Следует отметить также, что в своих исследованиях авторы [24, 166] использовали инденторы различной формы. Однако сравнительный количественный анализ их работы не был проведен. Методика расчета характеристик, предлагаемая авторами, дискуссионна. Академик И. А. Ребиндер [147] считает, что предельное напряжение сдвига реализуется при течении или сдвиге слоя системы вдоль боковой поверхности индентора. Тогда оно определяется проекцией действующей на индентор силы на его образующую, отнесенной к площади боковой поверхности индентора, находящейся в соприкосновении с продуктом (сила вдоль поверхности к площади той поверхности).

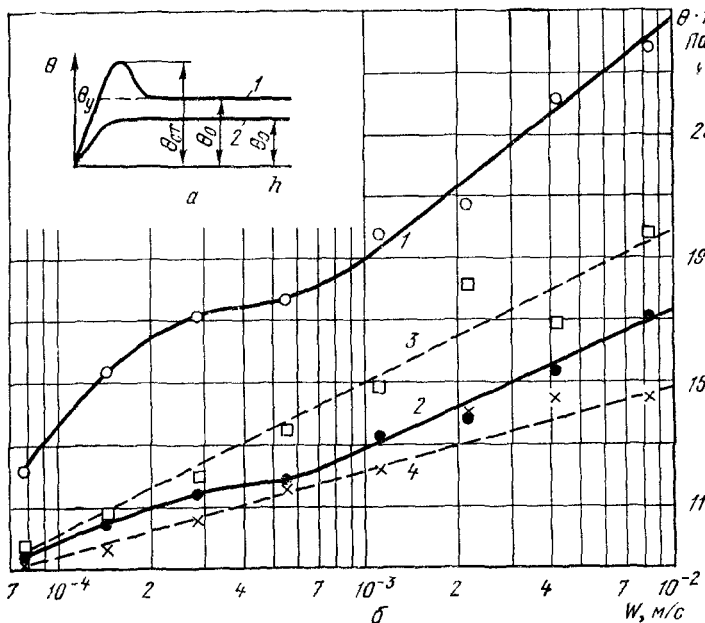


Рис. 42. Зависимость предельных давлений при прохождении конического индентора через массу костромского сыра после 45 дней его хранения:

a — от глубины внедрения: 1 — для сыров, обладающих упругостью формы; 2 — для сыров, не обладающих упругостью формы (пластичных); θ_y — предел упругости; $\theta_{ст}$ — статистическое предельное давление; θ_0 — динамическое предельное давление; b — от скорости внедрения: 1, 3 — статистическое; 2, 4 — динамическое предельное давление; 1, 2 — для сыра без сывороточных белков; 3, 4 — для сыра с 0,004 кг белков (в пересчете на сухое вещество) на 100 г молока.

Для систем с прочной структурой течение невозможно, здесь происходят пластические деформации смятия. Поэтому П. А. Ребиндер [147] предлагает определять предельное давление, которое рассчитывается делением силы на горизонтальную проекцию наибольшей площади соприкосновения индентора с продуктом. Для шарового индентора это будет не площадь поверхности полусферы, а площадь сечения сферы, т. е. окружность. Очевидно, что для получения инвариантных данных необходимо провести сравнительные исследования с различными инденторами, рассчитывая характеристическое давление двумя способами.

В свежих сырах, как правило, кривые течения имеют вид, изображенный на рис. 42, *а* (кривая 2); после выдержки более 15 дней кривые течения имеют горб (кривая 1). Эксперименты показывают, что добавление сывороточных белков способствует разрыхлению структуры сыра и ослаблению ее прочности. Этот вывод, по мнению авторов [24], подтверждается данными о пористости сырной массы. С увеличением дозы вносимых сывороточных белков максимальный диаметр пор увеличивается. Такой характер влияния сывороточных белков на структуру сыра объясняется тем, что сывороточные белки повышают влажность сырной массы. Следовательно, плотность ее уменьшается и сывороточные белки способствуют понижению прочности структуры, так как препятствуют сжатию пространственной сетки геля, являясь веществом, занимающим в ней определенный, мало изменяющийся в процессе созревания объем.

Реологические свойства плавленых сыров были исследованы О. П. Боровиковой и др. [18, 80, 184]. В качестве объектов исследования были выбраны плавленые сыры «Новый», «Дружба» и «Янтарь» [18, 80]. Эти сыры значительно отличаются друг от друга по рецептуре, химическому составу и технологии изготовления, что позволяет установленные для них общие закономерности распространить и на другие виды сыров.

Основные опыты проведены на вискозиметре «Реостет». Влияние температуры на сдвиговые свойства плавленых сыров определяли при температуре от 50 до 115° С при скоростях деформации от 0,167 до 1310 с⁻¹. Образцы термостатировали в течение 15 мин.

При длительном деформировании (до 1200 с) с постоянной для каждого опыта скоростью (рис. 43, *а*) при температурах 70, 80, 90 и 95° С у сыров всех видов наблюдалось понижение эффективной вязкости в первый период (от 50 до 300 с). Это явление связано с тиксотропным разрушением структуры. В зависимости от вида сыра, температуры и скорости деформации эффективная вязкость достигает определенного минимального значения и в течение некоторого времени остается практически постоянной, в дальнейшем в большинстве случаев эффективная вязкость начинает заметно повышаться. Увеличение значений вязкости, вероятно, связано с реопексией плавленых сыров (см. рис. 5).

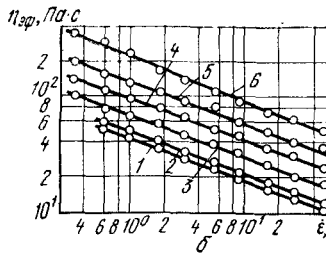
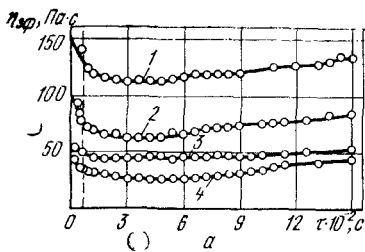


Рис. 43. Зависимость эффективной вязкости плавленого сыра «Кивий»:

a — при температуре 70° С — от длительности деформирования при скоростях деформаций: 1 — 0,333 с⁻¹; 2 — 1,80; 3 — 5,40; 4 — 16,20 с⁻¹; *б* — от скорости деформации при температурах: 1 — 95° С; 2 — 90; 3 — 80; 4 — 70; 5 — 6 — 50° С.

По реограммам определяли эффективную вязкость (рис. 43, б) и вязкость при единичном значении скорости деформации. Эффективная вязкость плавленых сыров с увеличением скорости деформации сдвига уменьшается по степенному закону (I—39). С повышением температуры вязкость при единичном значении градиента скорости уменьшается по экспоненциальному закону Френкеля-Эйринга (I—50), (I—51). Обобщенное уравнение для расчета эффективной вязкости ($\eta_{\text{эф}}$ Па·с) имеет вид

$$\eta_{\text{эф}} = \left[A \exp \left(\frac{E}{RT} \right) \right] \dot{\epsilon}_*^{-m}, \quad (\text{III—})$$

где *A* — предэкспоненциальный множитель, Па·с;
E — энергия активации, Дж/моль;
R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К) [*R* = 8,32 Дж/моль·К];
T — абсолютная температура, К;
 $\dot{\epsilon}_*$ — числовое значение скорости деформации;
m — темп разрушения структуры.

Выражение в квадратных скобках представляет собой эффективную вязкость (B_0^* по уравнению I—39) при скорости деформации, равной единице. Вычисленные по экспериментальным данным постоянные величины представлены в табл. 21 при значениях скорости деформации по уравнению (II—30) от 1 до 10³ с⁻¹. При вычислениях по формуле (III—20) отклонения не превышают ±5% от опытных значений.

Таблица 21

Плавленный сыр	Коэффициенты			Пределы изменения температуры, К
	A, Па·с	E, Дж/моль	<i>m</i>	
«Новый»	$1,3 \cdot 10^{-3}$	31900	0,36	50—95
«Янтарь»	$7,7 \cdot 10^{-10}$	66000	0,26	50—95
«Дружба»	$2,6 \cdot 10^{-6}$	43300	0,67	60—95

Примечание. Значения коэффициентов отличаются от приведенных в специальной литературе [154] вследствие их уточнения по дополнительно проведенным экспериментам.

Содержание жира в плавленом сыре влияет на его сдвиговые свойства. Исследования [18] выполнены на образцах из обезжиренного сыра с добавлением сливочного масла, воды и 2% соли-плавителя (динатрийфосфата). Добавляя различное количество сливочного масла и воды, меняли содержание жира в сухом веществе сыра. Образцы имели жирность по сухому веществу 0,11; 0,20; 0,31; 0,39 кг жира на 1 кг сухого остатка. Влажность сыра поддерживали постоянной, равной 0,603 кг влаги на 1 кг сыра. Сырную массу плавил при температуре 80°С в течение 10 мин. При этой же температуре определяли сдвиговые свойства сыра на вискозиметре РВ-8.

С увеличением содержания жира значения сдвиговых характеристик резко уменьшаются; в исследованном диапазоне единичная вязкость уменьшается более чем в два раза, а кажущееся предельное напряжение сдвига — от 450 до 20 Па.

На сдвиговые свойства плавленого сыра [184] влияют соли-плавители. Наибольшую эффективную вязкость, а также повышенную эластичность плавленому сыру сообщают натриевые соли, соли лимонной и триоксиглутаровой кислот. Эффективная вязкость и эластичность ниже у плавленых сыров с фосфорнокислыми солями, особенно с динатрийфосфатом. При увеличении содержания солей от 1,5 до 2,5% эффективная вязкость повышается и консистенция становится более однородной и вязкой.

СДВИГОВЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ И ВЛИЯНИЕ НА НИХ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Жидкообразные продукты не имеют предельного напряжения сдвига, т. е. течение начинается при сколь угодно малых напряжениях сдвига. Обычно, за исключением истинно вязких жидкостей, эти продукты имеют слабую структурную сетку и обладают аномалией течения. Один и тот же продукт в зависимости от интенсивности механического воздействия, влажности (концентрации) или температуры часто может переходить из одной группы тел в другую. Реологические свойства жидкообразных продуктов имеют самостоятельное значение для расчета машин и аппаратов и, кроме того, позволяют глубже оценить процессы, связанные с переработкой сырья и продуктов и оценкой их качества.

Вязкость мясо-костного бульона. В области температур 40—95° С (рис. 44) вязкость (η , Па·с) описывается степенным уравнением, при этом ошибка составляет не более $\pm 2\%$:

$$\eta = a_1 t^{-a_2}, \quad (\text{III} - 2)$$

где эмпирические коэффициенты a_1 и a_2 зависят от концентрации бульона [см. уравнение (I—53)]; после об-

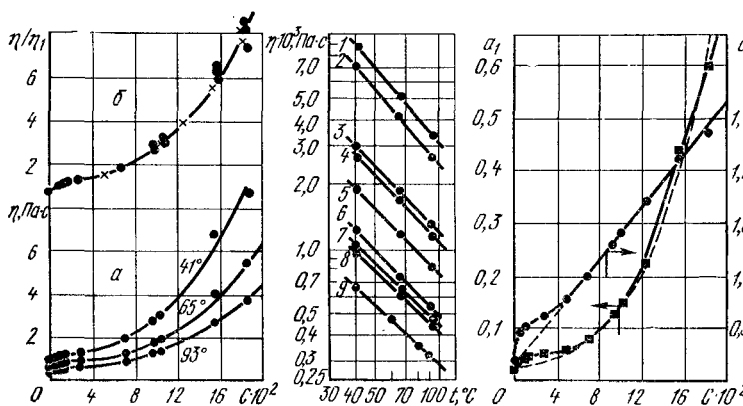


Рис. 44. Температурные зависимости вязкости мясо-костного бульона при различной концентрации [номера кривых соответствуют данным табл. 22 и уравнений (III—21) и (III—22)].

работки по экспериментальным данным уравнение (III—21) приводится к расчетному виду:

$$\eta = \frac{\exp(19,3c)}{52,5t^{1,26c+0,92}}, \quad (\text{III—22})$$

где c — концентрация сухих веществ в долях единицы по массе, кг сухого остатка на 1 кг продукта.

При $c=0$ уравнение (III—22) описывает температурные изменения вязкости воды с ошибкой $\pm 1,5\%$: $\eta_{\text{в}} = 0,01905 t^{-0,92}$. При c до 0,05 уравнение дает несколько заниженные результаты. Величины вязкости мясо-костного бульона при различной концентрации и температуре приведены в табл. 22.

Таблица 22

Номер пробы	Концентрация c , кг сухого вещества на 1 кг бульона	Вязкость $\eta \cdot 10^3$ (Па·с) при температуре, °C		
		41	65	93
1	0,1817	8,73	5,05	3,36
2	0,1545	6,80	4,10	2,70
3	0,1020	2,95	1,82	1,27
4	0,0955	2,70	1,68	1,16
5	0,0694	1,87	1,17	0,83
6	0,0266	1,15	0,72	0,53
7	0,0119	1,04	0,64	0,47
8	0,0076	0,96	0,60	0,44
9	0,0000	0,644	0,436	0,306

Эти данные получены на капиллярных вискозиметрах и вискозиметре Гепплера.

Клеевые и желатиновые бульоны при одной и той же концентрации имеют различную вязкость, что объясняется способом получения бульона и количественным соотношением в нем белков [115]. А. А. Соколов [160] приводит величины условной вязкости в градусах Энглера стандартного раствора клея (17,75% сухих веществ) при температуре 30°С: от 1,8 до 6 (0,01 до 0,045 Па·с). Вязкость мясо-костного бульона при этих же условиях — более стабильная величина, равная 2,1° Е (около 0,013 Па·с). Растворы желатина той же концентрации при 40°С имеют вязкость 15—40° Е (от 0,11 до 0,3 Па·с). Следует отметить, что реологические

свойства желатиновых растворов (золей и гелей) зависят от многих технологических факторов и молекулярного строения; изучены они еще недостаточно. Вязкость бульонов, гелей яичного альбумина [72], во время выдержки уменьшается, причем тем больше, чем выше температура выдержки.

Подробно теоретические и практические аспекты структурообразования в белковых системах и их вязкостные свойства изложены в монографии В. Н. Измайловой и П. А. Ребиндера [73].

Вязкость топленых животных жиров. Зависимость вязкости (η , Па·с) от температуры можно представить уравнением вида (III—21). Значения эмпирических коэффициентов и вязкости, входящих в это уравнение, приведены в табл. 23, 24.

Таблица 23

Жир	Температура, °С		Коэффициенты к уравнению (III—21)	
	плавления	застывания	a_1	a_2
Говяжий	42—52	34—38	33,4	1,80
Бараний	44—55	34—45	23,6	1,70
Свиной	28—48	22—32	21,5	1,71
Костный	—	—	14,8	1,63
Рыбий	—	—	10,0	1,75

Таблица 24

Кривая на рис. 45	Область температур, °С	$A \cdot 10^4$, Па·с	E , кДж/кмоль (ккал/кмоль)
1	65—100	1000	20800 (4960)
2	40—65	32,5	30500 (7280)

Производственные композиции жира отличаются по вязкости от величин, вычисленных по уравнению (III—21) (см. табл. 23) в пределах $\pm 4\%$. Более точно описывает физическую сущность температурных изменений вязкости жира уравнение Френкеля-Эйринга (рис. 45):

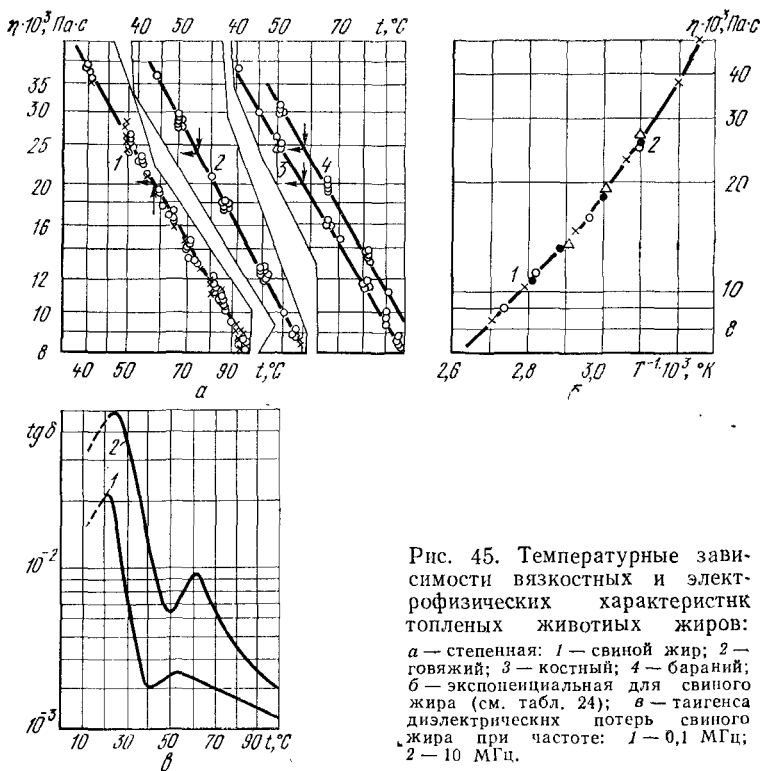


Рис. 45. Температурные зависимости вязкостных и электрофизических характеристик топленых животных жиров: а — степенная: 1 — свиной жир; 2 — говяжий; 3 — костный; 4 — бараний; б — экспоненциальная для свиного жира (см. табл. 24); в — тангенса диэлектрических потерь свиного жира при частоте: 1 — 0,1 МГц; 2 — 10 МГц.

$$\eta = A \exp\left(\frac{E}{RT}\right), \quad (\text{III}-23)$$

где E — энергия активации, кДж/кмоль;
 R — универсальная газовая постоянная;
 $R = 8,32$ кДж/(кмоль·К);
 T — абсолютная температура жидкости, К;
 A — постоянная, Па·с.

Экспоненциальная зависимость вязкости, полученная при многократных исследованиях производственных композиций топленого свиного жира I сорта, приведена на рис. 45, б. В исследованном диапазоне температур графическая зависимость имеет два излома. Каждый участок прямых на графике характеризуется своей

величиной энергии активации; с увеличением температуры она уменьшается скачкообразно при плавлении следующей фракции триглицеридов жирных кислот, конечно, если содержание фракций более или менее значительно. Постоянные для зависимостей, изображенных на рис. 45, приведены в табл. 24.

Вязкость жира в области от температуры плавления до 65—70°С при нагревании и охлаждении не имеет одинаковых значений, что связано с аномалией (наличие дисперсной фазы в виде кристалликов жира при нагревании) в этом температурном диапазоне. При переходе за верхний температурный предел аномалии вязкости исчезают, жир становится истинно вязкой жидкостью. При охлаждении ниже 27°С, если механическое воздействие отсутствует, в свином жире начинается образование сплошного кристаллизационного каркаса и он теряет текучесть. Существует зависимость между йодным числом жира и вязкостью, которая уменьшается пропорционально увеличению йодного числа для всех температур — от 60 до 90°С [152].

Хорошо описывает температурные изменения вязкости жира уравнение Бачинского [136], которое имеет теоретические обоснования, сделанные Предводителевым, Широковым и др.:

$$\eta = \frac{\nu}{v - \omega} \quad \text{или} \quad \frac{1}{\eta} = \frac{1}{\nu} v - \frac{\omega}{\nu}, \quad (\text{III}-24)$$

где $v = \frac{1}{\rho}$, ω — удельный и предельный объемы жидкости соответственно, м³/кг;
 ρ — плотность жира, кг/м³;
 ν — модуль вязкости, м²/с.

Величина предельного объема находится в области между удельными объемами жидкости и твердого тела. Для свиного жира она равна $11,1 \cdot 10^{-4}$ м³/кг, что соответствует плотности 900 кг/м³ при температур 30,8°С. Разность $v - \omega$ характеризует свободный объем с увеличением которого (при нагревании) вязкость уменьшается. Данное уравнение неприменимо при температуре ниже температуры плавления. Экспериментально определены температурные зависимости плотности и удельного объема: плотность свиного жира температурой связана соотношением $\rho = 915 - 0,5$ удельный объем $v = (10,908 + 0,0065 t) 10^{-4}$.

Постоянные к уравнению Бачинского определены по экспериментальной зависимости $\frac{1}{\eta}(v)$; расчетный вид этого уравнения для свиного жира следующий:

$$\eta = \frac{3,75 \cdot 10^{-7}}{v - 1,11 \cdot 10^{-3}}$$

Уравнение требует высокой арифметической точности при вычислениях, поэтому не совсем удобно для практического использования.

Л. К. Николаев [128] для расчета эффективной вязкости свиного жира ($\eta_{эф}$, Па·с) в области температур от 12 до 26° С предлагает зависимость

$$\eta_{эф} = 7 \cdot 10^3 \exp[-(0,082t + 0,757 \ln \epsilon)], \quad (\text{III—25})$$

которая справедлива при изменении градиента скорости (ϵ , с⁻¹) от 0,167 до 4,5 с⁻¹ [см. уравнение (II—30)].

Экспериментальные данные, по которым выведена зависимость (III—25), получены на ротационном вискозиметре «Реотест.» Л. К. Николаев отмечает, что вязкость жира при 50° С удовлетворительно согласуется с данными автора [40]. При этом расхождение результатов не превышает 7—10%.

Электрофизические и вязкостные характеристики жидкообразных продуктов. Электрофизические параметры топленого свиного жира снимали при двух частотах: 100 кГц и 10 МГц. Образцы термостатировали и выдерживали при каждой температуре в течение 1 ч, скорость подъема температуры составляла 1° С/ч. Данные, полученные в результате измерений, представлены на рис. 45, в. Температурный ход наиболее полно характеризует тангенс угла диэлектрических потерь. Реологические показатели того же жира были определены на вискозиметре Уббелоде. Перепад давлений меняли от 3 до 40 мм вод. ст., что соответствует напряжению сдвига от 1 до 11 Па. Для исследований жир был вытоплен в лабораторных условиях.

В силу неоднородности компонентов, составляющих жир, плавление фракций начинается с 3—5° С и заканчивается при 65—67° С. Кристаллизационная структура жира при низких температурах термодинамически неустойчива и при повышении температуры до-

вольно быстро разрушается. До температуры 26—27° С структурная сетка пронизывает весь объем вещества. При этой температуре тангенс угла потерь имеет максимум (см. рис. 45, в), а затем с увеличением температуры снижается; кристаллизационная структура жира интенсивно разрушается, а текучесть, естественно, увеличивается. При достижении температуры около 35° С комплексная диэлектрическая проницаемость достигает максимума. Тангенс угла потерь имеет минимум при 40 и 50° С в зависимости от частоты тока; при 100 кГц этот минимум в большей мере совпадает с изломом линии температурной зависимости вязкости. Из теории жидкого состояния [180] следует, что каждой температуре соответствует своя частота колебаний молекул и вязкость системы зависит от частоты колебаний молекул. Вероятно, полную аналогию вязкостных и электрофизических характеристик можно достигнуть, когда частота вынужденных колебаний (электрического поля) совпадает с частотой собственных колебаний молекул или приближается к ней.

В области температур от 35 до 62° С жир представляет собой систему, состоящую из осколков кристаллизационной структуры (дисперсная фаза) и дисперсионной среды из жидких фракций. При повышении температуры до 62—67° С наблюдается еще одна аномальная область, где кривая вязкости имеет излом, а кривая тангенса угла диэлектрических потерь — второй максимум. Здесь большее совпадение отмечается при частоте поля 10 МГц. При дальнейшем увеличении температуры жир приобретает свойства истинно вязкой жидкости.

Можно полагать, что количество максимумов и минимумов функции тангенса потерь должно соответствовать числу фракций жира. Однако удалось зафиксировать лишь две области, в которых систематически наблюдались экстремальные значения.

Полученные результаты позволяют более глубоко рассмотреть физическое строение продуктов. Кроме того, эти сведения можно использовать при разработке систем автоматического регулирования.

Электропроводность и вязкость молока как типичной коллоидно-дисперсной белково-жировой системы

[153] предопределяются свойствами дисперсионной среды — воды. В то же время не исключается вероятность некоторого изменения их в зависимости от вида сырья [149], однако общая закономерность, присущая воде, при этом сохраняется (рис. 46).

Значение вязкости воды не отвечает уравнению Френкеля для диапазона температур 0—100° С. Криволинейные участки можно аппроксимировать тремя прямыми со скачкообразным уменьшением энергии активации. В этом же диапазоне температур вязкость молока также удовлетворительно аппроксимируется тремя прямыми (см. рис. 46). Однако температурные интервалы каждого отрезка прямой, как видно на графике, для молока и воды, а также значения энергии активации отличаются. Для первой зоны температурные интервалы и величины энергии активации следующие: для воды $E_{0-20^\circ\text{C}} = 19\,000$, молока $E_{5-34^\circ\text{C}} = 22\,800$ (см. табл. 25). Избыток энергии активации слабых связей подтверждается тем, что при 40-кратном пропускании через капилляр вязкость молока падает на 10%, после выстоя значительно восстанавливается. Таким образом, вязкость можно представить как сумму вязкости воды η_v и приращений от наличия дисперсной фазы (белки, жир, углеводы) $\Delta\eta_\phi$ и от структурной сетки $\Delta\eta_{\text{стр}}$:

$$\eta_{\text{мол}} = \eta_v + \Delta\eta_\phi + \Delta\eta_{\text{стр}} = \eta_v (1 + 4,5\phi) + \Delta\eta_{\text{стр}}, \quad (\text{III}-26)$$

где ϕ — объемная концентрация дисперсной фазы по Гатчеку [136].

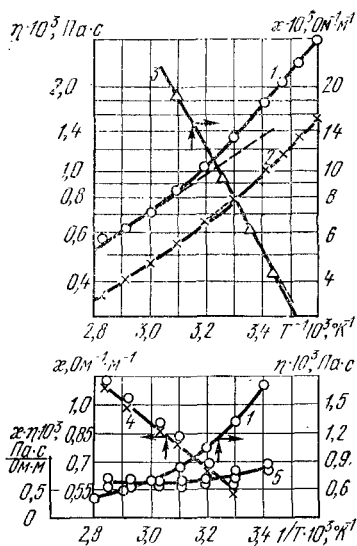


Рис. 46. Зависимости вязкости молока (1) и воды (2), электропроводности идеально чистой воды (3) и молока (4), произведения вязкости и электропроводности молока (5) от обратной абсолютной температуры.

Структурная составляющая вязкости исчезает при температуре выше 34°C в связи с плавлением кристаллов жира и интенсивным тепловым движением самих элементов структуры. При температуре, превышающей 60°C , на имеющуюся аномалию вязкости накладываются аномальные изменения белков и углеводов молока. При среднем составе молока: воды 87—89% сухого вещества 13—11%, газа по объему 3—6% для расчета повышения вязкости за счет наличия дисперсной фазы приемлема формула Гатчека:

$$\eta = \eta_{\text{в}} (1 + 4,5\varphi), \quad (\text{III}-26)$$

если считать, что при температуре выше 20°C растворенный газ улетучивается.

Зависимость $\lg \eta \left(\frac{1}{T} \right)$ молока и воды дает прямую линию (см. рис. 46). Если за нулевую принять точку перегиба, где обратная абсолютная температура $\frac{1}{T_{\text{кр}}} = 0,00325$ ($T_{\text{кр}} = 307,7 \text{ K}$), вязкость молока $1,15 \cdot 10^{-3}$, воды $0,69 \cdot 10^{-3}$ (действительная вязкость воды $0,73 \cdot 10^{-3}$ — см. рис. 46), то на основании уравнения (III—23) получим

$$\eta = A_1 \exp \left(\frac{E}{R} T^* \right), \quad (\text{III}-27)$$

где T^* — избыточная обратная абсолютная температура, K.

Значения коэффициентов, входящих в уравнение (III—27), даны в табл. 25.

Если в уравнение (III—27) вместо T^* подставить ее значение, то получим уравнение Френкеля в обычном его написании (III—23), где предэкспоненциальный множитель равен $1,59 \cdot 10^{-7}$. Введенная новая переменная позволяет более наглядно сравнивать обе температурные зависимости вязкости молока и воды.

Предэкспоненциальный множитель в уравнении (III—27) связан с вязкостью воды при температуре $307,7 \text{ K}$ уравнением (III—26, a):

$$\eta = 0,69 \cdot 10^{-3} (1 + 4,5 \cdot 0,13) = 1,1 \cdot 10^{-3}.$$

Продукт	Коэффициенты к уравнению (III-27) для температур			
	5—35° С; $T^* = \frac{1}{T} - 0,00325$		50—80° С; $T^* = \frac{1}{T} - 0,0028$	
	$A_1 \cdot 10^3,$ Па·с	$E,$ кДж/кмоль	$A_1 \cdot 10^3,$ Па·с	$E,$ кДж/кмоль
Вода	0,69	19000	0,34	13400
Молоко	1,15	22800	0,53	13400
«Бесструктурное» молоко	1,15	19000	—	—

При действительном значении вязкости воды $0,73 \cdot 10^{-3}$ Па·с получим $1,16 \cdot 10^{-3}$ Па·с, т. е. величину, близкую вычисленной для молока (см. табл. 25). Разница в угловых коэффициентах в области низких температур для воды и молока (энергия активации) дает $\Delta E = 3800$ кДж/кмоль. Следовательно, при отсутствии структурообразования вязкость молока выражалась бы зависимостью, изображенной на рис. 46, т. е. ΔE характеризует дополнительную энергию структурообразования (см. табл. 25). Компонент структурной составляющей вязкости определяется из соотношения:

$$\frac{\ln \eta}{\eta_{6c}} = \exp\left(\frac{3800}{R} T^*\right), \quad (\text{III}-28)$$

где η_{6c} — вязкость «бесструктурного» молока.

С учетом предыдущих соотношений зависимость (III-26) после преобразований для температур от 0 до 35° С принимает вид.

$$\eta = 0,69 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{19000}{R} T^*\right) \left\{ (1 + 4,5\varphi) + \right. \\ \left. + 1,67 \left[\exp\left(\frac{3800}{R} T^*\right) - 1 \right] \right\}. \quad (\text{III}-29)^*$$

* Член, стоящий перед фигурной скобкой, показывает температурные изменения вязкости воды; 4,5 φ — поправка вязкости на дисперсную фазу; второй комплекс в фигурных скобках — поправка на наличие структуры.

Для области температур 50—80° С средняя линия температурной зависимости вязкости молока параллельна аналогичной для воды. Интервал от 34 до 50° С описывается с ошибкой до 5% в сторону уменьшения уравнения для интервала 50—80° С (см. рис. 4 и табл. 25). Неоднократные изменения энергии активации у молока происходят так же, как у воды: две основные области и промежуточная между ними. Из рис. 46 и табл. 25 видно, что при температурах 50—80° С энергия активации для воды и молока одинакова, т. е. структурная составляющая вязкости перестала существовать. Предэкспоненциальный множитель характеризует поправку на дисперсную фазу. Его проверка по уравнению (II—26а) для температуры 357 К или 84° С (обратная температура 0,0028) дает $0,34 \times 10^{-3} (1 + 4,5 \cdot 0,13) = 0,539 \cdot 10^{-3}$; в табл. 25 — 0,53, т. е. ошибка менее 2%.

Зависимость удельной электропроводности κ ($\text{Ом}^{-1} \times \text{М}^{-1}$) идеальной чистой воды от температуры (см. рис. 46) имеет излом прямой линии при 301 К (обратная температура $3,325 \cdot 10^{-3}$). Величина излома незначительна. Электропроводность молока, измеренная при температуре от 30 до 80° С (см. рис. 46), представляет собой практически прямую линию в равномерно обратных шкалах.

Для молока была проверена возможность применения правила Вальдена-Писаржевского: произведение эквивалентной электропроводности λ на динамическую вязкость η представляет постоянную величину. Исходя из постоянной концентрации продукта, следует считать, что λ пропорциональна κ , тогда

$$\kappa \eta = \text{const.} \quad (\text{III—30})$$

Из рис. 46 (кривая 5) следует, что при температуре 20—50° С ($\frac{1}{T} \cdot 10^3 = 3,413 \div 3,096$) это правило неприменимо вследствие наличия у молока структурной составляющей вязкости. Начиная примерно с 50° С, можно говорить о применимости правила Вальдена-Писаржевского с удовлетворительной точностью, хотя некоторое снижение хода кривой наблюдается

В интервале температур 50—80° С среднее значение произведения

$$\kappa\eta = 0,6384 \cdot 10^{-3}. \quad (\text{III—31})$$

Решая совместно уравнения (III—27) и (III—31), получаем уравнение, связывающее количественно вязкость и электропроводность молока для области температур 50—80° С:

$$\kappa = 1,204 \exp\left[-\frac{13\,400}{R} T^*\right], \quad (\text{III—32})$$

Таким образом, совместные реологические и электрофизические исследования продуктов показали, что значения названных свойств изменяются подобно и имеют одинаковые критические точки. Числовые величины электрофизических свойств более зависят от химического состава (содержания соли, в частности), чем реологические, однако общий характер изменения этих свойств остается неизменным.

Вязкость сгущенного молока с сахаром [213]. При хранении сгущенного молока с сахаром его вязкость резко увеличивается, что обусловлено развитием тиксотропных свойств (табл. 26), связанных с агрегиро-

Таблица 26

Продолжительность старения, сут	Наибольшая вязкость (в Па·с) при 18° С в процессе старения при температуре, °С				
	39	39	5	39	18
1	2	3	4	5	6
0	6,0	—	—	—	—
4	15,5	—	—	—	—
8	23,0	—	—	—	—
10,5	28,0	6,0*	6,0*	—	—
12	31,0	12,5	7,0	—	—
16	37,0	27,0	8,5	—	—
17,5	40,0	—	—	7,0*	7,0*
20	43,0	40,0	9,5	25,0	11,0
24	48,5	50,0	10,0	49,0	15,0

* Разрушение структуры перемешиванием в ротационном вискозиметре в течение 30 мин; образцы для перемешивания отбирали от основной массы продукта (графа 2).

ванием молекул казеина и образованием структуры. Перемешивание или какое-либо другое механическое воздействие ведет к лавинному разрушению структуры и наибольшая вязкость резко уменьшается. При дальнейшем старении структура восстанавливается. При этом если температура восстановления равна температуре старения исходного продукта — восстановление полное, скорость восстановления структуры выше скорости образования структуры при старении исходного продукта; если температура ниже исходной (5 или 18°С) — восстановление частичное.

При восстановлении структуры возобновляется контакт между частицами дисперсной фазы. При этом чем выше температура и меньше вязкость дисперсионной среды, тем скорость образования коагуляционных контактов выше. Вязкостью дисперсионной среды объясняется быстрое и полное восстановление структуры при дальнейшей высокой температуре старения и медленное и неполное восстановление при низкой температуре. Кинетика восстановления структуры, приведенная в табл. 26, протекает в соответствии с представлениями, обоснованными акад. П. А. Ребиндером [148].

В литературе [84] имеются сведения, что сгущенное молоко с сахаром ведет себя подобно жидкостям Кэсона [см. уравнение (1—32)]. При этом А. М. Масловым исследованы тиксотропные явления. Опыты показали, что вязкость увеличивается быстро в первые 2—3 месяца старения, затем асимптотически приближается к некоторой постоянной величине.

Вязкость смесей мороженого [130]. При температурах от 5 до 40°С и изменении градиента скорости в вискозиметре «Реотест» от 121 до 1312 с⁻¹ экспериментально установлено, что смеси мороженого принадлежат к неньютоновским псевдопластичным жидкостям. Темп разрушения структуры [см. уравнение (1—38), (1—39)] составляет около 0,05. Эффективная вязкость сливочного пломбира, содержащего жир 15, сомо 10, сахара 15%, приведена в табл. 27.

По изменению вязкости мороженого можно контролировать процесс фризирования. Когда значения вязкости достигают определенной величины, повор-

Градиент скорости, с^{-1}	Эффективная вязкость (в Па·с) при температуре, °С					
	5	10	15	20	25	30
100	0,080	0,064	0,052	0,044	0,037	0,031
1000	0,067	0,054	0,045	0,037	0,030	0,025

чивается рычаг датчика и замыкает электрическую цепь, управляющую работой аппарата.

Вязкость шоколадной массы [65]. Вязкость массы (с содержанием 34,9% жира, 0,9% влаги при степени измельчения по Реутову 95%) определяли при 40°С на вискозиметрах «Реотест» и РВ-8. Полученные при разных градиентах скорости данные практически совпадают и имеют следующие значения:

градиенты скорости (в с^{-1}): 2, 4, 6, 8, 10, 14, 20, 26, 36, соответствующие им значения эффективной вязкости (в Па·с): 14,5; 7,8; 6,2; 5,3; 4,6; 4,0; 3,3; 3,2; 3,0. Величины эффективной вязкости довольно высокие, например для расплавов сливочного масла они на два порядка ниже. Поскольку предельное разрушение структуры достигается при градиентах скорости больше 30—40 с^{-1} , то при таких значениях можно контролировать качество продукта, например при производстве глазированного мороженого, творожных сырков.

Вязкость кисломолочных продуктов [89]. В процессе производства кефира реологические методы исследования можно применять как для контроля качества продукта в процессе его приготовления, так и для оценки качества готового продукта [149, 195].

Установлено, что с изменением рН среды [89], накоплением продуктов брожения, характеризующих вкус кефира, изменяются структурно-механические свойства продукта. При изменении рН от 4 до 5,2 вязкость (Па·с), измеренная с помощью реовискозиметра Гепплера при напряжении сдвига 2 Па, уменьшается по экспоненциальному закону:

$$\eta = 2000 \exp(-2,5 \text{ рН}).$$

(III—33)

При рН больше 5,6 вязкость практически составляет $3,5 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Качество продукта во многом определяется своевременным прекращением процессов сквашивания и перемешивания. Для получения кефира хорошего вкуса и нужной консистенции его надо перемешивать при рН 4,4—4,5, когда продукт имеет структуру высокой прочности, которая сохраняет свои свойства при последующем механическом воздействии и в процессе хранения.

Вязкость хорошего кефира должна быть 2,9—3,2 Па·с при касательном напряжении 980 Па и 1,6—1,9 Па·с при касательном напряжении 1960 Па. В процессе хранения при пониженных температурах в кефире может происходить отделение сыворотки. Однако если вязкость кефира выше 2,4 Па·с при касательном напряжении 980 Па, то сыворотка отделяться не будет.

Таким образом, контролируя в процессе производства кефира только рН и вязкость, можно получить продукт высокого качества.

Влияние некоторых технологических факторов на реологические свойства кисломолочных продуктов [195] качественно можно оценить следующим образом. Упругость сгустка возрастает с увеличением содержания жира до 21%, затем уменьшается. Аналогично происходит процесс отделения сыворотки. Подобное влияние оказывает и увеличение содержания сухих веществ. Режимы пастеризации почти не влияют на рН. Повышение температуры пастеризации увеличивает упругость сгустка, а длительная пастеризация уменьшает ее. Оптимальное давление гомогенизации $200 \cdot 10^5$ Па при температуре 85°С для молока и 75°С для сливок. Упругость сгустка и вязкость имеют максимальные значения без перемешивания при перемешивании через 5 ч после инкубации, когда молоко еще остается жидким.

При перемешивании степень отделения сыворотки возрастала.

Вязкость белковых масс [86]. Белковые массы получали из подсырной сыворотки и исследовали с помощью вискозиметра «Реотест» при температуре от до 70°С и содержании сухих веществ от 0,163 до

0,204 кг на 1 кг продукта. Градиент скорости изменяли в пределах от 0,167 до 145,8 с⁻¹. Массу термостатировали 30—40 мин и при каждом изменении температуры заменяли новой порцией. Темп разрушения структуры существенно зависит от диапазона градиента скорости. Установлены три области градиентов скорости: 0,167—1,8; 1,8—9,0 и 9,9—146, в которых значения темпа разрушения структуры постоянны. При изменении температуры в исследованном диапазоне от 10 до 70° С темп разрушения структуры для трех зон градиентов скорости меняется соответственно для I зоны — от 0,9934 до 0,9136; II — от 0,7645 до 0,5513; III — от 0,3117 до 0,2490. Эффективная вязкость продукта с концентрацией 0,204 кг/кг для всего интервала градиентов скорости (0,167—145,8) меняется при температуре 10° С от 700 до 9,4 Па·с; температуре 70° С — от 180 до 4,3 Па·с.

Для описания температурных изменений вязкости получены эмпирические зависимости. Однако они носят частный характер и довольно сложны для расчета. Предлагаемый температурно-инвариантный метод расчета вязкостных свойств массы может быть использован для практических целей.

Вязкость сливочного масла. Изучением этого вопроса занимались многие авторы [60, 64, 85, 106, 167, 169, 205]. Исследования в основном носили технологический характер. Сливочное масло, как и другие животные жиры, содержит различные жирные кислоты, каждая из которых имеет свои конкретные значения температур фазовых переходов из жидкого в кристаллическое состояние и обратно из кристаллического — в жидкое.

При производстве сливочного масла большое значение имеют правильно выбранные режимы охлаждения и кристаллизации жира в процессе его производства. Разработка оптимальных режимов охлаждения жира возможна лишь после комплексного исследования ряда факторов, среди которых важную роль играют такие, как температура массовой кристаллизации, содержание твердой фазы, вязкость.

В работах А. М. Маслова, А. Д. Грищенко и А. В. Конаныхина [85, 106] изучено влияние темпера-

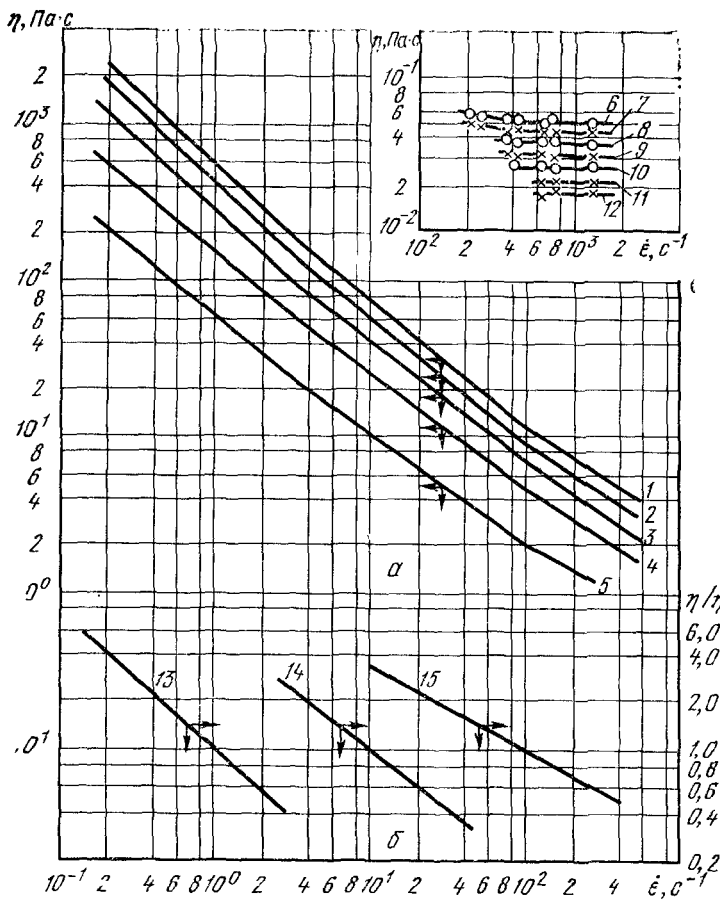


Рис. 47. Зависимость:

а — эффективной вязкости сливочного масла от градиента скорости при различных температурах: 1 — 14° С; 2 — 16; 3 — 18; 4 — 20; 5 — 25; 6 — 35; 7 — 40; 8 — 45; 9 — 50; 10 — 55; 11 — 65; 12 — 75° С; б — отношения эффективной вязкости к вязкости, найденной при различных значениях градиента скорости: 13 — при 1 с⁻¹; 14 — при 10; 15 — при 100 с⁻¹.

туры (от 14 до 75° С) и градиента скорости (от 0,16 до 1312 с⁻¹) на вязкость сливочного масла, выработанного на Угличском производственно-экспериментальном заводе ВНИИМСа методом концентрации м

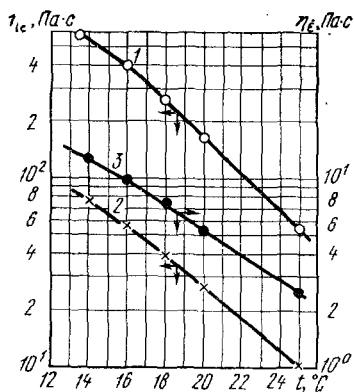


Рис. 48. Зависимость фиксированных значений вязкости сливочного масла при различных величинах градиента скорости: 1 — 1 с⁻¹; 2 — 10; 3 — 100 с⁻¹.

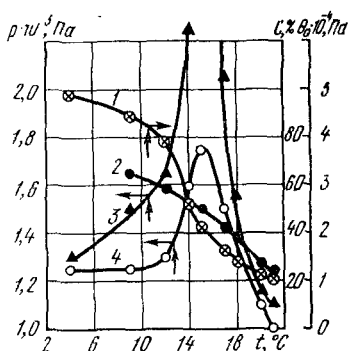


Рис. 49. Зависимость характеристик крестьянского сливочного масла от температуры: 1 — предельное напряжение сдвига; 2 — содержание твердой фазы; 3 — аутогезия; 4 — адгезия.

лочного жира. Вязкость измеряли вискозиметром «Реотест».

Сливочное масло в зависимости от температуры (рис. 47, 48) может представлять собой ньютоновскую жидкость (кривые 10, 11, 12), псевдопластичную (кривые 6, 7) и пластично-вязкую системы (кривые 1—5).

Для практического использования результатов авторами [85] был разработан упрощенный метод получения температурно-инвариантной зависимости эффективной вязкости от градиента скорости, который позволяет обезличить способ получения масла. Метод заключается в том, что весь диапазон изменения градиентов разделен на участки, в пределах каждого из них линии зависимости градиент — вязкость при разных температурах в первом приближении параллельны. Для каждого такого участка построена графическая зависимость в координатах $\epsilon - \eta | \eta_\epsilon$. Здесь η_ϵ — значение эффективной вязкости при одном из фиксированных ϵ , находящихся в границах данного участка. В указанных координатах на графике для каждого участка получается своя температурно-инвариантная характеристика вязкости, ибо опытные

точки для всех температур располагаются вдоль одной и той же линии.

Весь диапазон изменения градиентов был разбит на три участка. В пределах первого в качестве масштаба использованы значения вязкости при градиенте скорости 1 с^{-1} , в пределах второго — при 10 с^{-1} , третьего — при 100 с^{-1} (соответственно кривые 13, 14, 15 на рис. 47).

Для определения вязкости в области температур от 12 до 25°C на рис. 47 по кривым 13, 14 или 15 следует найти при заданном значении градиента отношение η/η_ε . Далее, для определения η_ε , воспользоваться рис. 48.

Реологические и технологические характеристики сливочного масла существенно меняются в зависимости от сезона, места выработки и пр. [169]. Однако следует отметить, что сливочное масло, вырабатываемое в Советском Союзе, по предельному напряжению сдвига близко к нидерландскому.

Предельное напряжение сдвига с увеличением температуры систематически уменьшается с различной степенью интенсивности. Температурные зависимости аутогезии и адгезии масла имеют характерный максимум при 15°C , совпадающий с температурной зоной интенсивного плавления молочного жира и резкого падения прочностных показателей (см. рис. 49). В области этого максимума наблюдается наибольшая разница между силами аутогезии и адгезии масла обеспечивающая максимальную (по этому показателю) возможность для фасовки масла. Подобный максимум на температурных и влажностных зависимостях адгезии для различных пищевых продуктов был отмечен в литературе [24, 33, 80, 83, 163].

Вязкость маргаринов [131] определяли с помощью вискозиметра «Реотест» при температурах от 10 до 30°C . Для обобщения данных эффективной вязкостью пользовались температурно-инвариантной характеристикой a_T :

$$a_T = \frac{T_{\text{пр}} \eta_{\varepsilon=0,5}}{T \eta_{\text{пр}}} = f(T - T_{\text{пр}}), \quad (\text{III}-34)$$

где $T_{\text{пр}}$ — абсолютная температура приведения (в К), подбирается

мая методом последовательных приближений ($T_{пр} = 283 \text{ K}$);

$\eta_{\epsilon=0,5}$ — эффективная вязкость (в Па·с) при градиенте скорости $0,5 \text{ с}^{-1}$;

T — абсолютная температура маргарина, К;

$\eta_{пр}$ — эффективная вязкость (в Па·с) при температуре приведения и градиенте скорости $0,5 \text{ с}^{-1}$.

Для приближенного определения эффективной вязкости маргаринов при любой температуре и любом градиенте скорости (от $0,1$ до 2 с^{-1}) следует пользоваться данными рис. 50. При этом значения вязкости $\eta_{пр}$ при температуре приведения и градиенте скорости $0,5 \text{ с}^{-1}$ для различных видов маргарина следующие (в Па·с): «сливочный» — 2270, «Молочный» — 2270, «Особый» — 2440, «Славянский» — 2350, «Эра» — 2150.

Вязкость сливок [60] определяется в значительной мере содержанием жировой фазы. При жирности до 30% аномалия вязкости незначительна, при 30—60%-ной жирности сливки представляют собой структурированную (по-видимому, псевдопластичную) систему, при жирности более 60% переходят в категорию пластично-вязких тел. Увеличение температуры может способствовать переходу их из одной группы тел в другую.

Значения вязкости сливок [21], измеренной при 20° C , даны в табл. 28.

Различие в результатах, по-видимому, объясняется наличием структуры в сливках, которая с увеличением

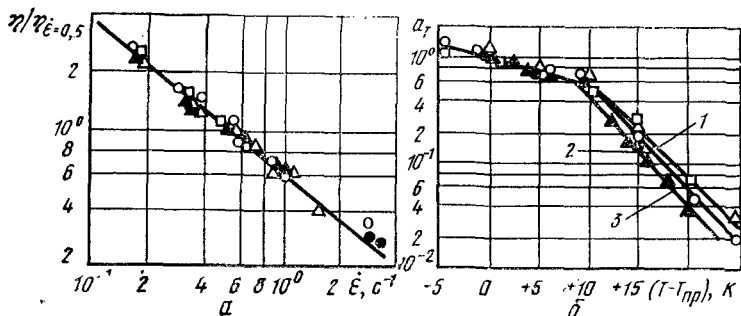


Рис. 50. Зависимости для расчета эффективной вязкости маргаринов:

а — от градиента скорости; б — от разности температур для маргарина: 1 — «Молочного» и «Особого»; 2 — «Славянского»; 3 — «Сливочного» и «Эра».

Жириность сливок, %	Вязкость сливок $\eta \cdot 10^3$, Па·с		
	Капиллярный вискозиметр с диаметром, м		Вискозиметр Гепплера, диаметр шарика 0,015628 м
	0,0008	0,001	
10	2,17	2,17	2,67
20	3,76	3,61	4,10
30	7,06	6,86	7,35

жирности проявляется в большей мере. Поэтому согласиться с данными [60] о ньютоновском течении сливок 20- и 30%-ной жирности полностью нельзя, тем более что на примере животных жиров была доказана инвариантность показаний капиллярных и шариковых приборов [40]. Возможно также, что при тарировке капиллярного вискозиметра водой [21] не соблюдался ламинарный режим движения. В работе имеется лишь указание о продолжительности истечения молока через капилляр диаметром 0,0008 м, которая составляет около 65 с.

Вязкость крови. При увеличении концентрации сухих веществ [152] вязкость крови возрастает и уменьшается при увеличении температуры [58], что наглядно видно из табл. 29.

Кривая зависимости вязкости крови от концентрации более пологая, чем для бульона, что, по-видимому, объясняется большим размером и меньшим количеством частиц в крови по сравнению с количеством ча-

Таблица 29

Вид животного	Вязкость $\eta \cdot 10^3$ (в Па·с) при температуре, °C					
	20	25	30	35	40	45
Свиньи	44,8	38,6	34,1	30,7	28,1	25,9
Крупный рогатый скот	31,3	26,4	23,0	20,4	18,4	16,8
Мелкий рогатый скот	24,0	20,0	17,2	15,1	13,5	12,2

Вид животного	Предельное напряжение сдвига θ_0 (в Па) при температуре, °С					
	20	25	30	35	40	45
Свиньи	0	0,23	0,59	0,84	1,04	1,21
Крупный рогатый скот	0	0,22	0,56	0,71	0,92	1,06
Мелкий рогатый скот	0	0,21	0,48	0,65	0,86	0,98

стиц (молекул) белка в бульоне. Известно [152], что при уменьшении размера частиц вязкость резко увеличивается при условии постоянной концентрации. Особенно это заметно в области малых размеров частиц — от 3 до 0,1 мкм, которые соизмеримы с размерами форменных элементов и молекул белка крови и бульона. Зная степень асимметрии, размер, биохимический состав и молекулярную массу белковых частиц или молекул, их концентрацию, можно связать воедино все вискозиметрические данные.

Судя по литературным источникам [152], данные о вязкости крови довольно разноречивы. На наш взгляд, представляют интерес исследования [58], выполненные с помощью вискозиметра Уббелодде (см. табл. 29.) Кроме того, авторы [58] установили, что при температуре выше 20° С в результате протекания денатурационных процессов у крови появляется динамическое предельное напряжение сдвига. Однако, как показывают реограммы, относить кровь к бингамовским системам неправомерно, она представляет собой псевдопластичную (аномально-вязкую) систему. В связи с этим следовало бы определить изменение эффективной вязкости от градиента скорости.

Для вычисления значений вязкости (η , Па·с) предложена эмпирическая зависимость [58]:

$$\eta = 1,62ct^{(5c-1,72)},$$

где c — сухой остаток (для крови свиней $c=0,209$; крупного рогатого скота $c=0,191$; мелкого рогатого скота $c=0,178$);
 t — температура крови, °С.

Разница в расчетных и экспериментальных данных не превышает $\pm 1\%$.

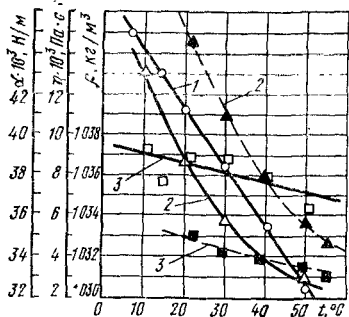


Рис. 51. Зависимость реологических характеристик меланжа весеннего (сплошные линии) и осеннего (пунктирные линии) сбора от температуры:

1 — коэффициент поверхностного натяжения; 2 — вязкость; 3 — плотность.

Для практических целей представляют интерес колебания значений вязкости и плотности крови той или иной группы животных (табл. 30).

Вязкость, плотность и коэффициент поверхностного натяжения меланжа [65]. Исследовали меланж осеннего и весеннего сбора после фильтрации и частичной гомогенизации специальными насосами. Характеристики определяли соответственно с помощью вискозиметра Оствальда — Пинкевича, пикнометра и метода наибольшего давле-

Таблица 30

Вид животного	Вязкость $\eta \cdot 10^3$, Па·с		Плотность ρ , кг/м ³	
	цельной крови	сыворокки крови	цельной крови	сыворокки крови
Свиньи	38—52	8,8—12,0	1049—1055	—
Крупный рогатый скот	30—42	7,0—12,0	1050—1060	1028—1030
Мелкий рогатый скот	23—36	7,4—11,0	1055—1060	—

ния образования пузырьков. Данные измерений приведены на рис. 51. Различия в значениях реологических свойств [65] обусловлены изменением характера откорма и содержания птицы в разное время года. Резкое уменьшение значений вязкости и поверхностного натяжения при нагревании меланжа до температуры начала денатурации, т. е. до 55—58° С, способствует существенному увеличению дисперсности его при распылительной сушке.

ГЛАВА IV

КОМПРЕССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЛОТНОСТЬ МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

КОМПРЕССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ

Осевое сжатие. Для исследования кинетики деформации фарша при осевом сжатии между двумя пластинами использовали специально сконструированный прибор, изображенный на рис. 18 [33, 55]. Поскольку скорость верхней пластины постоянна, относительную деформацию сжатия ε вычисляли по формуле

$$\varepsilon = \frac{h(\tau) - \Delta}{H_0}, \quad (\text{IV--1})$$

где $h(\tau) = \omega\tau$ — абсолютная деформация слоя продукта за время τ (в с) при скорости сжатия ω , м/с;

Δ — величина прогиба тензобалки в момент измерения, определяемая по тарировочным графикам, м (относительная доля этой величины в общей деформации не превышает 3—4%);

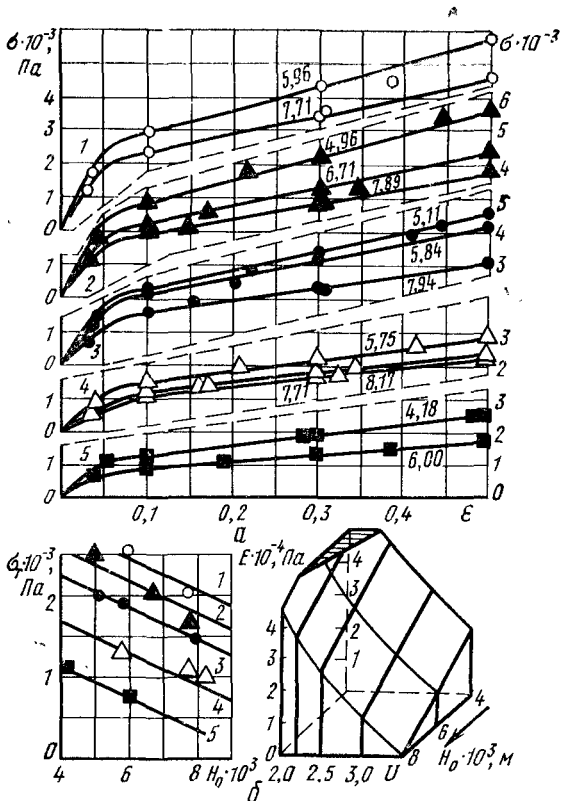
H_0 — начальная высота слоя продукта, м.

Постоянство скорости сжатия практически обеспечивает неизменность градиента скорости ($\dot{\varepsilon}$, с⁻¹), т. е. линия $\varepsilon(\tau)$ является прямой и выходит из начала координат:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\tau}. \quad (\text{IV--1a})$$

Типичные кривые кинетики развития деформации, показанные на рис. 24 для случая сдвига в коаксиальном зазоре ротационного вискозиметра, подобны аналогичным кривым при сжатии продуктов между пластинами или в замкнутом объеме.

На рис. 52, а приведены кривые напряжение — деформация: $\sigma(\varepsilon)$ для фарша русских сосисок, сжимаемого между пластинами площадью 0,0010 м² со средней скоростью $24 \cdot 10^{-5}$ м/с. Из графика видно, что величины напряжений зависят от влагосодержаний U (кг влаги на 1 кг сухого вещества) и толщины



слоя фарша. Для начальной зоны деформирования — упругой — вычислены пределы текучести σ_T (в Па) и модули упругости E (в Па) (рис. 52, б), которые так же зависят от влагосодержания и толщины слоя. Для получения инвариантных характеристик, не зависящих от толщины слоя, введена «линейная» вязкость, представляющая собой отношение напряжения сжатия к градиенту скорости (рис. 52, в). Графо-аналитической обработкой экспериментальных данных получены следующие расчетные зависимости:

для зоны упругих деформаций ($\epsilon < 0,05$)

$$\left. \begin{aligned} E &= 2,3 \cdot 10^5 \exp(-0,5U) - 500 (H_0 \cdot 10^3), \\ \sigma_T &= 1,1 \cdot 10^4 \exp(-0,5U) - 200 (H_0 \cdot 10^3), \\ \sigma/\epsilon &= 185 \cdot 10^5 \epsilon \exp(-1,17U); \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV--2})$$

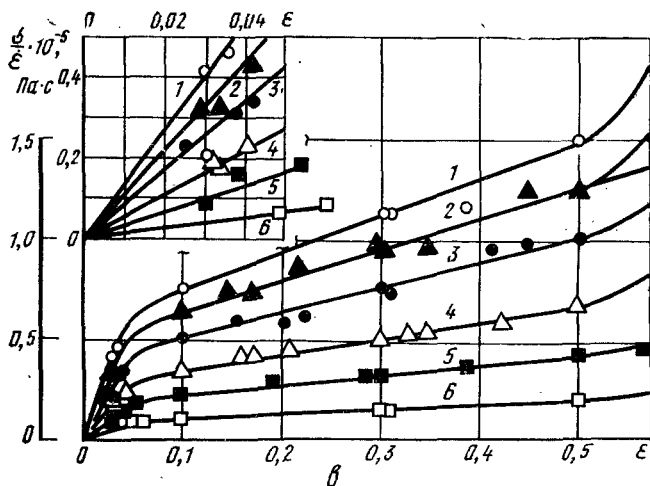


Рис. 52. Зависимости изменения основных характеристик при осевом сжатии фарша русских сосисок:

a — напряжения от относительной деформации (цифры на кривых — толщина слоя фарша в мм); *b* — предела текучести и модуля упругости от влагосодержания и толщины слоя между пластинами; *в* — линейной вязкости от относительной деформации. Влагосодержание фарша: 1—2,23; 2—2,39; 3—2,62; 4—3,00; 5—3,44; 6—4,13 кг воды на 1 кг сухого вещества.

для зоны пластично-вязкого течения ($0,1 \leq \epsilon \leq 0,5$):

$$\sigma/\epsilon = 18,5 \cdot 10^5 (\epsilon + 0,3) \exp(-1,02U). \quad (\text{IV}-2a)$$

Полученные математические выражения удобны для расчета. Зная влагосодержание продукта и необходимую степень сжатия, т. е. относительную деформацию, можно вычислить скорость деформации и напряжение сжатия при любой продолжительности процесса. Опыты с другими видами тонкоизмельченного фарша (для сарделек, докторской колбасы) показали применимость для расчетов приведенных выше зависимостей.

Результаты экспериментов по осевому сжатию, представленные в виде эмпирических зависимостей,

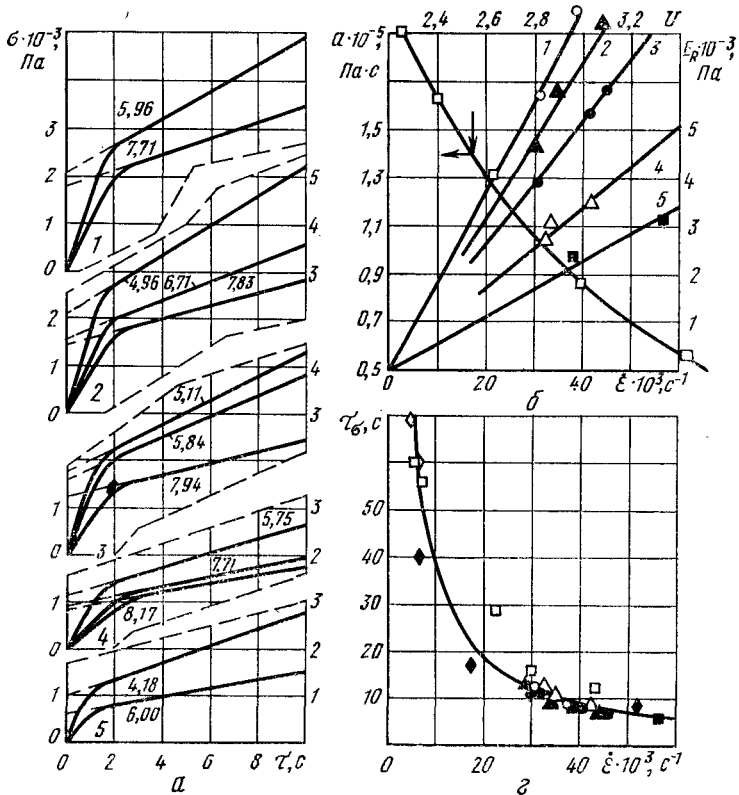
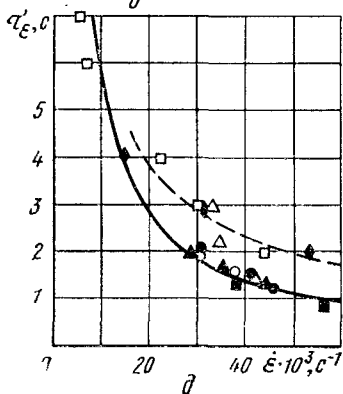
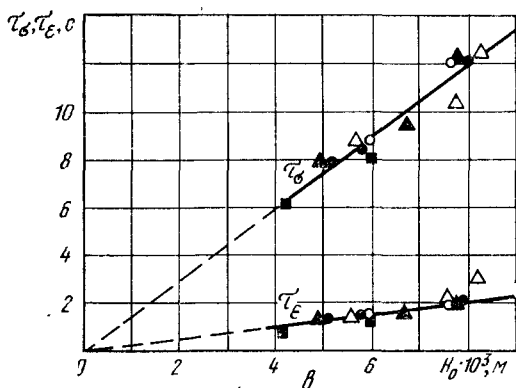


Рис. 53. Зависимости изменения релаксационных характеристик при a — напряжения от продолжительности его действия (цифры на кривых — диалента скорости и коэффициента a от влагосодержания; b — периодов релаксационной деформации. Влагосодержание фарша: 1 — 2,23; 2 — 2,39; 3 — 2,62; 4 — 3,00

были обобщены также с помощью теоретического уравнения [55]. Деформационному поведению фарша соответствует модель стандартного линейного тела (I—24), которое в приложении к случаю осевого сжатия описывается общим реологическим уравнением [154]:

$$\sigma + \tau_{\varepsilon} \dot{\sigma} = E_R (\varepsilon + \tau_{\sigma} \dot{\varepsilon}), \quad (\text{IV—3})$$

где $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{d\tau}$ — скорость увеличения напряжения, Па/с;



соевом сжатии фарша русских сосисок:

толщина слоя фарша в мм); b — релаксационного модуля упругости от гра-
 ации от толщины слоя фарша; σ , $\dot{\epsilon}$ — периодов релаксации от скорости де-
 — 3,44 кг воды на 1 кг сухого вещества.

$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{d\tau}$ — скорость деформации, 1/с;

τ_{ϵ} — период релаксации напряжения при постоянной де-
 формации, с;

τ_{σ} — период релаксации деформации при постоянном на-
 пряжении, с;

E_R — релаксационный модуль упругости, определяемый
 соотношением между упругими и пластичными ха-
 рактеристиками продукта, Па.

Прибор имеет постоянную линейную скорость опус-

кания верхнего диска, поэтому $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_* = \text{const}$ (при постоянной начальной высоте слоя продукта), $\varepsilon = \varepsilon_* \tau$. Если к тому же $\sigma_{\tau=0} = 0$, то в результате интегрирования получим

$$\sigma(\tau) = A \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_\varepsilon}\right) \right] + E_R \dot{\varepsilon}_* \tau, \quad (\text{IV-3a})$$

$$\text{где } A = E_R \dot{\varepsilon}_* (\tau_\sigma - \tau_\varepsilon). \quad (\text{IV-3б})$$

При $\tau \ll \tau_\varepsilon$ разложением экспоненты в ряд находим

$$\sigma(\tau) = \left(\frac{A}{\tau_\varepsilon} + E_R \dot{\varepsilon}_* \right) \tau; \quad (\text{IV-3в})$$

при $\tau \gg \tau_\varepsilon$ будем иметь

$$\sigma(\tau) = A + E_R \dot{\varepsilon}_* \tau. \quad (\text{IV-3г})$$

Уравнение (IV-3в) представляет собой прямую, проходящую через начало координат; уравнение (IV-3г) также представляет собой прямую, отсекающую на оси ординат отрезок A , причем в общем случае $A \leq 0$. Для фарша значение A положительно: кривые $\sigma(\tau)$ на рис. 53, а соответствуют кривым $\sigma(\varepsilon)$, изображенным на рис. 52, а.

Методика расчета постоянных достаточно проста. Так, графо-аналитически из уравнения (IV-3г) определяют A как отрезок, отсекаемый на оси ординат, и E_R — по тангенсу угла наклона прямой. Из уравнения (IV-3в) для участков кривых $\sigma(\tau)$, выходящих из начала координат (см. рис. 30, а), вычисляют

$$\tau_\varepsilon = A: \left[\frac{\sigma(\tau)}{\tau} - E_R \dot{\varepsilon}_* \right],$$

из уравнения (IV-3б)

$$\tau_\sigma = \tau_\varepsilon + \frac{A}{E_R \dot{\varepsilon}_*}.$$

Экспериментальная проверка полученных выше соотношений выполнена для фарша русских сосисок с различным влагосодержанием, фарша докторской колбасы и свиных сосисок. Характеристики фарша и изменение их значений показаны на рис. 53. Релакса-

ционный модуль упругости (рис. 53, б) зависит как от скорости деформирования, увеличиваясь с ее ростом, так и от влагосодержания фарша, уменьшаясь при его повышении. Периоды релаксации для тонкоизмельченных видов фарша практически не зависят от его состава и влагосодержания (рис. 53, г, д). Однако при повышении градиента скорости они уменьшаются. Периоды релаксации увеличиваются при возрастании толщины деформируемого слоя, если линейная скорость деформации постоянна, что наглядно видно из рис. 53, в.

Поскольку толщина слоя и градиент обратно пропорциональны, то увеличение последнего ведет к понижению периодов релаксации. Эмпирические зависимости, связывающие найденные характеристики с условиями измерения, имеют вид:

$$E_R(U, \dot{\epsilon}_*) = a\dot{\epsilon}_* = 2 \cdot 10^6 \dot{\epsilon}_* \exp(-1,05U),$$

$$\tau_{\sigma} = 0,37\dot{\epsilon}_*^{-1}, \quad \tau_{\epsilon} = 0,056\dot{\epsilon}_*^{-1}, \quad (IV-4)$$

где значения коэффициента a можно определить по приведенной формуле или по рис. 53, б.

Сравнительно большой разброс точек на рис. 53, д обусловлен экспериментальной трудностью измерения времени порядка 1—3 с. Колебание абсолютной величины периодов релаксации достигает 1 с. Зависимости $\tau^{\sigma, \epsilon}(\dot{\epsilon}_*)$ можно рассматривать как спектры периодов релаксаций по скорости деформации.

Таким образом, теория, основанная на обобщенном уравнении линейного тела, хорошо согласуется с экспериментами и дает возможность найти важные реологические характеристики колбасных фаршей. Они могут быть использованы для расчетов в технологии колбас. Однако следует подчеркнуть, что незначительная зависимость компрессионных характеристик от состава фарша, за исключением влагосодержания, делает их малопригодными для оценки качества продуктов. В этом смысле сдвиговые характеристики обладают большей универсальностью.

Компрессионные характеристики неразрушенной мышечной ткани [54]. Для исследования использован дефометр (см. рис. 18, б). Образцы охлажденного

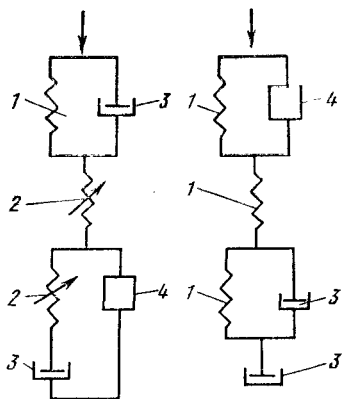


Рис. 54. Реологические модели неразрушенной мышечной ткани при осевом сжатии:

1 — линейно-упругий элемент; 2 — нелинейно-упругий элемент; 3 — вязкий элемент; 4 — элемент, фиксирующий определенное значение деформации (см. рис. 1).

четырёхглавого мускула говядины имели прямоугольную форму размером $0,03 \times 0,03 \text{ м}^2$ при высоте от 0,01 до 0,02 м. Напряжения сжатия меняли от 0 до $1,2 \times 10^5 \text{ Па}$. Структура неразрушенной мышечной ткани мяса, сложная по своему строению [54], представлена в виде мышечных волокон, связанных пространственной соединительной пленкой. Все промежутки структуры заполнены тканевой жидкостью — слабо- и сильносвязанной влагой. По характеру и прочности связи между частицами мышечную ткань можно отнести частично к конденсационно-кристал-

лизацонным системам. Подобные структуры обладают рядом свойств твердых тел, но в то же время эластичны, пластичны и т. д., что необходимо учитывать при выборе наиболее целесообразных способов и режимов технологической обработки. Несмотря на многочисленные исследования структурно-механических (реологических) свойств измельченного мяса, свойства неразрушенной мышечной ткани изучены недостаточно полно.

Для характеристики деформационного поведения мяса [54] предложена механическая модель (рис. 54, а). Общая деформация, как видно из рис. 54, складывается из нелинейно-упругой с модулем упругости $E_I(\sigma)$ (последовательно включенный элемент 2), эластической с модулем упругости E_1 и вязкостью η_1 (параллельно соединенные элементы 1 и 3) и пластической с нелинейным модулем упругости $E_{II}(\sigma)$, вязкостью η_2 и фиксатором (последовательно соединенные элементы 2, 3 и параллельно с ними фиксатор — элемент 4).

Эта модель описывается нелинейным дифференциальным реологическим уравнением второго порядка:

$$\tau_{\sigma} \frac{d^2 \varepsilon}{d\tau^2} + \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \tau_{\sigma} \frac{d^2}{d\tau^2} \left[\frac{\sigma}{E(\sigma)} \right] + \frac{d}{d\tau} \left[\frac{\sigma}{E(\sigma)} \right] + \frac{\tau_{\sigma}}{\eta} \cdot \frac{d\sigma}{d\tau} + \frac{\sigma}{\eta_2}, \quad (\text{IV-5})$$

где $E(\sigma) = \frac{E_I(\sigma) E_{II}(\sigma)}{E_{II}(\sigma) + E_I(\sigma)}$ — приведенный нелинейный модуль упругости, Па;

$$\eta = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \text{ — приведенная вязкость, Па} \cdot \text{с}; \quad (\text{IV-5б})$$

$$\tau_{\sigma} = \frac{\eta_1}{E_I} \text{ — период релаксации деформации при постоянном напряжении, с.} \quad (\text{IV-5в})$$

Уравнение (IV-5) использовано для исследования ползучести при постоянном напряжении:

$$\tau_{\sigma} \ddot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta_2}. \quad (\text{IV-6})$$

Это линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянной правой частью. Начальные условия (при $\tau=0$) имеют вид:

$$\varepsilon(0) = \frac{\sigma}{E_I(\sigma)} + \frac{\sigma}{E_{II}(\sigma)} = \frac{\sigma}{E(\sigma)}; \quad (\text{IV-6a})$$

$$\dot{\varepsilon}(0) = \frac{\sigma}{\eta_1} + \frac{\sigma}{\eta_2} = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (\text{IV-6б})$$

Уравнение (IV-6) с начальными условиями из уравнений (IV-6a) и (IV-6б) решается следующим образом:

$$\varepsilon(\tau) = \frac{\sigma}{E(\sigma)} + \frac{\sigma}{\eta_2} \tau + \frac{\sigma}{E_I} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_{\sigma}}} \right). \quad (\text{IV-7})$$

Дифференцируя уравнение (IV-7) по времени τ и переходя к пределу при $\tau \rightarrow \infty$, находили для предельной скорости ползучести

$$\dot{\varepsilon}(\infty) = \frac{\sigma}{\eta_2}. \quad (\text{IV-7a})$$

С помощью уравнения (IV-5) исследовали характер восстановления деформации после снятия внеш-

ней нагрузки в момент разгрузки системы τ_1 . В этом случае вместо уравнения (IV-6) при $\sigma=0$ имели

$$\tau_\sigma \ddot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon} = 0. \quad (IV-76)$$

Начальную деформацию модели определяли из предыдущего решения при $\tau=\tau_1$, за вычетом мгновенной упругой деформации элемента $E_I(\sigma)$:

$$\varepsilon(\tau_1) = \frac{\sigma}{E_{II}(\sigma)} + \frac{\sigma}{\eta_2} \tau_1 + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{\tau_1}{\tau_\sigma}} \right). \quad (IV-7в)$$

Начальную скорость определяли только начальной скоростью деформации элемента Фойгта — Кельвина (см. рис. 54, а):

$$\dot{\varepsilon}(\tau_1) = -\frac{\sigma}{\eta_1} \left(1 - e^{-\frac{\tau_1}{\tau_\sigma}} \right). \quad (IV-7г)$$

Решив уравнение (IV-7б) с начальными условиями уравнений (IV-7в) и (IV-7г), получили

$$\varepsilon(\tau) = \frac{\sigma}{E_{II}(\sigma)} + \frac{\sigma}{\eta_2} \tau_1 + \frac{\sigma}{E_1} \left(e^{\frac{\tau_1}{\tau_\sigma}} - 1 \right) e^{-\frac{\tau}{\tau_\sigma}}. \quad (IV-8)$$

Переходя к пределу при $\tau \rightarrow \infty$, находили остаточную деформацию $\varepsilon_{ост}(\tau_1)$, зависящую от момента снятия внешней нагрузки:

$$\varepsilon_{ост}(\tau_1) = \frac{\sigma}{E_{II}(\sigma)} + \frac{\sigma}{\eta_2} \tau_1. \quad (IV-8а)$$

Феноменологические постоянные E_1 , η_1 и η_2 и период релаксации деформаций τ_σ определяли согласно приведенным решениям по экспериментальным данным. Исходя из соотношения (IV-7а) для предельной скорости ползучести, по экспериментальным данным определили для коэффициента вязкости η_2 значения порядка $5,2 \cdot 10^8$ Па·с. Период релаксации, найденный по кривым восстановления, оказался равным примерно 45 с. Тогда в соответствии с уравнением (IV-8) находили, что $E_1 = 3,8 \cdot 10^5$ Па. Коэффициент вязкости η_1 определяли согласно формуле (IV-5в), он был равен $1,7 \cdot 10^7$ Па·с.

Зависимости эффективных модулей упругости от напряжения сжатия имели вид:

$$E_I(\sigma) = 2,5 \cdot 10^5 + 15\sigma; \quad (IV-9)$$

$$E_{II}(\sigma) = 1,25 \cdot 10^5 + 5\sigma. \quad (IV-9a)$$

Полученные данные характеризуют структуру мышечной ткани и могут быть использованы не только для технологических расчетов, но и для оценки качества продукта.

Независимо от приведенных выше данных для описания деформационного поведения мускулов мяса рядом авторов [187] предложена схожая механическая модель (рис. 54, б), которая в отличие от первой не содержит нелинейных модулей упругости. Не рассматривая подробно эту модель можно отметить, что периоды релаксации имеют такой же порядок (от 10 до 35 с), вязкости — на 4—5 порядков ниже, модули упругости — на порядок ниже. Авторами установлена [187] зависимость изменения феноменологических постоянных от длительности хранения мяса после убоя.

Проф. Б. А. Николаев с сотрудниками [125, 126, 127] определил прочностные характеристики мяса при растяжении. Длина образцов составляла от 0,01 до 0,02 м при поперечном сечении $0,005 \times 0,002$ м или $0,0075 \times 0,002$ м; скорость растяжения $3 \cdot 10^{-5}$ или $6 \cdot 10^{-5}$ м/с. Если считать мясо нелинейным реологическим телом [54], то прочностные характеристики, по-видимому, будут зависеть от геометрических размеров образца и кинематики нагружения. Рядом авторов [126] установлена корреляционная связь между прочностными характеристиками и органолептической оценкой нежности: для сырого мяса напряжение разрыва зависит от вида мышцы (длиннейшей мышцы спины, полусухожильной, трапецевидной); для вареного мяса такая дифференциация не наблюдается. С улучшением нежности (более высокая органолептическая оценка в баллах) напряжение разрыва и модули упругости уменьшаются. При этом для сырого мяса эта зависимость менее крутая, чем для вареного.

А. Н. Познышев [140] с помощью рычажного прибора, подобного изображенному на рис. 18, б, исследовал прочность четырехглавого мускула двухдневной

выдержки после убоя от крупного рогатого скота. Для крепления концов образца были использованы специальные зажимы, а сами концы замораживали в парах жидкого азота. Образцы вырезали в виде полос призматической формы с продольным расположением волокон. Размеры сечения образцов равнялись $0,010 \times 0,020$ м, длина 0,080 м, величина базы в пределах $0,015 \times 0,020$ м. При замораживании концов наблюдалось охлаждение его базы. Как показали измерения, выполненные с помощью хромелькопелевой игольчатой термопары, температура мяса вблизи зажимов понижается до $4-8^{\circ}\text{C}$, что не может влиять на результаты измерений.

Растяжение проводили при постоянной скорости деформации и постоянной скорости увеличения нагрузки. Постоянную скорость деформации обеспечивали электродвигателем постоянного тока, перемещающим горизонтальный рычаг прибора вокруг оси со скоростью $21,0 \cdot 10^{-3}$ м/с, при этом скорость растяжения образцов составляла $6,38 \cdot 10^{-3}$ м/с, что достигали изменением соотношения плеч рычага в 3,3 раза. В этом случае при базе образца 0,015 м скорость относительной деформации образца составляла $42,5\%/с$. Путем воздействия привода с постоянной скоростью на промежуточную тарированную пружину, которую закрепляли на горизонтальном рычаге, обеспечивали постоянную скорость нагружения образцов, равную $0,91 \times 10^5$ Па/с. В некоторых случаях ввиду нелинейного характера деформирования образцов мяса отклонение ее от этого значения составляло $8-10\%$.

При постоянной скорости роста напряжения скорость деформирования образца во времени снижается; при постоянной же скорости деформации сопротивление материала возрастает по экспоненте и достигает максимального значения в момент разрушения. Разрушение материала отмечалось при напряжении $(2,90 \pm 0,064) \cdot 10^5$ Па и относительной деформации образцов $0,80 \pm 0,017$. В первом случае при постоянной скорости деформации, разрушение происходило в среднем через 1,9 с, при постоянной скорости нагружения — через 3,2 с. Связь между деформацией и напряжением целлюлозная и не подчиняется закону Гука. Равновесный

модуль, определяемый как отношение напряжения к деформации, зависит в этих случаях от степени деформации. Так, при напряжениях $1,0 \cdot 10^5$; $2,0 \cdot 10^5$ и $2,9 \cdot 10^5$ Па модуль имеет следующие значения: $2,5 \cdot 10^5$; $3,1 \cdot 10^5$ и $3,6 \cdot 10^5$ Па, т. е. с увеличением напряжения модуль увеличивается и достигает максимального значения в момент разрушения. Подобное явление характерно для большинства полимерных материалов и материалов органического происхождения, так как все органические материалы характеризуются наличием совместных эластично-пластических свойств и кривые растяжения являются кривыми суммарного действия эластических и пластических деформаций.

Полученные А. Н. Познышевым результаты согласуются с описанными выше [126].

С помощью прибора, изображенного на рис. 18, б, исследовали прочность мяса при срезе через матрицу пуансонами с углами заточки 90, 80 и 30° [140]. В процессе взаимодействия пуансона с материалом одновременно на автоматических самопишущих приборах КСП-4 регистрировали усилия и деформации. Образцы исследовали на прочность при резании поперек волокон и постоянной скорости перемещения пуансона $4,6 \cdot 10^{-3}$ м/с с образцами толщиной 0,015 м и температурой от +10 до $-1,5^\circ$ С.

Под действием приложенного усилия образцы деформируются на 45—50%, после чего усилие среза, определенное как отношение силы к длине окружности, возрастает. Горизонтальная площадка на каждой из кривых: усилие среза — деформация соответствует величине разрушающей нагрузки для мышечных волокон, возникающей вследствие концентрации напряжений на режущей кромке пуансона. С увеличением угла заточки процесс резания начинается раньше, при этом снижается вероятность смятия материала при его сжатии пуансоном. Во время перерезания мышечных волокон соединительнотканые пленки как более прочные остаются неразрушенными и увлекаются за пуансоном.

Эти пленки разрушаются в основном только путем срезания при взаимодействии режущей кромки пуансона с отверстием в основании матрицы.

Таким образом, в диапазоне температур мяса от $+10$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$ разрушение структуры пуансона происходит в две стадии. При деформации мяса до $90 \pm 5\%$ разрезаются мышечные волокна непосредственно режущей кромкой пуансона. Соединительная ткань, как более прочная, уплотняется и срезается при увеличении деформации до $98 \pm 0,3\%$, т. е. когда пуансон начинает входить в отверстие, выполняющее роль матрицы.

Величины усилий резания мышечных волокон, приведенные к единице длины режущей кромки пуансона соответственно равны для пуансона с углом заточки $90^{\circ} - 3,85 \cdot 10^3$ Н/м, $80^{\circ} - 3,52 \cdot 10^3$ Н/м и $30^{\circ} - 2,68 \times 10^3$ Н/м. Величины предельных усилий при полном срезе образца изменяли в зависимости от угла заточки пуансонов в пределах от $5,4 \cdot 10^3$ до $6,2 \cdot 10^3$ Н/м, при этом деформация образцов приближалась к 98% .

Влияние масштабного фактора рассматривали при срезе образцов, высоту которых изменяли от $0,005$ до $0,015$ м. При увеличении высоты образцов уменьшается величина напряжения среза, вычисленная по начальной высоте образцов. При изменении высоты образцов от $0,005$ до $0,015$ м предельное усилие среза увеличивается от $2,7 \cdot 10^3$ до $6,2 \cdot 10^3$ Н/м и соответственно линейно уменьшается напряжение от $0,54 \cdot 10^6$ до $0,41 \cdot 10^6$ Па.

Прочностные характеристики искусственного мяса [79] определяли на универсальной машине «Инстрон» (Англия). Образец размером $0,01 \times 0,01 \times 0,01$ м помещали на неподвижную матрицу, связанную с системой измерения усилий, и разрезали ножом подвижного пуансона при скорости $0,84 \cdot 10^{-3}$ м/с. Волокна ориентировали относительно режущей плоскости в поперечном, долевом и торцевом направлениях.

Одновременно исследовали спинной мускул крупного рогатого скота, содержание влаги в котором при варке при 95°C было доведено до $55,5\%$. По результатам испытаний были найдены условный мгновенный

¹ Искусственное мясо представляет собой анизотропный студень с волокнистой структурой при размере волокон около 8 мкм. Оно содержит $38,4\%$ казеина, $3,8\%$ альгината, 56% влаги.

ный модуль упругости E , напряжение σ_p и деформация ϵ_p , отвечающие моменту разрушения образца. Сравнительные данные приведены в табл. 31.

Таблица 31

Направление волокна	Мясо					
	искусственное			натуральное		
	$\sigma_p \cdot 10^{-3}$, Па	ϵ_p	$E \cdot 10^{-3}$, Па	$\sigma_p \cdot 10^{-3}$, Па	ϵ_p	$E \cdot 10^{-3}$, Па
Поперечное	0,36	0,85	0,42	7,10	0,87	1,66
Долевое	0,25	0,80	0,32	0,19	0,18	1,28
Торцевое	0,27	0,55	0,33	0,22	0,22	1,05

Из табл. 31 видно, что для разрушения волокон натурального мяса в поперечном направлении требуется напряжение в 20 раз большее, чем для искусственного. В торцевом и долевом направлениях разрушающее напряжение примерно одинаково. Деформации, вызванные разрушающим напряжением, в поперечном направлении практически одинаковы как для натурального мяса, так и искусственного, а в долевом и торцевом направлениях значительно различаются. Условные мгновенные модули упругости у искусственного мяса близки по всем трем направлениям и имеют величину в 2—3 раза меньшую, чем у натурального мяса.

Компрессивные характеристики фарша. Для их определения при объемном сжатии были использованы приборы, изображенные на рис. 19. Кривые кинетики относительной деформации объемного сжатия имеют логарифмический характер и описываются уравнением

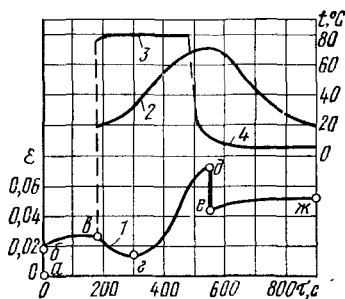


Рис. 55. Типичные зависимости, описывающие поведение колбасного фарша при нагревании в форме:

1 — кинетические кривые деформации и спад деформации; 2 — температура в центре образца фарша; 3 — температура греющей среды; 4 — температура охлаждающей среды.

(I—11). Типичные компрессионные кривые показаны рис. 55 (кривая 1, зона а, б, в). По кинетическим кривым для равновесного состояния можно вычислить коэффициент объемного сжатия по формуле (I—14 б) при в действии давления в течение 180 с:

$$\beta(p, 180) = \frac{\varepsilon(p, 180)}{p} = \frac{a_{\varepsilon}^* p^{a_1}}{p} = a_{\varepsilon}^* p^{a_1-1}, \quad (IV-10)$$

где значения эмпирических коэффициентов приведены в табл. 32.

Таблица 32

Продукт	Коэффициенты к уравнениям (I—11) и (IV—10)				
	$a_{\varepsilon} \cdot 10^4$	a_1	a_2	$a_{\varepsilon}^* \cdot 10^4$	бокового давления
Мясо говяжье I сорта измельченное	5,2	0,32	0,058	5,87	0,75—0,80
Фарш					
отдельной и чайной колбас	5,2	0,32	0,014	5,36	0,80—0,85
докторской колбасы	4,8	0,32	0,0092	4,90	0,82—0,85
сосисочный	4,6	0,32	0,0080	4,70	0,85—0,90

Общую деформацию фарша можно рассматривать как состоящую из нескольких зон. При напряжении до нижнего предела упругости, который в среднем равен 10^5 Па, реализуется зона мгновенно-упругих деформаций. Для нее модуль упругости составляет $0,6 \cdot 10^7$ Па. Максимальная упругая деформация достигает $1,6 \cdot 10^{-2}$, при увеличении нагрузки она остается постоянной. Вторая зона — упругого последельствия или условно-мгновенной пластичности — переходит в пластическую и лежит в пределах напряжений $(1 \div 3,5) 10^5$ Па; третья зона — пластических деформаций — находится в области напряжений, превышающих $3,5 \cdot 10^5$ Па. При этом общая деформация зависит не только от напряжения, но и от длительности его действия.

Обработкой экспериментальных данных подобраны коэффициенты к уравнению (I—11) для всех экспериментальных кинетических кривых. Величины коэф-

коэффициентов приведены в табл. 32 [99]. В уравнении (I—11) член, стоящий перед скобкой, характеризует мгновенную деформацию, второй член позволяет учесть развитие пластической деформации во времени. Коэффициенты зависят от биологического и физического состояния мяса. Поэтому погрешность в вычислении относительной деформации может достигать $\pm 15\%$. Интервалы изменения переменных, при которых справедливо уравнение (I—11), следующие: $3,5 \times 10^5$ — $16 \cdot 10^5$ Па и 1—180 с. Приведенные выше результаты получены для форм малого объема. При изменении объема формы значения коэффициентов могут быть другие, хотя принципиально общая картина деформирования не изменяется.

Для исследования коэффициента бокового давления колбасного фарша и распределения давления в нем по высоте цилиндра применяли установки с тензодатчиками (см. рис. 19) [52]. Верхняя месдоза располагалась практически под самым поршнем, поэтому вертикальные (за счет массы грузов, действующих на поршень) и горизонтальные давления были известны для одной «точки» (требовалась лишь незначительная экстраполяция — около 3%). Коэффициент бокового давления вычисляли по уравнению (I—5). Осевое давление по высоте цилиндра убывает, следовательно, убывает и боковое, однако коэффициент бокового давления остается неизменным, что следует из сущности его проявления.

Зависимости между осевым и боковым давлениями, полученные более чем для ста опытов, позволили рассчитать коэффициенты бокового давления (табл. 32). Из табл. 32 видно, что коэффициенты для фарша различных видов отличаются незначительно, среднее значение их лежит в области 0,8—0,85; причем, чем больше влажность фарша, тем выше значения коэффициентов.

Для расчета распределения давлений в фарше по высоте трубки применимо уравнение (I—12), которое показывает, что чем меньше диаметр трубки, тем интенсивнее уменьшается давление по высоте. Если усилие прикладывается с двух торцов трубки, то следует построить две эпюры давлений. Суммарная эпюра

представляет собой симметричную кривую относительно середины трубки по высоте, где значение давления наименьшее. Представляют интерес исследования реологических характеристик фарша при объемном сжатии в цилиндрических формах диаметром 0,053 м и высотой до 0,1 м [47]. Опыты проводили на компрессионном устройстве, в котором фарш, находящийся в цилиндре, подвергался сжатию между двумя поршнями. Измерение и запись величин проводили с помощью индукционного датчика перемещений. Для обобщения результатов экспериментов использовали уравнение стандартного линейного типа (I—24) и уравнение (IV—3).

Имея в виду, что начальный период деформации значения $\varepsilon=0$ до $\varepsilon=\varepsilon_0$ исчисляется долями секунды и $\tau_\varepsilon \ll \tau_\sigma$, можно допустить, что напряжение в разрезе в процессе деформирования (без начального периода) практически постоянно, т. е.:

$$\frac{d\sigma}{d\tau} \tau_\varepsilon = 0. \quad (\text{IV—11})$$

С учетом этих условий уравнение (IV—3) принимает вид

$$\sigma = E_R (\varepsilon + \tau_\sigma \dot{\varepsilon}). \quad (\text{IV—12})$$

Интегрирование уравнения (IV—12) с учетом, при $\tau=0$, $\varepsilon=\varepsilon_0$, дает:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \left(\frac{\sigma}{E_R} - \varepsilon_0 \right) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_\sigma}} \right). \quad (\text{IV—13})$$

Уравнение (IV—13) позволяет произвести обработку кинетической кривой объемной деформации для определения релаксационных характеристик фарша.

При $\tau=\infty$ относительная деформация будет максимальной и ее величина из уравнения (IV—13) равна

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma}{E_R}. \quad (\text{IV—14})$$

По уравнению (IV—14) находим значение E_R .

Подставив в уравнение (IV—13) значение ε_{\max} , получим

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_0) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_\sigma}} \right). \quad (\text{IV—15})$$

Решая уравнение (IV—15) относительно τ , находим

$$\tau = \tau_{\sigma} \ln \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta \varepsilon}, \quad (\text{IV—16})$$

где τ — продолжительность действия напряжения, с;

$$\Delta \varepsilon_0 = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_0, \quad \Delta \varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon.$$

Уравнение (IV—16) в полулогарифмических шкалах представляет собой прямую, тангенс угла наклона которой соответствует τ_{σ} . На основании уравнений (IV—14) и (IV—16) обработаны экспериментальные данные для фарша говяжьих сарделек. Наибольшие изменения E_R и τ_{σ} претерпевают при изменении влагосодержания фарша. Экспериментальные зависимости реологических характеристик для этого случая описываются уравнениями:

$$E_R = A_1 e^{b_1}, \quad (\text{V—17})$$

$$\tau_{\sigma} = A_2 e^{-b_2}, \quad (\text{IV—18})$$

где $A_1 = 2,69 \cdot 10^6$;

$b_1 = 0,085 U$;

$A_2 = 10^2$;

$b_2 = 0,09 U$;

U — влагосодержание фарша, кг воды на 1 кг сухого остатка.

Отклонение данных эксперимента от расчетных по уравнениям (IV—17) и (IV—18) для $U=1,5 \div 4,5$ не превышает 4%. Полученные уравнения могут быть использованы в инженерных расчетах.

Объемное сжатие фарша при термообработке в форме. Комплексные исследования в этом направлении представляют интерес в связи с тенденцией развития мясного аппаратостроения, направленного на создание автоматизированных линий изготовления колбасных изделий без оболочки или в мягкой полимерной оболочке. Принципиально вопрос решается следующим образом: фарш нагнетается в форму, с торцов вводят поршни для подпрессовки и затем эту форму направляют на термообработку.

В качестве источника энергии используют пар, горячий воздух, воду или электрический ток, который можно подводить к фаршу через поршни с торцов. Для окончательной термообработки (без формы) применяют горячий воздух, инфракрасное излучение и пр. Однако, несмотря на кажущуюся простоту вопроса и многолетние работы в этой области, проблема еще полностью не решена. Такое положение создалось в связи с тем, что часто не учитывали реологические свойства фарша в условиях нормального напряженного состояния (сжимаемость, характер распределения давлений по высоте формы и пр.), их температурные из-

менения, а тепло- и электрофизические характеристики изучены без давления, что не соответствует состоянию фарша в форме при термообработке.

На кинетических кривых *в*, *г* рис. 55 [22, 200] показано уменьшение деформации при любом давлении с момента начала варки — от 180 с — и далее. При наименьшем давлении ($0,312 \cdot 10^5$ Г) они переходят в отрицательную область, т.е. объем фарша становится больше начального. Объяснить такое резкое увеличение объема тепловым расширением нельзя. До сих пор объемную деформацию фарша при нагревании специально не исследовали. Однако известно, что тепловая денатурация сопровождается выраженными структурными изменениями мяса, саркоплазма меняет объем и разрушается. Очевидно, увеличение объема фарша в основном происходит за счет изменения конфигурации фибриллярных и разворачивания цепей глобулярных белков при обязательном присутствии воды. Плавное уменьшение деформации (см. рис. 55) обусловлено наличием температурного градиента. Температура, при которой деформация достигает минимума, постоянна и зависит от влагосодержания, увеличиваясь при его повышении; ее значения меняются для хорошо разработанного фарша от 55 до 65° С. При недостаточно тонком измельчении соединительной ткани, например на куттере завода «Саксония» (80/3 ножа), температура, соответствующая минимуму деформации, снижается примерно на 10—20° С.

Уменьшение относительной деформации фарша при нагревании вызванное увеличением объема, можно охарактеризовать удельной объемной работой деформации. Наименьшие значения удельной работы соответствуют «эталонному» влагосодержанию (рис. 36, 37) [48, 49, 135].

Отмеченный эффект увеличения объема при термообработке фарша и количественные обоснования процесса имеют большое практическое значение для проектирования аппаратов, в которых фарш нагревается в замкнутых формах, для определения прочностных характеристик колбасной оболочки с учетом ее возможной растяжимости и т. д.

При дальнейшем нагревании фарша до готовности деформация увеличивается (см. рис. 55, кривая *г*, *д*), а объем уменьшается, если происходит отделение жира и бульона от продукта. Если форма достаточно герметична, то уменьшение объема незначительно. Сброс давления в начале процесса охлаждения (рис. 55, *д*, *е*) ведет к резкому уменьшению деформаций и затем к увеличению их при дальнейшем охлаждении (рис. 55, *е*, *ж*).

Существенную роль при термообработке фарша в форме играет давление, приложенное к торцам формы [22]. Воздействие давления на продукт вызывает переориентацию частиц, более компактную их упаковку с одновременным объемным деформированием, что способствует повышению прочностных свойств структуры. Установлено, что с увеличением давления релаксационный модуль и удельная работа расширения возрастают, величины эластических деформаций снижаются. Кривые, характеризующие изменение периода релаксации, потерь жидкости при варке, коэффициента температуропроводности и плотности готового продукта имеют экстремальные значения, соответствующие давлению (2,0

$\div 2,5) \cdot 10^5$ Па. При этом давлении потери жидкости для всех исследованных видов фарша минимальны, а коэффициент температуропроводности имеет максимальную величину (рис. 56). Указанный факт свидетельствует о том, что при малых давлениях фарш уплотняется без существенного деформирования частиц. а увеличение давления до $(2,0 \div 2,5) \cdot 10^5$ Па вызывает перераспределение влаги в направлении уменьшения количества локальных полостей и образования дополнительных капилляров и пор за счет разделения агломератов. Подобный процесс приводит к увеличению поверхности контакта частиц с дисперсионной средой, что способствует увеличению водосвязывающей способности фарша.

При давлении, превышающем $(2,0 \div 2,5) \cdot 10^5$ Па, происходит деформация частиц, опрессовывание части жидкости, уменьшение толщины гидратных оболочек, а в отдельных случаях — полное выдавливание жидкости между частицами. Такое представление о действии механизма давления на структуру фарша подтверждается данными опыта. Так, потери жидкости в процессе варки фарша при увеличении давления от $0,5 \cdot 10^5$ Па до $(2,0 \div 2,5) \cdot 10^5$ Па снижаются до минимума, а коэффициент температуропроводности возрастает до максимума. Дальнейшее увеличение давления приводит к возрастанию потерь жидкости и уменьшению коэффициента температуропроводности.

Следует отметить, что давление $(2,0 \div 2,5) \cdot 10^5$ Па является критическим при определении адгезионных электрофизических и других свойств фарша, а также при проведении некоторых процессов обработки фарша.

Термограммы варки фарша (см. рис. 55) позволили вычислить эффективный коэффициент температуропроводности a (в $\text{м}^2/\text{с}$), который для интервала температур $50-71^\circ\text{C}$ находится в пределах от $6 \cdot 10^{-8}$ до $15 \cdot 10^{-8}$. С увеличением влагосодержания a увеличивается. По данным В. М. Горбатова и др. [56], для фарша русских сосисок $a = 12,2 \cdot 10^{-8}$. Г. К. Бабанов для фарша докторской колбасы нашел довольно близкие значения (около $14 \cdot 10^{-8}$). Он же для фарша, близкого по рецептуре к сосискам русским, установил монотонное изменение a в области температур $20-80^\circ\text{C}$ от $11 \cdot 10^{-8}$ до $19 \cdot 10^{-8}$. При этом довольно резкое изменение коэффициента начинается от 50°C . Вполне вероятно, что при этой температуре будет происходить количественный «скачок», который не был обнаружен.

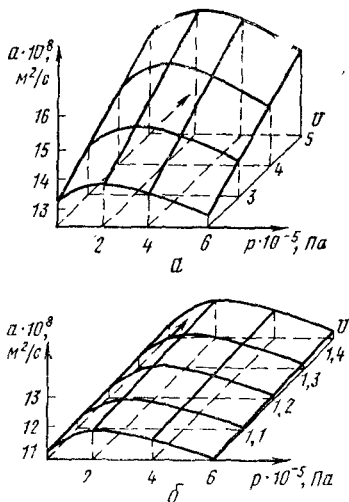


Рис. 56. Зависимость коэффициента температуропроводности от давления и влагосодержания фарша сарделек: а — говяжьих; б — свиных.

Исследование изменений коэффициента температуропроводности от продолжительности хранения и влажности сырого фарша [22] показало, что основное влияние на величину этого коэффициента оказывает влажность фарша (табл. 33).

Таблица 33

Температура в центре образца, °С	Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^8$ (в $\text{м}^2/\text{с}$) при влагосодержании сырого фарша, кг влаги на 1 кг сухого остатка			
	2,50	3,20	4,08	4,78
25—40	10,00	10,15	10,65	11,80
40—50	12,70	12,85	13,45	14,50
50—70	14,45	14,65	15,60	16,00

На основании математической обработки полученных данных коэффициент температуропроводности a (в $\text{м}^2/\text{с}$) можно определить по формуле

$$a = A \cdot 10^{-8} (1 + BU), \quad (\text{IV—19})$$

где U — влагосодержание фарша, кг влаги на 1 кг сухого остатка;

A и B — эмпирические коэффициенты, значения которых для фарша говяжьих и свиных сарделек соответственно равны 12 и 0,075; 11 и 0,075.

Формула справедлива в следующих пределах изменения влагосодержания: для фарша говяжьих сарделек 2,5—4,8; для свиных 1,1—1,4. Максимальное отклонение результата, рассчитанное по формуле (IV—19), от опытного составляет $\pm 5\%$.

Результаты исследований потерь жидкости при варке свидетельствуют о том, что минимальные потери наблюдаются при длительности хранения 3—4 ч и влагосодержании 3,9—4,0 (фарш говяжьих сарделек) и 1,29—1,31 кг/кг (фарш свиных сарделек).

Зависимость эффективного коэффициента температуропроводности от влагосодержания и давления приведена на рис. 56 [22].

Проведенные эксперименты позволяют сделать некоторые качественные выводы. Как отмечает акад. А. В. Лыков [101], коэффициент температуропроводности характеризует молекулярный перенос внутренней тепловой энергии тела. В точке перегиба функции; относительная избыточная температура — время, которое обычно находится в области 48—53° С, а существенно изменяется. По А. А. Соколову [160], при указанной температуре начинается интенсивная денатурация белков. При этом изменяются тепло-электрофизические свойства фарша. Следовательно, денатурация белков, достигающая наибольшей интенсивности при 50° С, является глубоким физическим процессом, меняющим структуру фарша и его свойства. Примерно в этой же области температур в силу названных причин (дегидратация белков и пр.) начинается интенсивное отделение жидкости, что вызывает молекулярный перенос

тепла, т. е. начинают взаимодействовать два противоположных процесса. Процесс нагрева связан с энергоподводом к фаршу; процесс отделения жидкости, особенно при повышенном давлении, — с отводом энергии от фарша. Изменением доли молекулярного переноса энергии можно объяснить изменение коэффициента температуропроводности. При отсутствии избыточного давления в области температур 50—70°С обычно температуропроводность α увеличивается, так как интенсивный массообмен с окружающей средой отсутствует.

Компрессионные характеристики брикетов кровяной муки. Прессование кровяной муки в брикеты диаметром 0,035 м и массой 0,02 кг изучали [78] с целью сохранения ее питательных свойств при длительном хранении. При этом установлено, что при двустороннем прессовании (см. рис. 17, *г*) давление и расход энергии меньше, чем при одностороннем прессовании (см. рис. 17, *в*). Для определения удельной работы $A_{уд}$ (в Дж/кг) предложена формула

$$A_{уд} = \frac{b_1}{\rho\rho_0} \left\{ \left[b_2 \ln \frac{b_2}{b_2 - (\rho - \rho_0)} \right] - (\rho - \rho_0) \right\}, \quad (IV-20)$$

где ρ — плотность брикета, кг/м³;

ρ_0 — насыпная плотность кровяной муки до прессования ($\rho_0 = 450$ кг/м³);

b_1 и b_2 — эмпирические коэффициенты (при двустороннем прессовании муки влажностью 9,5% $b_1 = 11870$, $b_2 = 1170$; влажностью 15% $b_1 = 5140$, $b_2 = 1080$).

Брикеты высокого качества из кровяной муки стандартной влажности можно получить при давлении $1250 \cdot 10^5$ Па. При этом плотность брикетов будет равна 1150 кг/м³, удельная энергоемкость процесса 13,2 кВт·ч/т. При влажности 15% плотность брикетов должна быть не менее 1020 кг/м³, энергоемкость — 3,5 кВт·ч/т. При влажности 9,5% брикеты следует прессовать до плотности 1325 кг/м³, при влажности 15% до 1120 кг/м³.

КОМПРЕССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Компрессионные характеристики плавленых сыров при осевом сжатии [18, 80] изучали с помощью прибора, изображенного на рис. 18, *в*. Образец сжимали между двумя параллельными пластинами, верхнюю из которых перемещали по вертикали с постоян-

ной скоростью, равной $0,143 \cdot 10^{-3}$ м/с. При одноосном сжатии образцов использовали пластины различной площади: от $5 \cdot 10^{-4}$ до $15 \cdot 10^{-4}$ м². Толщины образцов изменяли от 0,0003 до 0,005 м.

Для описания поведения плавленых сыров в условиях одноосного сжатия использовали обобщенное уравнение стандартного тела, которое позволяет определять такие важные механические характеристики, как модуль упругости и период релаксации:

$$\sigma + \tau_p \dot{\sigma} = E \varepsilon + \tau_p E_1 \dot{\varepsilon}, \quad (IV-2)$$

где обозначения те же, что и в формуле (IV-3), а E и E_1 условно-мгновенный и равновесный модули упругости, Па.

Значительное влияние на упругопластические свойства плавленых сыров оказывает и их химический состав. В исследованном диапазоне изменения влажности плавленых сыров с увеличением содержания влаги в образце уменьшаются модуль упругости и период релаксации (табл. 34).

Таблица 34

Содержание влаги, кг на 1 кг сыра	$E_1 \cdot 10^{-4}$, Па	τ_p , с
0,452	6,13	1,92
0,551	4,80	1,61
0,603	3,98	1,47
0,649	3,25	1,29

При изменении содержания жира в плавленом сыре от 0,102 до 0,403 кг на 1 кг сухих веществ при постоянном содержании влаги 0,603 кг на 1 кг сыра изменение величин E_1 и τ_p не превышало 10%. Такие колебания значения E_1 и τ_p сопоставимы с ошибкой опыта, что позволяет сделать вывод о том, что в исследованном диапазоне изменение содержания жира не влияет существенно на его упругопластические свойства.

Компрессионные характеристики творожно-сырных масс определил Н. А. Мусабасв [120] по методикам, аналогичным описанным выше. При объемно-

деформации образцов творожно-сырковой массы из них выделяется сыворотка даже при небольших давлениях подпрессовки (например, $0,312 \cdot 10^5$ Па). Формы связи влаги в продукте и другие физико-химические факторы значительно влияют на процесс отжатия сыворотки. Так, В. П. Табачников и др. [86, 116, 166] отмечают, что из сырных сгустков, полученных из различного молока, излишняя сыворотка удаляется с большей разницей во времени, чем при различном давлении (величины давления до $2 \cdot 10^5$ Па при удельной силе — отношение силы к объему продукта — до $0,134 \cdot 10^7$ Н/м³).

Н. Н. Липатовым и др. [154] определено наибольшее оптимальное давление для сгустка различных видов (в зависимости от жирности), при котором отделяется максимальное количество влаги; для жирной творожной массы давление составляет около $0,14 \times 10^5$ Па. По их мнению, давление надо устанавливать в зависимости от количества и размеров пор, через которые фильтруют жидкость. При этом они отмечают, что с увеличением давления лишь незначительно уменьшается влагосодержание.

В экспериментах [120] отделение сыворотки при давлении $1,56 \cdot 10^5$ Па начиналось через 12 с, при $7,8 \cdot 10^5$ Па — через 48 с, при $15,6 \cdot 10^5$ Па — через 57 с. При высоком давлении под поршнем образуется тонкий уплотненный слой с порами, капиллярами малых размеров, который затрудняет фильтрацию жидкости. При небольшом давлении слой более пористый и жидкость начинает отделяться быстрее, хотя при большом давлении ее выделяется больше.

Кинетические кривые относительной деформации для сырковой массы и творога подобны аналогичным для мясного фарша. Для расчета кинетики объемной деформации и коэффициента объемного сжатия по зависимостям (I—11) и (IV—10) и результатам экспериментов установлены значения коэффициентов (табл. 35 и 35а)

При этом коэффициент качества (коэффициент химического состава) K определяли по зависимости (III—19). Ошибка экспериментов не превышала $\pm 3\%$, однако отклонение расчетных величин от экспериментальных может достигать $\pm 20\%$.

Продукт	Коэффициенты к уравнениям (I—II) и (IV—10)			
	$a_E \cdot 10^4$	a_1	a_2	$a_E^* \cdot 10^4$
Творог обезжиренный	7,3	0,37	0,343	13,7
Сырковая масса особая	20,0	0,27	0,310	35,8
Творог полужирный	100,0	0,17	0,250	164,0
Сырки творожные	7,4	0,33	0,365	14,3
Творог жирный	2,1	0,46	0,43	4,2

Таблица 35а

Влажность	Жирность	U	κ	b	c	K
80	—	4,00	—	0,250	—	4,25
41	23	0,70	0,299	0,111	0,352	3,77
73	9	2,70	0,099	0,220	—	3,02
58	15	1,38	0,177	0,163	0,15	2,52
65	18	1,86	0,220	0,205	—	2,28

Релаксационные характеристики при осевом сжатии творожно-сырковых масс, вычисленные на основе экспериментальных данных по уравнениям (IV—3) (I—13), представлены в табл. 36. Химический состав образцов соответствует по номерам строк данным табл. 18.

Существенный интерес представляют работы

Таблица 36

$E_R \cdot 10^{-3}$, Па	τ_E , с	τ_σ , с	$E \cdot 10^{-3}$, Па	$E_R \cdot 10^{-3}$, Па	τ_E , с	τ_σ , с	$E \cdot 10^{-3}$, Па
2,0	2,0	8,0	8,0	7,5	2,3	5,5	17,9
3,5	2,6	6,0	8,1	2,3	1,2	6,4	12,3
4,0	1,5	4,5	12,0	3,4	1,6	5,7	12,1
5,0	1,7	4,1	12,0	2,8	2,1	6,0	8,0
6,8	1,6	4,0	17,0	14,0	2,7	7,0	36,4
2,9	2,2	7,7	10,0				

В. П. Табачникова [166] и др. по определению компрессионных характеристик сыров, в том числе в условиях наложения вибраций и использования ультразвука для оценки структурно-механических свойств. В частности, определена скорость распространения ультразвука, которая составляет в среднем для сыров различных видов: российского — 1365 м/с, пикантного — 1535, костромского — 1645 и голландского брускового — 1650 м/с. Резонансную частоту датчика меняли от 50 до 300 кГц. С уменьшением температуры скорость распространения ультразвука повышается. Она зависит также от длительности хранения сыра, достигая максимума к 30—40 дням.

ПЛОТНОСТЬ МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Плотность является существенной характеристикой при расчете ряда машин и процессов. Она зависит как от давления, действующего на продукт, так и от химического состава его. Были сделаны попытки [218] по изменению плотности определять, а затем и регулировать жирность или влажность продукта в потоке при движении его по трубе.

Плотность ряда белковых систем (мясного бульона, крови, молока и др.) в зависимости от концентрации описывается эмпирическим уравнением

$$\rho_c = \rho_{0t} + ac, \quad (IV-22)$$

где ρ_c — плотность при данной температуре t_c и концентрации c , кг сухих веществ на 1 кг продукта, кг/м³;

ρ_{0t} — плотность при концентрации, равной нулю, и той же температуре, кг/м³;

a — эмпирический коэффициент, кг/м³ (значения a приведены в табл. 37) [154].

Таблица 37

Продукт	Температура, t_c , °C	Пределы концентрации c , кг/кг	Коэффициент a , кг/м ³	Плотность ρ_{0t} , кг/м ³
Мясной бульон	40	0—0,20	300	992
Дефибринированная кровь	40	0—0,20	300	992
Молоко	20	0—0,12	115	998
Молоко	20	0,25—0,70	350	998

Приведенная выше формула (IV—22) дает точность до третьей значащей цифры, что вполне достаточно для технических расчетов.

Определить плотность ρ_t , кг/м³, раствора данной концентрации при температуре выше t_c [см. уравнение (IV—22)] можно по следующей формуле:

$$\rho_t = \frac{\rho_c}{1 + \beta_t (t - t_c)}, \quad (\text{IV—23})$$

где β_t — коэффициент температурного расширения.

Для интервала температур 40—95° С среднее значение коэффициента температурного расширения (β_t , 1/К) многих водно-белковых систем такое же, как и для воды:

$$\beta_t = 56 \cdot 10^{-5}.$$

Температурные зависимости плотности жира [154] определены аналогично — пикнометром и ареометром. Плотность различных видов жира и коэффициенты температурного расширения приведены в табл. 38.

Т а б л и ц а 38

Продукт	Плотность (в кг/м ³) при температуре, °С		Коэффициент температурного расширения в интервале 50—95° С $\beta_t \cdot 10^5$, 1/К
	100	50	
Жир			
говяжий	855	885	72
свиной	865	890	58
бараний	859	888	66
рыбий	868	903	81
Копытное масло	—	892	—

Кроме того, плотности при любой температуре могут быть вычислены по формуле (IV—23), где вместо ρ_c принимается плотность жира при температуре $t_c = 50^\circ \text{С}$.

Плотность олеиновой кислоты [152] в интервале 12—60° С удовлетворительно описывается уравнением

$$\rho = 907,5 - 0,625t.$$

Коэффициент температурного расширения этой кислоты составляет $71,8 \cdot 10^{-5} 1/K$, температура плавления равна $14^\circ C$, при застывании кислота кристаллизуется в виде игл без запаха и вкуса. В животных жирах ее содержится около половины от общего количества.

Плотность смеси из нескольких компонентов ρ (в $кг/м^3$) можно определить по уравнению

$$\rho = \sum_n c_n \rho_n, \quad (IV-24)$$

где c_n — массовое содержание одного из компонентов в смеси, кг на 1 кг смеси;

ρ_n — плотность компонента, $кг/м^3$;

n — количество компонентов.

Уравнение (IV—24) справедливо, когда компоненты не вступают во взаимодействия, при которых меняется состав или объем смеси.

Плотность тонкоизмельченных видов колбасного фарша была исследована для фаршей докторской колбасы и сосисок русских. В процессе испытаний влажность W изменяли от 0,65 до 0,73; жирность ϕ от 0,15 до 0,22 кг на 1 кг фарша. На основании данных экспериментов, обработанных графо-аналитически, выведено уравнение [154]

$$\rho = 1037 - (290\phi + 10,5U) + 22 \lg \rho. \quad (IV-25)$$

Уравнение (IV—25) справедливо при давлении $(0,1 \div 16) 10^5$ Па. Оно получено в расчете на начальное влагосодержание U от 1,8 до 2,7 кг влаги на 1 кг сухого вещества фарша. Поскольку при повышенном давлении отделение влаги незначительно, то ошибка в вычислении плотности не превышает 3—4%.

На начальном участке кинетической кривой плотности происходит существенное уплотнение фарша, которое заканчивается при $p = (2 \div 4) 10^5$ Па. При больших давлениях плотность увеличивается незначительно. Полученные зависимости позволяют определить объем продукта в сжатом состоянии и после снятия давления.

Зависимость плотности фарша от степени измельчения и вида измельчающей машины обнаружить не удалось. Следовательно, приведенные зависимости пригодны для расчета любых видов куттерованного

фарша. В табл. 39 приведены данные по плотности фарша, при этом образец с влажностью 2,55 наиболее близок по составу к фаршу сосисок русского

Плотность мяса, измельченного на волчке с отверстиями в решетке диаметром 3 мм [152], приведена в табл. 40.

Таблица 39

Характеристика фарша		Давление $p \cdot 10^{-5}$, Па	Плотность, кг/м ³	
Ф, кг/кг	У, кг/кг		по формуле (IV-25)	экспериментальным путем
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—1060
		3,12	1089	1106
		10,6	1100	1119
0,1270	2,70	0,312	1071	1065—1067
		3,12	1093	1107
		10,6	1105	1126
0,1108	3,01	0,312	1072	1060—1062
		3,12	1092	1098
		10,6	1104	1120

Таблица 40

Мясо	Плотность шрота, кг/м ³		
	несоленого	с добавлением 3% соли и 10% воды	соленого без воды
Говядина			
высшего сорта	1048	1059	1064
I »	1041	1049	1054
II »	1033	1045	1049
Свинина			
нежирная	1027	1034	1037
полужирная	986	—	1001
Шпик полутвердый	—	—	930

Плотность творожно-сырковых масс определена при давлениях $(0,1 \div 16)10^5$ Па и продолжительности воздействия давления 180 с:

$$\rho = 1430 - 250K + (60K - 100) \lg p,$$

где K — вычисляется по уравнению (III—19) (см. также табл. 18 и 35).

Ошибка не превышает 6%.

Плотность кисломолочных продуктов (ацидофилина, кефира, простокваши) близка к плотности исходного молока [171]. Например, при 20°C плотность молока 1028 кг/м^3 , кисломолочные продукты, изготовленные из этого же молока, имеют плотность $1027—1027,5 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 41

Смесь	Насыпная плотность, кг/м^3	
	без уплотнения	с уплотнением
«Малютка»	478 ± 18	557 ± 9
«Малыш»		
с гречневой мукой	476 ± 20	562 ± 11
с рисовой мукой	470 ± 16	568 ± 7
с овсяной мукой	504 ± 11	601 ± 6
Эппит		
обезжиренный	403 ± 17	482 ± 10
белковый	396 ± 21	518 ± 7
жировой	390 ± 18	489 ± 8
противоанемичный	426 ± 15	524 ± 5

Насыпная плотность сухих молочных продуктов для детского питания [82] приведена в табл. 41.

ГЛАВА V

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

АДГЕЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (ЛИПКОСТЬ) МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Существенное значение при измерении адгезии (липкости) имеет скорость отрыва пластины от продукта и приложения силы, как это видно из уравнения (I—49).

Прогиб тензобалки (тензокольца) и деформации в подвижных частях прибора меняются в зависимости от липкости и усилий предварительного контакта, если масса устанавливаемого груза для предварительного контакта поднимается вместе с тензобалкой. Ее тарировка на осциллографе дает хорошую воспроизводимость результатов; для усилий P , H можно получить расчетные уравнение следующего вида:

$$P = ax,$$

где a — эмпирический коэффициент, определяемый в результате тарировки, Н/мм;

y — величина усиления;

x — отклонение «зайчика» от нулевой линии на фотоленте осциллографа, мм.

Кроме того, последовательно в привод подвижной части можно вставить сменную пружину различной жесткости, которая позволяет в широком диапазоне менять скорость приложения сил отрыва.

Абсолютные деформации можно разделить на две группы: первая вызвана массой самой системы и грузом для обеспечения предварительного контакта; при этом «зайчик» осциллографа можно поставить на нуль, когда система свободно подвешена, т. е. измещаются только дополнительные силы — силы отрыва; вторая вызвана силой липкости. Отрыв верхней пластины происходит по следующей схеме. Струна, постепенно наматываясь на шкив, или система винт — гайка поднимает подвижную часть прибора. Деформации первой группы достигают максимального значения, «зайчик» пересекает линию нулевой отметки. С этого момента по уравнению прямой начинают нарастать деформации второй группы.

Общая абсолютная деформация (Δ , м) складывается из деформаций струны (Δ_c , м), тензобалки (Δ_b , м), пружины (Δ_n , м), если она имеется, и деформации растяжения исследуемого продукта ($\Delta_{пр}$, м). Деформации струны, тензобалки, пружины можно рассчитать теоретически или установить путем тарировки, общую деформацию — по осциллограмме. При равномерной скорости подъема (ω_0 , м/с) подвижной части прибора эти величины, вклю-

чая длительность отрыва (τ_0 , с), в общем виде связаны соотношением

$$\omega_0 \tau_0 = \Delta_c + \Delta_6 + \Delta_{II} + \Delta_{пр},$$

по которому с учетом осциллограммы можно определить значение любой величины. Эти расчеты позволяют вычислить истинную деформацию материала при отрыве, работу и мощность отрыва, эффективную вязкость при растяжении.

Для мясопродуктов (фарш русских сосисок) экспериментальная проверка уравнения (I—49) была выполнена при различных толщине слоя и влагосодержании U . Фарш измельчали на куттере с тремя серповидными ножами, продолжительность куттерования была оптимальной. Толщину слоя фарша меняли в пределах $(0,3 \div 1,0) 10^{-3}$ м, влагосодержание (в кг воды на 1 кг сухого остатка) имело значения: 2,21; 2,44; 2,70; 3,01.

Из графиков $\frac{1}{\rho_0}(h)$ (рис. 57) видно, что соотношение (I—49) хорошо выполняется при всех значениях влагосодержания и во всем интервале изменений толщины слоя. С увеличением влагосодержания наклон прямых увеличивается, т. е. коэффициент поверхностного натяжения α уменьшается. Вместе с тем отрезок, отсекаемый на оси ординат, уменьшается, т. е. при этом уменьшается темп убывания площади контакта C (при постоянном значении ω_c). Результаты, представленные на рис. 57, получены при давлении контакта 2350 Па и длительности предварительного контакта 300 с к пластинам из нержавеющей стали площадью 0,001 м² при скоростях отрыва — 0,00358 м/с и приложении силы — около 25 Н/с.

Детальное объяснение этих закономерностей затруд-

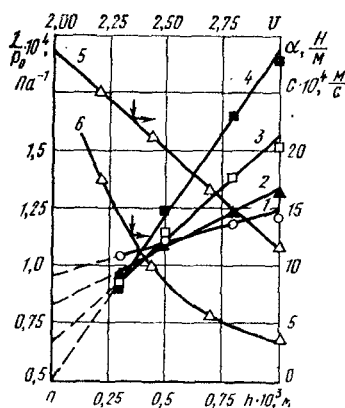


Рис. 57. Зависимость адгезионных характеристик фарша русских сосисок при различных влагосодержаниях (кг воды на 1 кг сухого вещества):

1 — 2,21; 2 — 2,44; 3 — 2,70; 4 — 3,01; 5 — темпа убывания площади контакта; 6 — коэффициента поверхностного натяжения.

днительно ввиду малой изученности механизма молекулярного взаимодействия в мясном фарше. Однако, углубляя проблему и принимая структуру фарша коагуляционного типа, можно предположить, что при увеличении влагосодержания, во-первых, связь фарша с контактирующим материалом возрастает в результате увеличения площади и улучшения контакта и проявления активности белковых молекул в водном растворе прослоек между частицами и, во-вторых, поверхностное натяжение фарша уменьшается, приближаясь к поверхностному натяжению воды (0,08 Н/м).

В табл. 42 приведены значения коэффициентов, полученные из графика (рис. 57). Цифровые величины табл.

Т а б л и ц а 42

U , кг воды на 1 кг сухого вещества	w_c , Н/с	$C \cdot 10^4$, м ² /с	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

лицы соответствуют высказанным соображениям об изменении коэффициентов. Попутно следует отметить, что в широком диапазоне изменения влагосодержаний, температуры и некоторых других факторов адгезионные характеристики при определенных значениях названных параметров могут иметь экстремальную величину. В противоположность этому при увеличении влагосодержания, температуры сдвиговые свойства мясных молочных продуктов уменьшаются.

Таким образом, экспериментальные данные хорошо укладываются в рамки модели (I—44)—(I—47).

С целью получения удобных для практических расчетов уравнений экспериментальные данные обрабатывали в двух вариантах [3, 164, 179]. По первому варианту подбирали эмпирические зависимости, основываясь на изучении хода экспериментальных кривых аналогичных исследованиях других продуктов. Такие уравнения, описывающие первичные результаты экс-

периментов, позволяют вычислить адгезию в условиях, встречающихся в исследовательской и производственной практике. В них не входит в явном виде скорость нарастания силы, которую определить в отдельных случаях сложно. По второму варианту находили постоянные к уравнению (I—49). Преимущество этого способа заключается в том, что, имея одно общее уравнение, при различных условиях проведения эксперимента определяют лишь изменение двух коэффициентов. В качестве примера обобщения двумя способами показаны для распространенного вида мясного фарша — фарша докторской колбасы. Для фарша других видов и мяса полученные закономерности не изменяются, а физические основы процесса идентичны. Поэтому остальные данные представлены в обобщенном виде. Поверхности пластин обрабатывали обычно по V классу чистоты.

Влияние на липкость давления и продолжительности предварительного контакта. В качестве постоянных были приняты площадь пластины $0,0010 \text{ м}^2$, скорость движения струны $0,00358 \text{ м/с}$ и толщина слоя фарша $0,0003 \text{ м}$. Напряжения предварительного контакта имели значения 294, 1030, 2110, 2350, 4900, 6180 Па. При каждом напряжении было проведено по пять измерений с различной длительностью предварительного контакта: 3, 60, 180, 300, 600 с.

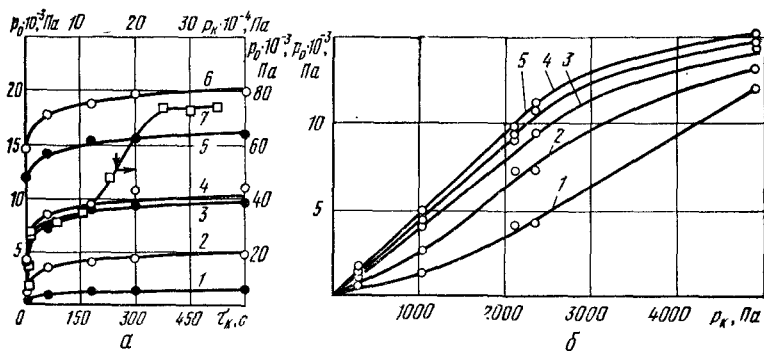


Рис. 58. Кинетические кривые изменения липкости фарша докторской колбасы:

α — в зависимости от длительности предварительного контакта при давлении контакта: 1 — 294; 2 — 1030; 3 — 2110; 4 — 2350; 5 — 4900; 6 — 6180 Па; 7 — от давления контакта при переменной толщине слоя фарша; б — в зависимости от давления контакта при длительности контакта (в с): 1 — 3; 2 — 60; 3 — 180; 4 — 300; 5 — 600.

На рис. 58, а показаны зависимости липкости от длительности предварительного контакта $p_0(\tau_k)$ при разных давлениях предварительного контакта p_k ; они представляют собой типичные кинетические кривые типа (I—11):

$$p_0 = p_{01} + a \lg \tau_k, \quad (V-1)$$

где p_{01} , a — эмпирические коэффициенты; первый представляет собой липкость при продолжительности контакта 1 с, второй характеризует темп нарастания липкости при увеличении продолжительности контакта, Па; пределы применимости уравнения от 3 до 600 с. Значения коэффициентов приведены в табл. 43.

Таблица 43

Материал	Коэффициент к уравнению (V-1)		Отношение липкости материала к липкости нержавеющей стали при продолжительности контакта, с		Липкость при $\tau_k=600$ с, Па	$C \cdot 10^4$, м ² /с
	p_{01} , Па	a	1—3	300		
Дюралюминий	12800	2500	1,04	1,09	19600	4,8
Нержавеющая сталь	12300	2100	1,00	1,00	18000	7,3
Сталь Ст. 3	11450	2100	0,93	0,96	16980	8,2
Чугун	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

Примечания: 1. Величины липкости получены при толщине слоя фарша докторской колбасы 0,0003 м, площади пластин 0,0007 м², давлении контакта 4900 Па.

2. Экспериментальные данные находятся в пределах $\pm 12\%$ от средних значений величин.

3. Коэффициент поверхностного натяжения составляет около 4.2 Н/м.

Увеличение давления контакта ведет к увеличению липкости. При высоких p_k толщину слоя не удается сохранить постоянной. Начальная толщина слоя 0,0003 м практически не изменяется до $p_k=8000$ Па. Затем отрыв происходит уже при меньшей толщине, что связано с вытеканием фарша из зазора между пластинами. При наибольших p_k толщина слоя перед отрывом достигает наименьшей величины — около 0,00001—0,00002 м, которая соизмерима с размером частиц куттерованного мяса. Таким образом, начальные условия не совпадают

с условиями отрыва. Верхний участок кривой 7 (см. рис. 58, а), полученной при наименьшей толщине, дает постоянное значение липкости, которую можно, по-видимому, интерпретировать как истинную адгезию.

Обработка результатов измерений показала, что при малой длительности контакта зависимость липкости от давления контакта (рис. 58, б) в начале координат не является линейной. Очевидно, при этом обеспечивается контакт между выступами шероховатости, площадь которых незначительна, и продуктом. Площадь действительного контакта оказывается величиной малой и легко изменяющейся. Увеличение длительности и давления предварительного контакта способствует заполнению выступов шероховатости фаршем и стабилизирует измеряемые показатели (см. рис. 58, а, кривая 7).

Анализ экспериментальных данных позволяет выбрать границы изменения давления и продолжительности контакта. При небольших p_k и τ_k контакт пластины с продуктом полностью зависит от ровности слоя и других случайных величин, которые учесть весьма сложно. При высоких p_k фарш вытекает из зазора, толщина к моменту отрыва отличается от начальной. При больших τ_k изменение адгезии незначительно, но возможно подсыхание продукта по периметру слоя. В области p_k от 2000 до 5000 Па прибор дает наиболее устойчивые показания; для густых фаршей следует выбирать значения p_k ближе к верхнему пределу, для жидких — среднее или ближе к нижнему. Оптимальная длительность контакта, когда заканчивается процесс заполнения микро- и макронеровностей и молекулярного взаимодействия, составляет от 180 до 300 с. Приведенные зависимости справедливы при $\tau_k \leq 600$ с; если продолжительность контакта больше указанной, расчет можно вести по времени 600 с, имея в виду, что при большей продолжительности контакта липкость увеличивается незначительно (до 5%).

Влияние на липкость материала пластин. Адгезия продуктов к различным металлическим поверхностям, покрытым естественной окисной пленкой, неодинакова [154]. А. М. Медведева [113] установила следующий ряд интенсивности взаимодействия металлов с клеевой пленкой (в порядке понижения): алюминий, титан, дюралюминий, сталь, цинк, латунь, медь. Наши исследования

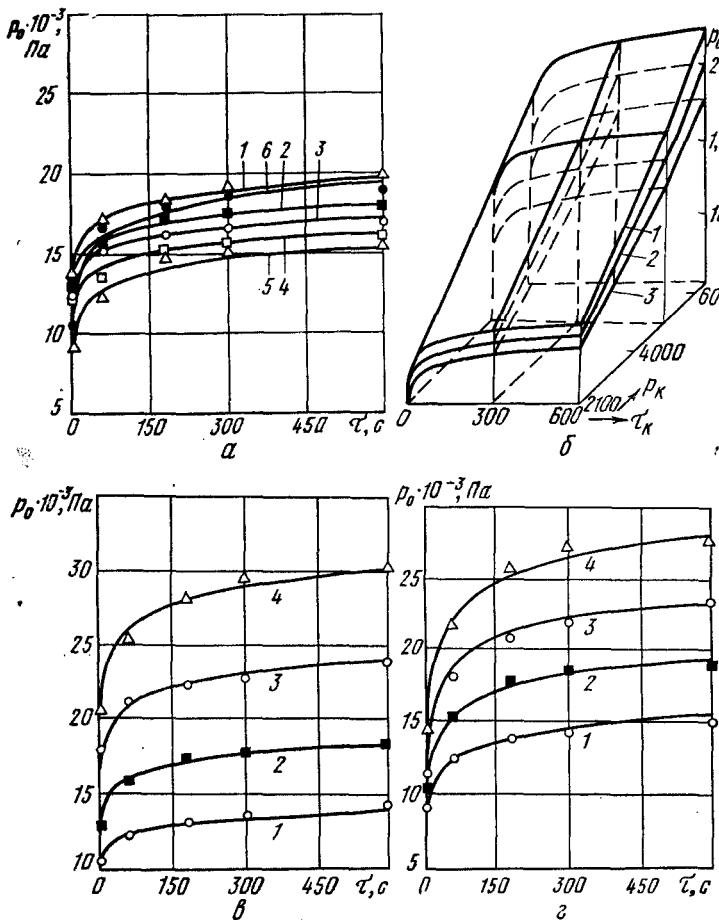


Рис. 59. Кинетические кривые изменения адгезии в зависимости продолжительности предварительного контакта:

a — для пластин из разных материалов (номера кривых соответствуют номерам в табл. 43); *б* — для пластин различной площади (в м^2): 1 — 0,02; 2 — 0,0010; 3 — 0,0015; *в, з* — соответственно для пластин из нержавеющей стали (*а*) и фторопласта (*з*) при различных скоростях отрыва (м/с): 1 — 0,00167; 2 — 0,00358; 3 — 0,00930; 4 — 0,0193.

[33, 164] подтвердили этот порядок интенсивности диллипкости тонкого слоя фарша (см. табл. 43). Установлено, что чем тоньше окисная пленка и менее прочно она связана с металлом, тем силы адгезии меньше. По-

Следовательно, такое объяснение универсально. Следует отметить аномальное поведение фторопласта, который при малой продолжительности взаимодействия с фаршем показывает небольшую липкость, интенсивно возрастающую при увеличении длительности контакта (рис. 59, а). Аналогичные результаты получил Б. А. Николаев [124] для небродящего теста. Поскольку среди всех названных материалов фторопласт является наиболее «пористым», то во время длительного предварительного контакта наряду с механическим зацеплением не только на поверхности раздела, но и в глубине материала происходит физико-химическое взаимодействие.

Влияние на липкость площади пластин. В качестве постоянных были приняты толщина слоя фарша 0,0003 м, скорость отрыва 0,00358 м/с, давление контакта 4900 Па. Площади пластин из стали марки Ст. 3 были выбраны следующих размеров: 0,0005; 0,0007; 0,0010 и 0,0015 м². Для каждой пластины измерения проводили при продолжительности предварительного контакта 3, 60, 180, 300 и 600 с. На рис. 59, б показаны кинетические зависимости для разных площадей пластин. Из графика видно, что с увеличением площади пластин липкость уменьшается. Интерпретация экспериментов дает основание предположить, что при площади около 0,0013 м² липкость наименьшая.

В результате комплексных исследований совместного влияния на липкость длительности, давления контакта и площади пластин получены графические зависимости, изображенные на рис. 59, б. Для их обобщения могут быть использованы зависимости типа (V—1).

Таким образом, отмечаемая в литературе [124] зависимость адгезии и липкости от площади контакта подтверждается для мясного фарша. Для получения сопоставимых результатов исследований площадь пластин около 0,0010 м² можно считать наилучшей.

Влияние на липкость скорости отрыва пластины. Эксперименты были проведены на пластинках площадью 0,0007 м² из нержавеющей стали, фторопласта и стали марки Ст. 3 при давлении предварительного контакта 4900 Па и толщине слоя фарша 0,0003 м. Скорости отрыва пластины имели четыре значения: 0,00167; 0,00358; 0,00930; 0,0193 м/с; продолжительность контакта — пять значений при каждой скорости.

Результаты опытов для нержавеющей стали (*в*) фторопласта (*г*) представлены на рис. 59. Сопоставление кривых показывает, что при продолжительности контакта примерно до 30 с липкость фарша к фторопласту меньше, чем к стали. При большей продолжительности контакта для небольших скоростей отрыв ($0,00167$; $0,00358$) липкость к фторопласту выше, чем к стали; при скоростях $0,0093$ и $0,0193$, наоборот, меньше. Рассматривая отрыв в соответствии с уравнением (I—46) как сокращение площади контакта взаимосвязей структур во времени, можно предположить, что при быстром отрыве происходит более или менее одновременный разрыв связей фарш — поверхность; при медленном наряду с разрывом связей нарастает механическое зацепление продукта с материалом в выступах шероховатости и в микропорах.

Графические зависимости, приведенные на рис. 59, *в*, *г*, описываются уравнением

$$p_0 = p_0^* + a_{\omega} (\lg \tau_k - \lg \tau_k^*), \quad (V-1)$$

где p_0^* , τ_k^* — липкость и продолжительность контакта, постоянные для любой скорости отрыва диска, но зависящие от материала пластин, Па;

a_{ω} — коэффициент, характеризующий интенсивность возрастания адгезии при увеличении скорости отрыва Па (табл. 44).

Таблица 44

Материал	Коэффициенты к уравнению (V—2)					
	p_0^*	τ_k^*	a_1	a_2	a_3	a_4
Сталь Ст. 3	5150	0,0010	780	2400	1250	0,4
Нержавеющая сталь	6000	0,0010	780	2400	1250	0,4
Фторопласт	3000	0,0316	2280	2800	2800	0,2

$$\left. \begin{aligned} a_{\omega} &= a_1 + a_2 \lg(\omega_0 \cdot 10^3) \text{ при } 1 \leq \omega_0 \cdot 10^3 \leq 10; \\ a_{\omega} &= a_3 (\omega_0 \cdot 10^3)^{a_4} \text{ при } 3 \leq \omega_0 \cdot 10^3 \leq 20. \end{aligned} \right\} (V-2)$$

В диапазоне скоростей от $0,003$ до $0,010$ м/с можно пользоваться любой зависимостью (V—2а).

Из пределов применимости уравнения (V—2) видно, что имеются две зоны зависимости липкости от скорости отрыва: логарифмическая при малых скоростях и степенная при больших.

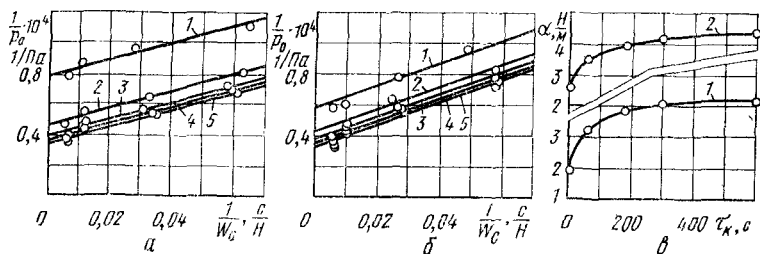


Рис. 60. Зависимость адгезионных характеристик:

a — для фторопласта от обратной величины скорости приложения силы; *б* — то же, для нержавеющей стали при различной длительности контакта (в с): 1—3; 2—60; 3—180; 4—300; 5—600; *в* — от длительности контакта: 1 — для фторопласта; 2 — для нержавеющей стали.

пленная — при больших. Однако за правило такую зависимость принять нельзя. При изменении условий измерения меняется вид функции, которая описывает процесс адгезионного взаимодействия. Скорость приложения силы со скоростью отрыва связана линейно.

Таким образом, влияние скорости отрыва на липкость можно объяснить различными условиями нарушения сплошности продукта (микродефекты, продолжительность разрушения связей и пр.). Оптимальные значения скорости отрыва находятся в пределах 0,003—0,010 м/с.

Существенный интерес представляет интерпретация результатов экспериментальных исследований в свете аналитического уравнения (I—49). При этом следует отметить, что оно приемлемо для структур с достаточным количеством дисперсионной среды, что соответствует выбранной модели «сложной жидкости» (I—44).

Влияние на липкость длительности предварительного контакта. Увеличение продолжительности предварительного контакта сопровождается увеличением действительной площади контакта и количества ячеек, которые имеют максимальное сцепление с пластинами, что определяет смачивание материала пластин (рис. 60, *a*, *б*). Из этого следует, что связи между фаршем и поверхностью стремятся к насыщению, и если липкость вначале растет интенсивно (см. рис. 59), то затем незначительно. Коэффициент поверхностного натяжения, характеризующий энергию свободной поверхности фарша, также стремится к постоянному значению

(рис. 60, в), а косинус угла смачивания — к единице т. е. происходит полное смачивание. Для последнего случая ориентировочно [3, 179] можно оценить удельную работу липкости. Такая оценка показывает примерно одинаковую величину удельной работы для фторопласта и нержавеющей стали — около 8,4 Дж/м². При этом начальное значение коэффициента для пластин из фторопласта меньше, чем для нержавеющей стали, что указывает на худшее смачивание фторопласта при малой продолжительности контакта; при достаточно большой длительности контакта коэффициенты практически одинаковы (см. рис. 60, в).

Коэффициент поверхностного натяжения не зависит от материала пластин. Этот вывод, справедливый для полностью смоченных пластин, согласуется с теоретическими представлениями об адгезии [14, 16].

На графиках $\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{1}{\omega_0} \right)$ (рис. 60, а, б) угол наклона линий, характеризующий темп убывания площади контакта по уравнению (I—49), практически одинаков. Следовательно, темп разрыва связей определяется их прочностью, но не зависит от количества, которое непосредственно влияет на угол смачивания и, следовательно, на коэффициент поверхностного натяжения. Таким образом, темп убывания площади контакта не изменяется с увеличением продолжительности предварительного контакта. Для фарша докторской колбасы в контакте с фторопластом получено среднее значение темпа убывания площади $(5,5 \pm 0,5) 10^{-4}$ м²/с, для нержавеющей стали — $(8 \pm 1) 10^{-4}$ м²/с.

Влияние на липкость материала и площади пластин
Исследования проводили при достаточно большой продолжительности контакта (600 с), когда коэффициент поверхностного натяжения подвержен незначительным изменениям, и давлению контакта 4900 Па, при котором геометрическая площадь пластины (0,0007 м²) и площадь истинного контакта перед началом отрыва примерно совпадают. Толщина слоя фарша составляла 0,0003 м.

Для определения темпа убывания площади зависимость (I—49) можно представить следующим образом

$$C = \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{h}{2\alpha} \right) \omega_c = \frac{F_0}{\tau_0} - \frac{h\omega_c}{2\alpha}. \quad (V-3)$$

Подставляя в уравнение значения постоянных величин, в том числе и коэффициента поверхностного натяжения, равного 4,2 Н/м, получим расчетную формулу

$$C = \frac{1}{2,8 \cdot 10^4} \left(\frac{20}{\tau_0} - \omega_c \right),$$

по которой был вычислен темп убывания площади (см. табл. 43). Из сравнения величин липкости и темпа убывания площади видно, что они передают изменения степени взаимодействия фарша с различными материалами — большей липкости соответствует меньший темп убывания площади. Однако темп убывания площади в отличие от липкости не зависит от длительности контакта (при не очень малых его значениях) и поэтому является удобной величиной для практических расчетов и оценок.

Экспериментальные данные и вычисленные значения темпа убывания площади для стали марки Ст. 3 приведены в табл. 45. Сравнение величины темпа убывания площади возможно в том случае, когда скорость увеличения силы постоянна. Если исключить ее влияние на темп убывания площади, т. е. взять отношение C/ω_c , то заметна тенденция его возрастания при увеличении F_0 . Число связей, разрываемых за 1 с, оказывается сравнимым с общим числом связей между фаршем и пластиной. Действительно, темп убывания площади пропорционален числу связей, разрываемых в 1 с, а F_0 пропорциональна общему числу связей: отношение C/F_0 оказывается порядка 0,5—1,5 с⁻¹ (табл. 45).

Т а б л и ц а 45

$F_0 \cdot 10^4$, м ²	τ_0 , с	p_0 , Па	$(C/\omega_c) \cdot 10^4$, м ² /Н	$C \cdot 10^4$, м ² /с	ω_c , Н/с	$\frac{C}{F_0}$, с ⁻¹
5	0,258	17500	0,214	7,3	34,0	1,46
7	0,356	16980	0,231	7,7	33,3	1,10
10	0,716	16150	0,261	5,9	22,5	0,59
15	0,791	14050	0,360	9,6	26,5	0,64

Влияние на липкость шероховатости поверхности. Исследования проводили на пластинах из латуни и нержавеющей стали при давлении контакта 4900 Па, площади 0,0007 м², скорости отрыва

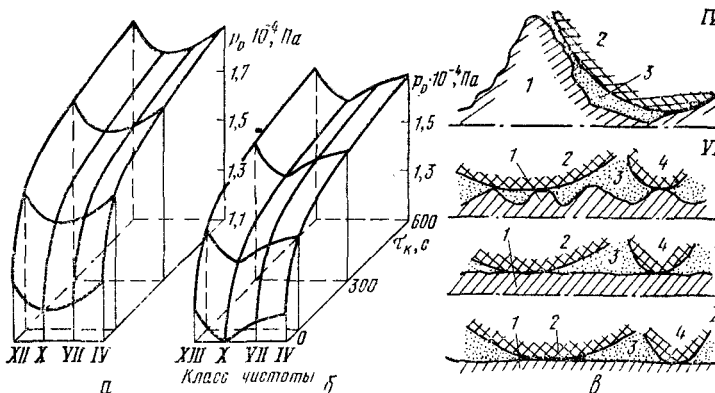


Рис. 61. Зависимость адгезии фарша от класса чистоты поверхности стали (а) и латуни (б) и схема взаимодействия фарша с поверхностью (в):

1 — материал пластины; 2 — мышечные частицы; 3 — жидкостные прослойки; 4 — жировые частицы.

0,00358 м/с, толщине слоя 0,0003 м и для различной чистоты обработки поверхности: IV, VII, X и XIII классы по ГОСТ 2789— (рис. 61). Эти классы чистоты имеют среднюю высоту выступов (в мкм): 20—40; 3,2—6,3; 0,5—0,8 и 0,1—0,12 соответственно. При этом для IV и VII классов сами макровыступы на своей поверхности имеют микровыступы. Схематичный вид поверхности для классов чистоты показан на рис. 61, в. Размеры частиц фарша [152] (в мкм) составляют: мышечной ткани—30—160, жировых клеток—120—160, жировых капель около 20; жидкостные прослойки имеют толщину до 12 мкм, т. е. эти размеры соизмеримы с высотой выступов шероховатости.

Из схемы на рис. 61 видно, что для IV класса истинная поверхность пластины больше геометрической; контакт частиц с материалом может быть точечным и по некоторой площади. Для VII класса осуществляется меньшее количество контактов, чем в первом случае; возможно также и «провисание» волокон. Для XIII класса количество контактов (они в основном точечные) еще больше сокращается, возможность «провисания» частиц и по длине, по периметру увеличивается. Наконец, для XIII класса — наиболее гладкой поверхности (высота выступов на 2—3 порядка меньше размера частиц) — контакт происходит по некоторой поверхности, показанной зачерненными участками на рис. 61, в. Поскольку существуют жидкостные водно-белковые прослойки, в явлении взаимопритяжения фарш—металл большую роль играют белковые молекулы, которые после вытеснения жидкости из мест контакта могут непосредственно связывать между собой частицы мясного материала поверхности. Кроме того, и, по-видимому, это главная причина увеличения взаимопритяжения заключается в следующем. При высоте выступов шероховатости 0,1 мкм касание частиц

поверхности материала приводит к возникновению жидкостных частей с радиусом кривизны около $0,05 \cdot 10^{-6}$ м (0,05 мкм), что вызывает появление сил избыточного давления сближения [см. уравнение (I—44)]. Его приближенно (с явным занижением) можно оценить по коэффициенту поверхностного натяжения воды 0,08 Н/м:

$$p_{00} = \frac{2\alpha}{r} = \frac{2 \cdot 0,08}{0,05} \cdot 10^6 = 32 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

При измеряемой величине липкости около $0,2 \cdot 10^5$ Па полученное давление на два с лишним порядка выше. Естественно, что при таком высоком давлении ($32 \cdot 10^5$ Па) разрушаются водно-белково-солевые оболочки (прослойки) и истинная площадь контакта резко возрастает. О более сильном взаимодействии фарша с гладкой поверхностью свидетельствует и наблюдающийся хорошо выраженный когезионный вид отрыва. Для поверхностей, обработанных по более низкому классу, отрыв обычно смешанный.

Из описанной схемы явления следует, что липкость с увеличением чистоты поверхности должна уменьшаться, достигать минимума и вновь увеличиваться, что полностью подтверждает рис. 61, а, б. В этом смысле представляет интерес работа А. Д. Зимова и Т. С. Волковой [70], которые исследовали адгезию стекляных шариков со средним диаметром 20, 40, 70 мкм к поверхностям различной чистоты обработки. Полученные результаты для фарша согласуются с опытами А. Д. Зимова, который, однако, трактовки для восходящей части кривой адгезии не дает.

Таким образом, для уменьшения адгезии поверхность должна быть обработана по X классу чистоты. Поскольку характер изменения липкости от чистоты поверхности остается неизменным при любой длительности контакта (см. рис. 61), X класс является оптимальным как для статических, так и для динамических режимов работы машин соответственно при большой и малой продолжительности контакта.

Адгезионные характеристики различных мясопродуктов помещены в табл. 46. Адгезия говядины и свинины к стали Ст. 3 изучена для площади пластин $0,001 \text{ м}^2$ при условиях измерения, указанных в табл. 46. Обработка результатов по уравнению (I—49) показала хорошее совпадение с ним; ход кривых аналогичен полученному для фарша докторской колбасы, за исключением коэффициента поверхностного натяжения, который при большой продолжительности контакта не остается постоянным. Адгезия говядины вдоль и поперек волокон почти одинакова (превышение в первом случае достигает 10%). Значительно уменьшается (в 1,5—2 раза) адгезия дефростированной говядины, что, вероятно, связано с необратимыми изменениями структуры ткани и сока при замораживании и размораживании. Результаты измерения адгезии свинины к различным мате-

Скорость отрыва $\omega \cdot 10^3$, м/с	Толщина слоя $h \cdot 10^3$, м	Предварительный контакт		Липкость ρ_0 , Па	Скорость отрыва $\omega \cdot 10^3$, м/с	Толщина слоя $h \cdot 10^3$, м	Предварительный контакт		Липкость ρ_0 , Па
		давление P_K , Па	продолжительность τ_K , с				давление P_K , Па	продолжительность τ_K , с	
Свинина вдоль волокон					Говядина вдоль волокон				
3,58	3,5	3430	3	1500	3,58	3,3	294	3	59
	3,2		300	3980	3,0	300		140	
9,24	3,1	3430	3	2680	3,58	3,5	1030	3	82
	3,3		300	4950	3,0	300		253	
19,22	3,2	3430	3	3100	3,58	3,1	3430	3	188
	3,0		300	6700	3,0	300		478	
Свинина поперек волокон					3,58	3,9	8000	3	327
3,58	3,1	3430	3	1700	9,24	3,3		3430	3
	3,4		300	4070	3,0	300	298		
9,24	3,1	3430	3	2880	19,22	3,1	3430	3	670
	3,5		300	4620	3,2	300		360	
19,22	3,0	3430	3	3400	3,5	3430	3	810	
	3,0		300	7500	3,5		300	810	
					Говядина поперек волокон				
3,58	3,4	3430	3	1820	3,58	3,4	3430	3	182
	3,5		300	4200	3,5	300		420	
9,24	3,0	3430	3	3400	9,24	3,0	3430	3	250
	3,0		300	7500	3,5	300		620	
19,22	3,0	3430	3	3300	19,22	3,0	3430	3	330
	3,0		300	7500	3,0	300		750	

риалам показали, что поскольку отрыв носит адгезивный характер, то, несмотря на большую толщину слоя (0,003 м), ряд активности материалов соответствует установленному для фарша докторской колбасы, где отрыв реализовали в тонком слое. Из табл. 46 видно, что адгезия свинины и говядины имеет один порядок, для говядины выше на 10—15%, чем для свинины.

Зависимости липкости свиного шпика от продолжительности контакта имеют несколько отличный характер от кривых для других мясных продуктов: при увеличении продолжительности контакта у них не наблюдается тенденция к выходу на постоянное значение (рис. 62, а).

При куттеровании фарша на стенках и ножах куттера образуется довольно прочная макропенка мелкодисперсного вещества (частицы мяса, соединительные

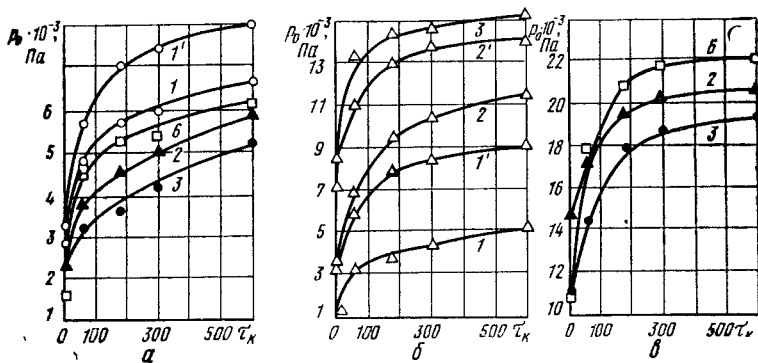


Рис. 62. Зависимости липкости от продолжительности предварительного контакта при скорости отрыва 0,00358 м/с:

а — для свиного шпика к различным материалам (номера кривых соответствуют номерам кривых в табл. 43; б — для грязи с роликов и мелкодисперсного слоя со стенок куттера (кривые с индексом штрих) при различном давлении контакта: 1 — 1030; 2 — 3440; 3 — 8000 Па; в — для мелкодисперсного слоя со стенок куттера к различным материалам (номера кривых — см. табл. 43).

ткани, жира и воды). Такая же пленка образуется на всех поверхностях, вдоль которых проходит куттерованный колбасный фарш. Пленка является первой причиной удерживания фарша на поверхности, что для некоторых машин положительно, других — отрицательно. Возникновение пленки фарша обусловлено проскальзыванием крупных частиц вдоль поверхности и сцеплением с ней мелких, что также согласуется с теорией ламинарного подслоя. Подобная пленка (белки, вода, ржавчина) образуется на троллеях и разногах. Существующие методы ее удаления (мойка обычная и ультразвуковая) основываются на эмпирически подобранных режимах обработки. С целью определения исходных параметров для расчета очищающих устройств могут быть использованы полученные данные о липкости этих пленок к поверхностям (рис. 62, б, в). Микропленки белковых веществ, адсорбированных на поверхностях, образуют прочные защитные покрытия; белок в пленке уподобляется денатурированному состоянию.

Липкость тонкоизмельченных видов фарша имеет одинаковый порядок. Поэтому зависимости, полученные для расчета липкости фарша докторской колбасы,

применимы в первом приближении для расчета липкости других тонкоизмельченных видов фарша.

В технологии кулинарной обработки мясных продуктов для придания им большей «нежности» добавляются ферментные препараты. Производственная практика подтвердила технологическую целесообразность и экономическую эффективность их использования для совершенствования процессов и улучшения качества продукции. При добавлении в фарш протеолитических ферментов разрушаются межмолекулярные связи в белках, т. е. высокомолекулярные соединения переходят в низкомолекулярные. Разрушение крупных белковых соединений внешне проявляется в изменении структурных свойств фарша.

Для исследований влияния ферментирования на липкость фарша [74] использовали тандрин и кератиназу. Продолжительность ферментирования — 15 мин, включив время контакта. Длиннейшую мышцу спины пропускали через мясорубку с отверстиями в решетке диаметром 1 мм; площадь пластин $0,0007 \text{ м}^2$, скорость отрыва $0,00358 \text{ м/с}$, давление контакта 3430 Па . Отрыв в большинстве опытов имел адгезионный характер.

Зависимость липкости и абсолютной деформации сферическим пуансоном с массой $0,09 \text{ кг}$ от продолжительности предварительного контакта и действия давления показана в табл. 47.

Липкость и вязкость ферментированного фарша меньше, деформируемость больше, чем контрольного. Вязкость измеряли в области практически неразрушенных структур на приборе Б. А. Николаева [124] с плоским параллельным смещением пластин на наклонной плоскости. Изменение величины свойств, видимо, объясняется дроблением высокомолекулярных соединений в жидких прослойках дисперсионной среды фарша. При «мгновенном» контактировании контрольный фарш имеет меньшую липкость: вследствие его большей вязкости и меньшей деформируемости он медленнее сблужается с поверхностью материала, и, следовательно, продолжительность образования контактов с поверхностью увеличивается (см. рис. 61).

Липкость, так же как и сдвиговые свойства, можно в определенной степени характеризовать качеством продукта. Сделанный выше вывод подтверждается характером

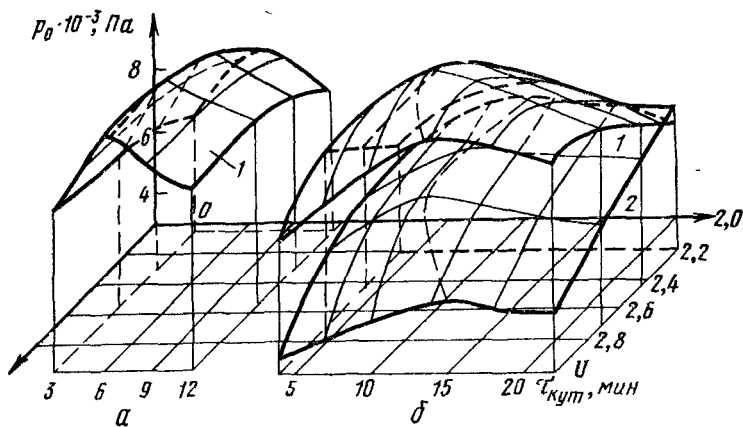


Рис. 63. Зависимость липкости фарша русских сосисок от длительности куттерования и влагосодержания:

a — куттер с чашей вместимостью 240 л; *б* — куттер с чашей вместимостью 80 л при различной толщине слоя фарша: 1 — 0,0003; 2 — 0,001 м.

тером изменения липкости при куттеровании фарша [201]. Из рис. 63 видно, что при эталонных режимах обработки (см. рис. 36) липкость имеет экстремальное значение при толщине слоя фарша 0,0003 м. При толщине слоя 0,001 м и увеличении влагосодержания липкость монотонно уменьшается подобно изменению сдвиговых свойств. При малой толщине слоя в основном проявляются силы, обусловленные энергией свободной поверхности (адгезионные); при большей толщине слоя — объемные, когда возможно течение фарша между пластинами при их расхождении, а объемная прочность (например, предельное напряжение сдвига) с увеличением влагосодержания уменьшается. Эти данные показывают, что для объективной характеристики процесса необходимо экспериментально выбрать соответствующие условия измерения (см. главу II).

Понижение температуры фарша от 17—18 до 4—5° С ведет к уменьшению липкости на 30—40% за счет увеличения вязкости и прочности дисперсионной среды и, следовательно, системы в целом. Липкость имеет наибольшее значение при 23—27° С. Эксперименты проведены при продолжительности предварительного кон-

Таблица 47

Определяемая характеристика	Название периода и его длительность, с	Вид фарша			
		контрольный	ферментированный		
			тандрином	кератиной	
Липкость, $\rho_0 \cdot 10^{-4}$, Па	Предварительный контакт	3	0,40	0,58	0,50
		60	1,04	0,86	0,77
		180	1,23	1,03	1,19
		600	1,67	1,34	1,36
Деформация, $\delta \cdot 10^3$, м	Действие силы	1	2,0	3,5	3,0
		30	5,6	7,7	6,9
		60	6,7	9,3	8,6
		180	7,5	11,0	9,5
	Восстановление	0	7,5	11,0	9,5
		30	5,3	8,7	7,2
		180	5,2	8,4	7,0
Вязкость, $\eta_0 \cdot 10^{-4}$, Па·с	—	—	20,0	12,8	15,4
Модуль сдвига, $G \cdot 10^{-3}$, Па	—	—	3,0	2,6	2,7
Период релаксации, с	—	—	68	49	57

такта 3 с, давлении 3440 Па и скорости отрыва 0,00358 м/с.

Липкость пельменного теста [2]. Влажность теста составляла 0,4—0,43 кг влаги на 1 кг теста; для исследований использовали адгезиометр [202, 203] со скоростью отрыва 0,00045 м/с, пластины из нержавеющей стали площадью 0,0010 м². Тесто для измерений брали после прохождения через пельменный автомат, измерения проведены при температуре 10—15° С. Полученные значения липкости (табл. 48) удовлетворительно согласуются с данными проф. Б. А. Николаева [124]. Средние значения липкости составляют 14 000—16 000 Па.

Таблица 48

Давление контакта, Па	Продолжительность контакта, с	Липкость (в Па) при толщине слоя теста, м	
		0,001	0,002
1960	3	8 100	12 800
	60	15 000	11 300
	300	15 150	14 000
4900	3	13 700	12 600
	60	15 070	13 600
	300	14 800	15 000
9850	3	14 700	13 800
	60	14 700	14 300
	300	15 400	15 000

Липкость сырково-творожной массы [68, 117, 120]. Исследования проводили на образцах особой сырково-творожной массы, которую изготовляли путем перемешивания творога, сливочного масла и сахара. Поскольку размеры белковых частиц достигают 0,001 м, нанести на пластину слой меньшей толщины затруднительно, и основные эксперименты выполнены при толщине слоя 0,001 м. Результаты измерения липкости особой творожно-сырковой массы при давлении контакта 4900 Па

Таблица 49

Материал пластин	Длительность контакта, с	Липкость (в Па) при скорости отрыва, м/с			
		0,00167	0,00358	0,0093	0,0193
Нержавеющая сталь	3	6700	9100	12000	13400
	60	7600	10000	13200	15300
	180	9100	11800	15100	16300
	300	10500	12700	16300	21850
Фторопласт-4	600	14500	17100	23000	26600
	3	9600	10100	16300	18400
	60	12200	10700	19300	22600
	180	12300	13400	20400	23700
	300	14200	13600	21850	28000
	600	15300	14200	24600	32000

и площади пластин 0,0010 м² приведены в табл. 49. Вопрос об изменении липкости при изменении состава представляет большой практический интерес. Для его выяснения проводили измерения на пробах творожной массы различного состава при постоянстве всех прочих параметров. Типичный результат дан в табл. 50.

Таблица 50

Химический состав продукта, кг/кг сырковой массы				Липкость (в Па), при толщине слоя продукта, м		
вода	жир	белок	сахар	0,0005	0,001	0,0015
0,43	0,22	0,09	0,26	10000	7900	5700
0,65	0,19	0,16	—	10700	8600	4700

для двух проб различного состава. Из табл. 50 видно, что химический состав творожной массы не влияет существенно на липкость при постоянных условиях измерения. По-видимому, липкость определяется главным образом природой и строением молекул и структурно-механическими особенностями объекта. С повышением влажности увеличивается липкость, если измерения проведены для тонкого слоя продукта, когда в большей мере реализуется адгезия. Для более толстого слоя (0,0015 м), когда начинает «работать» когезионная прочность, увеличение влажности приводит к понижению липкости. Аналогичная картина наблюдается для мясного фарша. Это явление имеет определенный физический смысл: при увеличении влажности до определенного предела поверхностная энергия продукта повышается, объемная прочность структуры (когезия) за счет утолщения водных прослоек и уменьшения вандер-ваальсовых сил сцепления понижается. Такой характер изменения величины липкости позволяет отнести ее к числу объективных характеристик творожно-сырковой массы.

Липкость плавленых сыров [80]. Исследования проводили в широком диапазоне изменения длительности и давления предварительного контакта, площади пластин, толщины слоя и пр. При этом пользовались прибором,

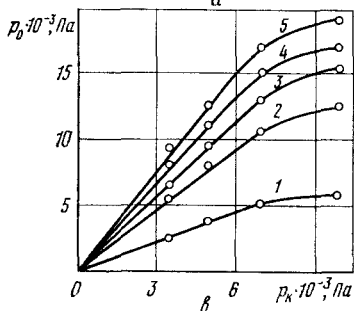
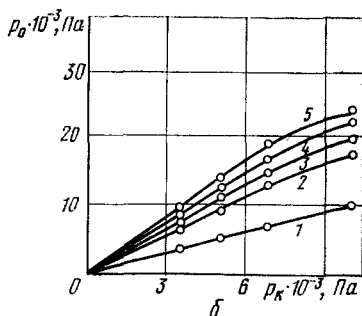
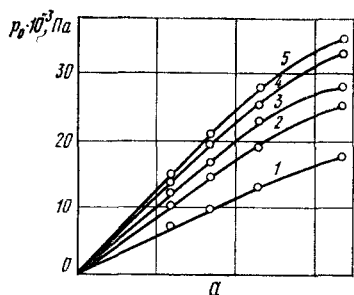


Рис. 64. Зависимость липкости плавленных сыров:

а — «Янтарь» при толщине слоя 0,0003 м; б — «Дружбы» при толщине слоя 0,0004 м; в — «Нового» при толщине слоя 0,001 м от давления предварительного контакта при различной длительности контакта: 1 — 3 с; 2 — 60; 3 — 180; 4 — 300; 5 — 420 с (площадь пластин $0,001 \text{ м}^2$, материал — нержавеющая сталь).

который изображен на рис. 21. В качестве объектов исследования были выбраны сыры типа «Янтарь», «Дружба», «Новый». При одинаковых условиях измерения наибольшие значения липкости у сыра «Янтарь» и наименьшие — у сыра «Новый». Все измерения проводили при 18–20° С.

Установлено, что с увеличением давления и длительности предварительного контакта липкость увеличивается (рис. 64). Это связано с увеличением числа контактов и соответственно истинной площади контактирования.

Давление контакта больше 9800 Па неприемлемо, так как ведет к выдавливанию продукта из зазора и изменению толщины слоя.

Исследования влияния площади пластин в диапазоне от $5 \cdot 10^{-4}$ до $15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ на липкость плавленных сыров при постоянстве остальных параметров показали, что с увеличением площади пластин от 5 до $15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ липкость сначала уменьшается заметно, а затем незначительно.

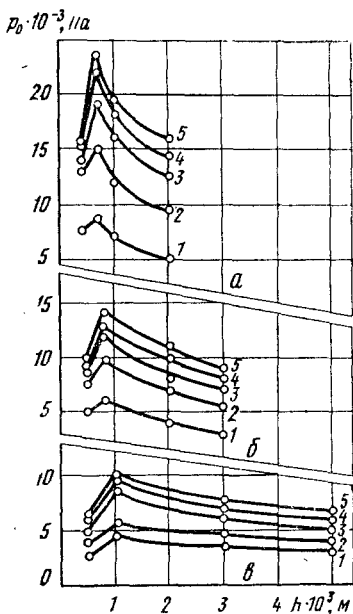


Рис. 65. Зависимость липкости плавленых сыров:

а — «Янтаря»; б — «Дружбы»; в — «Нового» от толщины слоя продукта при различной длительности контактирования: 1 — 3 с; 2 — 60; 3 — 180; 4 — 300; 5 — 420 с (давление контакта 4900 Па, площадь пласта 0,001 м², материал — нержавеющая сталь).

С уменьшением толщины слоя образца плавленого сыра липкость увеличивалась, но до определенного предела (рис. 65). Такая аномалия, вероятно, связана с термомеханическими процессами, т. е. повышением температуры на выступах шероховатости, либо возможной систематической ошибкой.

Исследования позволили установить следующий ряд адгезионной активности

плавленых сыров к различным материалам (с уменьшением активности): чугун, нержавеющая сталь, латунь, фторопласт, сталь Ст. 3.

ФРИКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Коэффициент внешнего трения является важной характеристикой при расчетах различных устройств, машин и аппаратов. Этот коэффициент представляет собой комплексную величину и лишь частично отражает внутреннюю сущность продукта, поскольку сам является вторичной характеристикой, определяющей поведение продукта на границе с твердым материалом.

При измерении величины коэффициента внешнего трения, так же как и при измерении адгезионных характеристик, важную роль играют скорость приложения силы (см. рис. 23) и другие геометрические, кинематические и динамические факторы.

Для сыпучих продуктов (сухие смеси для детского питания, сухие животные корма и пр.) наряду с коэффициентом внешнего трения существенное значение имеет угол естественного откоса или коэффициент внутреннего трения. Эту характеристику продуктов учитывают при расчете дозаторов, транспортеров и т. д.

Внешнее трение мясopодуKтов исследовали на трибометре с тележкой (см. рис. 22, а), которая приводилась в движение от электродвигателя [164]. Образец продукта высотой 0,005 м закладывали в рамку площадью 0,0010 м², которую устанавливали на исследуемую поверхность, в течение 60 с создавали предварительный контакт, затем включали осциллограф и электродвигатель. Тележка имеет четыре скорости смещения: 0,00547; 0,0171; 0,0342; 0,0513 м/с. Типичная осциллограмма записи процесса представлена на рис. 23.

В первый период при смещении рамки усилие резко возрастает практически по прямой, угол наклона которой представляет собой скорость приложения силы трения по аналогии с зависимостью (I—45). Приложенное усилие достигает максимума и расходуется на разрушение связей, образовавшихся в период предварительного контактирования, и преодоление непосредственно самого трения покоя.

Переход из состояния покоя в равномерное прямолинейное движение сопровождается пластическими деформациями продукта и характеризуется статическим коэффициентом трения. При дальнейшем движении тележки необходимое для перемещения усилие уменьшается до 2,5 раза, оставаясь практически неизменным на всем остальном пути. В какой-то момент рамка останавливается, между продуктом и поверхностью образуются адгезионные связи. Движение тележки вызывает увеличение усилия, рамка скачком перемещается в следующее «оседлое» положение. Длительность цикла скачков составляет от 0,2 с при малых скоростях движения до 0,03 с и меньше — при наибольших. Адгезионное взаимодействие за время «оседлого» состояния небольшое из-за малой продолжительности контакта [164].

На рис. 66 приведены примеры расчета статических и динамических значений истинного коэффициента внешнего трения, которые определяют по уравнению (I—15). Отрезок, отсекаемый в отрицательной области

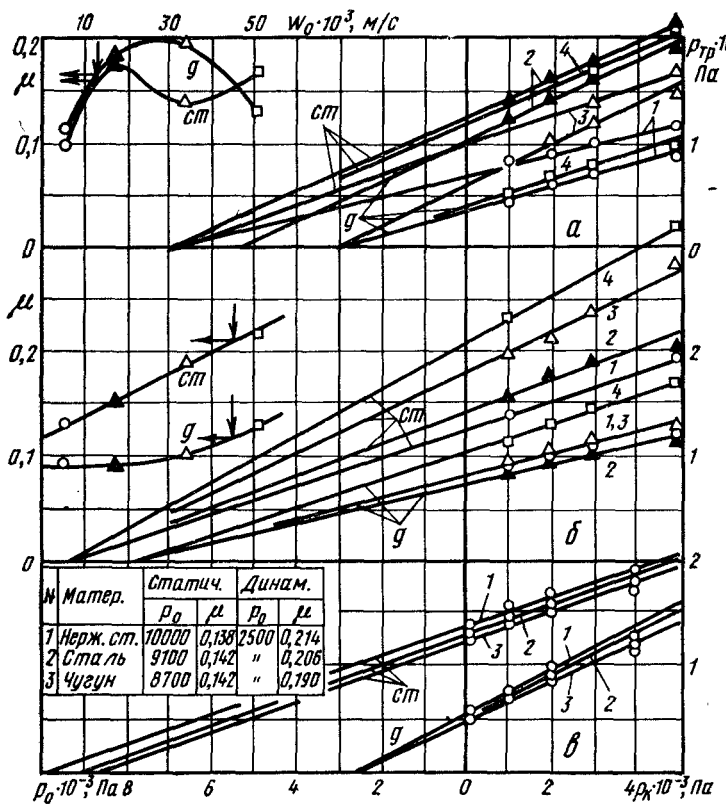


Рис. 66. Зависимость статических и динамических удельных усилий трения и истинных коэффициентов трения от давления контакта для говядины поперек волокон (а), говяжьего шрота (б) при различных скоростях смещения по нержавеющей стали (1—0,00547 м/с; 2—0,0171; 3—0,0342; 4—0,0513 м/с) и (в) фарша докторской колбасы при скольжении по различным материалам (1—нержавеющая сталь; 2—сталь Ст. 3; 3—чугун) со скоростью 0,0171 м/с.

значений давлений контакта p_k линией, проходящей через экспериментальные точки, дает величины липкости. В динамическом режиме истинные коэффициенты трения зависят от скорости смещения, материала пластин, но не от давления контакта; при этом липкость остается практически постоянной, что обусловлено весьма малыми

(доли секунд) продолжительностью контакта продукта с поверхностью. Для начала движения процесс усложняется. При различных давлениях контакта липкость должна бы быть также различной, но часто через экспериментальные точки $p_{тр}(p_k)$ в пределах ошибки эксперимента можно провести одну линию, т. е. для различных давлений контакта липкость остается постоянной.

Таблица 51

Материал пластины	Продукт	Расположение волокна	Скорость смещения, $\psi \cdot 10^3$, м/с	Эффективный коэффициент трения* при давлении контакта, Па				
				980	1960	2940	4900	980 по следу
По сухой поверхности								
Нержавеющая сталь	Говядина	Поперек	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
Нержавеющая сталь	Шпик	»	17,1	1,45	0,83	0,60	0,41	—
Чугун	»	»	17,1	1,62	0,90	0,66	0,51	—
				1,33	0,75	0,55	0,38	—
Сталь Ст. 3	»	»	17,1	1,49	0,82	0,61	0,46	—
				1,20	0,68	0,50	0,35	—
Фторопласт-4	»	»	17,1	1,44	0,80	0,59	0,45	—
				1,16	0,62	0,48	0,34	—
Нержавеющая сталь	»	По следу	17,1	1,40	0,78	0,57	0,43	—
				1,24	0,73	0,54	0,37	—
Сталь Ст. 3	»	»	17,1	0,94	0,50	0,34	0,235	—
				1,29	0,69	0,51	0,45	—
Фторопласт-4	»	»	17,1	0,92	0,48	0,32	0,23	—
				1,18	0,70	0,55	0,39	—
				0,90	0,47	0,32	0,22	—

По смоченной поверхности

Нержавеющая сталь	Говядина	Поперек	17,1	1,25	0,78	0,57	0,42	—
				0,97	0,57	0,42	0,33	—

* Для каждой скорости смещения или материала верхняя строчка — статическое значение эффективного коэффициента трения в момент начала сдвига, нижняя — динамическое значение для установившегося прямолинейного движения.

Если использовать величины липкости, найденные в специальных опытах, то статический истинный коэффициент трения с увеличением давления контакта сначала резко уменьшается, затем остается постоянным. Это создает определенные неудобства при расчете истинного коэффициента трения и делает полученные результаты малодостоверными. По нашему мнению, более целесообразно пользоваться эффективными коэффициентами внешнего трения [см. уравнение (I—156)].

Процесс внешнего трения мясopодуkтов соответствует схеме Б. В. Дерягина [63]. Однако использование двучленного закона трения связано с существенными трудностями. Они обусловлены тем, что необходимо знать «сдвиговую липкость», т. е. липкость, найденную

Таблица 5

Материал	Скорость смещения, $\text{ш} \cdot 10^3$, м/с	Эффективный коэффициент трения* при давлении контакта, Па			
		98	980	1960	3920
По сухой поверхности					
Нержавеющая сталь	17,1	14,10	1,59	0,85	0,4
		5,65	0,75	0,49	0,2
Сталь Ст. 3	17,1	13,25	1,48	0,80	0,4
		5,00	0,72	0,43	0,2
Латунь	17,1	14,20	1,54	0,83	0,4
		5,30	0,73	0,45	0,3
Чугун	17,1	12,90	1,46	0,77	0,4
		5,44	0,73	0,47	0,3
Фторопласт-4	17,1	11,75	1,25	0,68	0,3
		5,44	0,75	0,49	0,3
Полиэтилен	17,1	13,70	1,52	0,81	0,4
		8,70	0,95	0,52	0,3
Дюралюминий	17,1	14,40	1,56	0,84	0,4
		7,90	0,91	0,53	0,2
По смоченной поверхности					
Нержавеющая сталь	17,1	9,70	0,98	0,53	0,3
		4,20	0,62	0,40	0,2
Сталь Ст. 3	17,1	8,70	0,87	0,46	0,2
		4,50	0,65	0,40	0,2
Латунь	17,1	11,70	1,14	0,65	—
		5,10	0,75	0,46	0,2

* См. сноску к табл. 51.

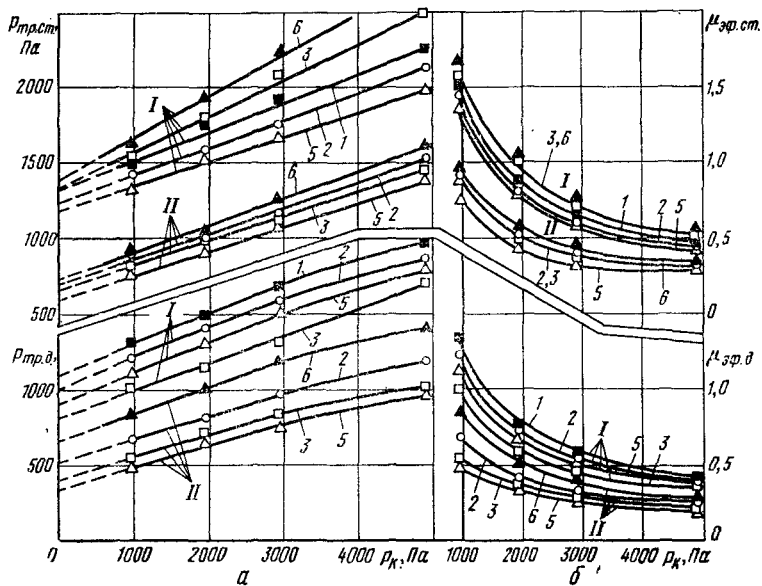


Рис. 67. Зависимость статических и динамических удельных усилий трения (а) и эффективных коэффициентов внешнего трения (б) от давления контакта для говядины (I) и свинины (II) по различным материалам:

1 — дюралюминий; 2 — нержавеющая сталь; 3 — сталь Ст. 3; 5 — латунь; 6 — фторопласт.

из опытов по трению. Кроме того, «нормальная липкость» и «сдвиговая липкость» не всегда совпадают, что неудобно для практических целей.

Рассмотрим изменение величин коэффициентов трения (табл. 51, 52) для различных мясопродуктов под воздействием различных факторов.

При увеличении давления контакта удельная сила трения возрастает (рис. 67), как правило, линейно до $P_k \approx 3000$ Па, отклоняясь затем вверх или вниз в зависимости от вида трения (статическое или динамическое) и трущейся пары. При этом эффективный коэффициент трения уменьшается, а статические и динамические его значения сближаются (см. рис. 67, табл. 51, 52). С ошибкой до $\pm 5\%$ кривые, характеризующие уменьшение коэффициента, аппроксимируются степенными зависимостями, величина показателя степени обычно нахо-

дится в пределах 0,8—0,5. Статистический коэффициент имеет больший показатель степени, что также указывает на сближение числовых значений коэффициентов при высоких давлениях контакта. Аналогичная картина наблюдается при движении продукта по поверхности смоченной водой. Для всех исследованных продуктов и пар трения эффективные коэффициенты трения имеют один порядок. Даже весьма высокие значения коэффициентов для фарша докторской колбасы (табл. 52) —

Т а б л и ц а 53

Температура, °С	Скорость смещения, $\omega_0 \cdot 10^3$, м/с	Эффективный коэффициент трения* при давлении контакта, Па			
		2350	4430	7950	11490
20	11	0,394	0,365	0,336	0,288
		0,269	0,253	0,234	0,226
80	11	0,272	0,262	0,239	0,184
		0,174	0,166	0,167	0,166
20	20	0,530	0,430	0,433	0,410
		0,327	0,316	0,307	0,296
80	20	0,349	0,318	0,310	0,276
		0,238	0,220	0,211	0,200
20	29	0,561	0,556	0,522	0,483
		0,383	0,370	0,360	0,340
80	29	0,349	0,350	0,306	0,300
		0,268	0,240	0,224	0,223
20	34	0,575	0,564	0,540	0,500
		0,389	0,379	0,361	0,354
80	34	0,403	0,365	0,336	0,330
		0,280	0,255	0,232	0,220

* См. сноску к табл. 51.

около 11—15 при малых давлениях контакта (100 Па) — хорошо укладываются в названную степенную зависимость. Измельченное на волчке мясо со средним размером частиц (около 3 мм) не составляет исключения

Материал поверхности влияет на удельную силу трения и эффективный коэффициент трения (см. рис. 67). Однако расположить материалы в определенной последовательности по сопутствующей им удельной силе трения, как это сделано при исследовании липкости, не удалось. При движении продукта по смоченной поверхности и по следу того же самого продукта различия в удельных силах трения для различных материалов пластин несущественны. Наименьшие отличия, особенно динамического коэффициента, наблюдаются для тонкоизмельченных видов фарша, например для фарша докторской колбасы: при движении по сухой поверхности трение может происходить по пленке фарша, при движении по смоченной — по пленке воды, каждая из которых играет роль смазки.

Анизотропия мышечных тканей сказывается на удельных усилиях трения и эффективном коэффициенте трения, которые при скольжении по поверхности поперек волокон всегда больше, чем при скольжении вдоль, различие составляет до 20%.

Оригинальный вид имеют зависимости эффективного коэффициента трения от скорости смещения, которые обычно имеют максимум при скорости около 0,017 м/с (рис. 68). Эта критическая скорость определяется условиями контакта и зависит от давления контакта. Для объяснения максимума на кривых трения целесообразно использовать термомеханическую гипотезу [168], которая применима для мясopодуков в следующей интерпретации. При малых скоростях реализуется внешнее трение, при критической скорости появляется ориентированный граничный слой и начинается выделение жидкости из продукта. При дальнейшем увеличении скорости вследствие повышения температуры на границе раздела фаз вязкость слоя и трение уменьшаются. А. С. Ахматов [6] для скоростных изменений коэффициента трения приводит графики, которые подобны аналогичным для мясopодуков.

Таким образом, полученные данные обобщены на рис. 66—68 и в сводных таблицах 51 и 52.

Е. П. Малыгина [104] исследовала эффективный коэффициент внешнего трения 60%-ного мыла (влажность 13,3%) по чугуну. Она установила, что статический коэффициент выше динамического, при увеличении дав-

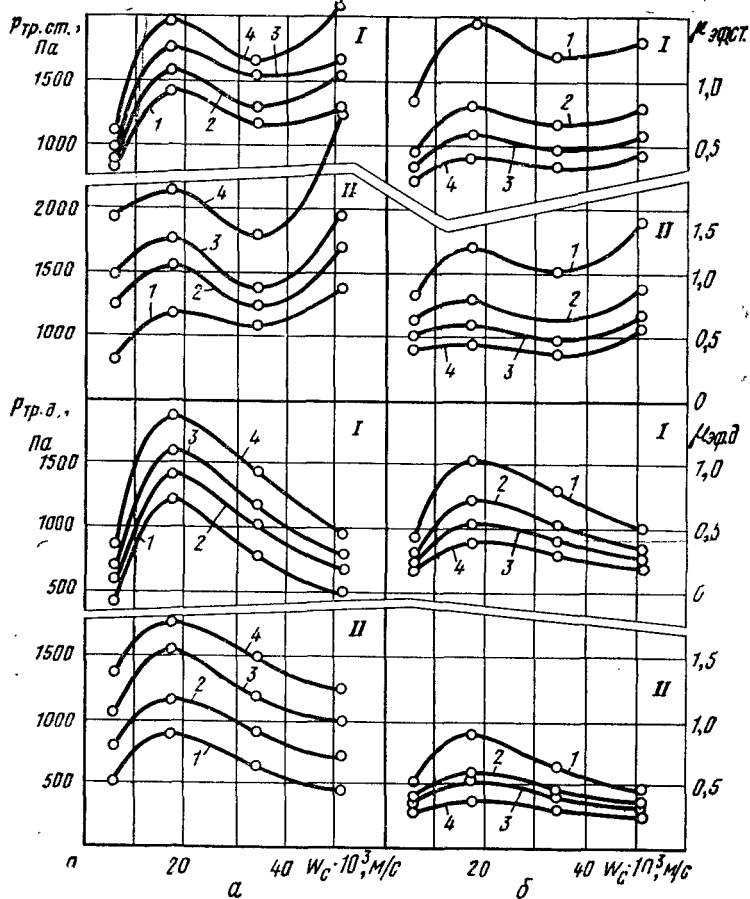


Рис. 68. Зависимость статических и динамических удельных усилий (а) и эффективных коэффициентов (б) трения от скорости скольжения говядины по нержавеющей стали (I) и полиэтилену (II) при различных давлениях контакта:

1 — 980 Па; 2 — 1960; 3 — 2940; 4 — 4900 Па.

ления контакта значения коэффициентов уменьшаются, а при увеличении скорости смещения увеличиваются (табл. 53). Результаты экспериментов показывают, что коэффициенты трения мыла по величине близки к коэффициентам трения мясopодуkтов и изменяются аналогично. Разница лишь в том, что на скоростных зависи-

мостях коэффициентов нет экстремума. С увеличением влажности мыла до 28,8% значения коэффициентов возрастают почти вдвое.

Эффективные коэффициенты внешнего и внутреннего трения и углы естественного откоса сухих животных кормов [178] приведены в табл. 54. Исследования выполнены на оригинальном приборе, который позволяет измерять характеристики, в частности давление контакта, в широком диапазоне. Основные эксперименты были выполнены при давлении контакта $600 \cdot 10^5$ Па и скорости смещения продукта по стали 0,07 м/с. Коэффициенты трения сухих кормов меняются так же, как коэффициенты трения мыла.

Для определения коэффициента внутреннего трения сыпучих продуктов предложено использовать конический пластометр [8]. Для такого типа измерений разработана теория и выполнены некоторые измерения. Коэффициент внутреннего трения костной муки с размером

Таблица 54

Продукт	Влажность, %	Насыпная масса, кг/м ³	Градусометрический состав, мм	Угол естественного откоса, град	Коэффициенты трения при температуре, °С			
					внешнего*		внутреннего	
					20	80	20	70
Мясо-костная мука								
I сорта	6,7	670	1,28	46	0,10 0,06	0,07 0,03	0,53	0,27
II сорта	6,2	718	1,53	44	0,12 0,07	0,08 0,03	0,47	0,33
III сорта	6,6	610	1,57	36	0,10 0,06	0,07 0,03	0,46	0,32
Мука								
мясная	7,5	622	1,77	51	0,08 0,04	0,07 0,02	0,44	0,20
костная	5,6	883	1,01	45	0,36 0,25	0,28 0,15	0,53	0,49
кератиновая	7,9	730	0,76	40	0,17 0,09	0,15 0,03	0,59	0,41
Альбумин	9,9	433	0,54	28	0,21 0,13	0,11 0,04	0,47	0,43

* См. сноску к табл. 51.

частиц $(0,25 \div 1,0) 10^{-3}$ м и влажностью 5% оказался равным 0,70, а угол естественного откоса $36^{\circ}30'$, причем он практически равен углу внутреннего трения: $\text{tg } 35^{\circ} = 0,7$. Эти данные существенно отличаются от результатов исследований, приведенных в табл. 54. По-видимому, для подобных измерений применение конического пластомера нуждается в дальнейшей проверке.

Угол естественного откоса (в радианах) и скорость высыпания сухих молочных смесей для детского питания [82] приведены в табл. 55.

Таблица 55

Продукт	Угол естественного откоса, радиан	Скорость высыпания, м/с
«Малютка»	0,78	0,204
«Малыш» с мукой	0,74	0,214
питание		
обезжиренный	1,10	0,095
белковый	0,79	0,201
жировой	1,20	—
противоанемичный	0,81	0,136

Примечания: 1. Угол естественного откоса определяли путем замера угла, который образует наклонная поверхность порошка при высыпании его из выходного отверстия воронки на горизонтальную поверхность прибора.

2. Сыпучесть сухих продуктов детского питания оценивали по скорости высыпания из отверстия стеклянной воронки.

3. Продолжительность высыпания порошка определяли секундомером, а скорость рассчитывали по уравнению расхода (II-63).

Описанные исследования по липкости и внешнему трению не являются исчерпывающими. Выше было показано, что эти характеристики зависят от условий изменения, в число которых входит около 8—9 факторов, и их комбинации. Кроме того, липкость и внешнее трение зависят от технологических параметров: влажности, гранулометрического состава, температуры и пр. Можно предположить, что выполненные работы являются только начальной стадией исследований, которые необходимо продолжать в теоретическом и экспериментальном аспектах.

ГЛАВА VI

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ НЕКОТОРЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАШИН

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Перемещение вязких и пластично-вязких пищевых масс в различных каналах и рабочих органах машин приобретает все большее значение в связи с механизацией и автоматизацией [108], а также созданием новых, высокопроизводительных машин, например высокочастотных для термообработки продукта в потоке при движении его по трубопроводу. Технологический процесс на предприятиях пищевой промышленности характеризуется операциями различной продолжительности. Увязку этих операций осуществляют транспортными средствами, которые должны способствовать сглаживанию различных ритмов отдельных операций. Требованиями практики обусловлено большое количество теоретических и эмпирических уравнений для расчета процессов движения в различных каналах. Многообразие мясных и молочных продуктов, которые транспортируются по трубопроводам и обрабатываются в различных машинах, показаны в табл. 56.

В настоящее время теория «жидкообразного» потока имеет практически законченную форму. Для расчетов течения «твердообразного» потока наряду с уравнением Букингама получены различные другие уравнения, основанные на моделях Максвелла, Кессона и пр. [159]. Теоретические разработки по движению пластично-вязких систем в рабочих органах машин менее универсальны, чем по движению ньютоновских жидкостей. Поэтому основное внимание уделено рассмотрению методов расчета каналов для перемещения пластично-вязких продуктов и устройств, служащих для этого, т. е. побудителей движения. Для расчета течения неньютоновской жидкости можно пользоваться таблицами и номограммами, полученными в результате опыта эксплуатации существующих устройств, эмпирическими формулами,

Таблица

Сырье и продукты	Напорные трубопроводы					Способ подачи	
	диаметр, мм	длина, м	температура, °С	скорость оптимальная, м/с.	тип насоса	передувочный бак	
Жидкости, эмульсии	До 80	До 100	15—30	0,7—1,0	Центробежный, вихревой, мембранный, шланговый	Перекачка сжатым воздухом или паром (давление до 6 ат) с водой или без воды	
кровь*	40—75	До 150	50—110	0,7—1,0			
расплавленный жир	40—75	До 100	40—95	0,7—1,0			
масло, бульон, жироводяные эмульсии	30—80	До 300	—20+20	1,0—1,5			
растол	25—80	До 10000	4—90	1,0—2,0			
молоко, обезжиренное молоко**	30—50	До 1000	45—90	1,0—2,0			
моющий раствор**	25—50	До 100	5—90	0,4—0,8			
сливки, сгущенное молоко	50—75	До 80	14—16	0,4—0,8			
кисломолочные продукты	50—150	30—100	40—90	0,8—1,2	Фекальный или роторный (с водой)		
Суспензии и кусковые продукты	75—100	До 100	20—40	0,8—1,2			
фуза, шквара	100—150	До 80	15—25	0,8—1,2			
шлям, фибрин	100—150	До 100	15—25	0,8—1,2			
мезда, каньга	100—150	До 100	15—25	0,8—1,2			
жиродержащее сырье, дробленые	150—200	До 50	15—25	0,8—1,2			
конфискаты недробленые	150	До 50	15—25	0,8—1,2			
конфискаты дробленые	80—120	До 15	8—15	0,2—0,4	Объемный роторный		
кость дробленая	50—80	До 25	8—15	0,3—0,6			
Пластично-вязкие	80—100	До 15	20—90	0,2—0,5			
мясной фарш	50—100	До 25	4—30	0,2—0,6			
колбасный фарш	50—100	До 25	4—10	0,3—0,8			
ливерный фарш	40—75	До 50	40—95	0,3—0,8			
творог, творожные массы	40—75	До 50					
сметана	40—75	До 50					
плавленый сыр***	40—75	До 50					

* Легко вспенивается, измерение расхода затруднительно.

** Имеется опыт перекачки на десятки километров, верхний предел температуры 130—140 °С.

*** По обогреваемым трубам. Материал напорных трубопроводов—нержавеющая сталь, стекло, металл. Приведенные величины даны ориентировочно как наиболее часто используемые.

найденными в результате специальных экспериментов, уравнениями, выведенными на основе различных гипотетических и теоретических предпосылок о закономерностях движения, и методами, основанными на установлении связей между дифференциальными и интегральными характеристиками потока.

Макроскопическая феноменологическая теория движения материальных сред основывается на общих закономерностях и гипотезах, полученных из экспериментов. Макроскопические теории являются эффективным средством решения практически важных задач, а полученные с их помощью данные согласуются с опытными [157]. При выводе уравнений этими методами основываются на гипотезах сплошности и неразрывности, в соответствии с которыми реальный продукт представляется в качестве сплошной неразрывной системы с непрерывным распределением различных полей: скоростей и деформаций, давлений и основных физических свойств. Эта идеализация позволяет в теоретических исследованиях использовать аппарат математического анализа, применимого к непрерывным функциям [157].

При выполнении реологических исследований необходимы экспериментальные стенды, которые позволят определить и варьировать в установленных пределах следующие величины.

1. Геометрические факторы: площадь и линейные размеры (длина l и диаметр d трубы, насадки, лопасти и пр.), относительная шероховатость и материал обтекаемого тела. Размеры установок при изучении течения пластично-вязких продуктов должны приближаться к производственным; использование подобных, но меньшего размера моделей может оказаться недопустимым, так как распределение скоростей по живому сечению потока и степень разрушения структуры будут подобны при небольших изменениях характерного линейного размера. Геометрические факторы определяют обычными линейными измерениями.

2. Кинематические факторы: средняя скорость (ω , м/с) движения потока в канале или скорость движения лопасти в продукте, распределение скоростей и деформаций по сечению продукта, объемный (V_c , м³/с), весовой (G_c , Н/с) или массовый (M_c , кг/с) секундные расходы. Скорость или расход определяют расходомерами

или объемно-весовым методом [75, 87] по уравнению расхода:

$$V_c = wF = w \frac{\pi d^2}{4};$$

$$G_c = \rho g V_c; \quad M_c = \rho V_c,$$

(VI—

где F — площадь живого сечения канала, м²;
 d — внутренний диаметр круглой трубы, м;
 ρ — плотность продукта, кг/м³;
 g — ускорение силы тяжести ($g=9.8$ м/с).

3. Динамические факторы: давление p (в Па) в начале канала (потери давления вдоль канала) или удельное усилие сопротивления. Они являются, как правило, независимыми переменными, и их определяют из опыта с помощью специальных датчиков. Для истинно вязкой жидкости потери давления пропорциональны расходу (скорости) в первой степени (ламинарный режим) и в степени 1,75 или 2,0 (турбулентный режим). При течении коагуляционно-тиксотропной структуры потери давления могут быть представлены пропорциональными скоростью в степени n , т. е. индексу течения, который для многих пищевых продуктов находится в пределах 0,1—0,3 (см. табл. 12, 13) и реже (для сред Кессона) достигает 0,5. Поэтому, если скорость или расход представить в виде функции от давления, как это делают в гидравлике, возможны существенные ошибки при вычислении расхода. К динамическим факторам относятся также реологические свойства, определяемые специальными приборами. Плотность, которая является существенной характеристикой в гидравлике, при течении многих мясных и молочных продуктов можно не учитывать в качестве самостоятельного показателя, если она изменится в пределах $\pm 5\%$ от среднего значения 1000 кг/м³.

4. Энергетические факторы: расход энергии или развиваемая мощность — по своей сущности аналогичны динамическим и определяются обычно самопишущими приборами по площади на диаграммной ленте.

ПРИБОРЫ, СТЕНДЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МАШИН

В реологических исследованиях одной из наиболее важных величин является давление. Его измерение в жидких средах не представляет трудности, так как

имеется множество серийно выпускаемых приборов [87]. Для измерения давления в пластично-вязких средах серийные приборы практически промышленность не выпускает, поэтому выбор той или иной конструкции датчика для каждого случая решается самостоятельно [45, 46].

Датчики широко используют на практике для измерения давления пластично-вязких продуктов: в вискозиметрах, в цилиндрах при объемном сжатии, в трубопроводах при течении по ним фарша и т. д. При автоматизации технологических процессов необходимы приборы для измерения давления пластично-вязких продуктов (мясного фарша, творожной массы, животных жиров и пр.). Основные требования, предъявляемые к ним, — легкость очистки, свободный доступ к чувствительному элементу, точность и воспроизводимость показаний, надежность в работе. Для лабораторных и промышленных исследований применяют специально разработанные приборы [33, 45, 77], которые в соответствии с существующей классификацией делят на жидкостные (гравитационные), механические и электрические. В современной технике наиболее распространены чрезвычайно разнообразные по конструкции механические и электрические датчики. Электрические приборы малогабаритны, позволяют измерять различные по величине давления и вакуум с автоматической записью измеряемой величины на электронных приборах.

На рис. 69 показаны некоторые схемы датчиков давления.

Механические приборы с буферной жидкостью и пружиной дают устойчивые показания в области от $0,2 \cdot 10^5$ до $50 \cdot 10^5$, тензометрический датчик — от $0,2 \cdot 10^5$ до $500 \cdot 10^5$ и потенциометрический — от $0,1 \cdot 10^5$ до $20 \cdot 10^5$ Па. Первый датчик (рис. 69, а) более удобен в статических режимах работы, так как при пульсации давления трудно визуально следить за показаниями стрелки; второй (рис. 69, б) хорошо зарекомендовал себя при измерении переменных давлений, поскольку инерционность поршня и трение в уплотнениях сглаживают пульсацию давления. Датчики электрические (рис. 69, в и г) используют в любых режимах работы; особую ценность представляет автоматическая запись показаний. Например, при испытании насосов удалось

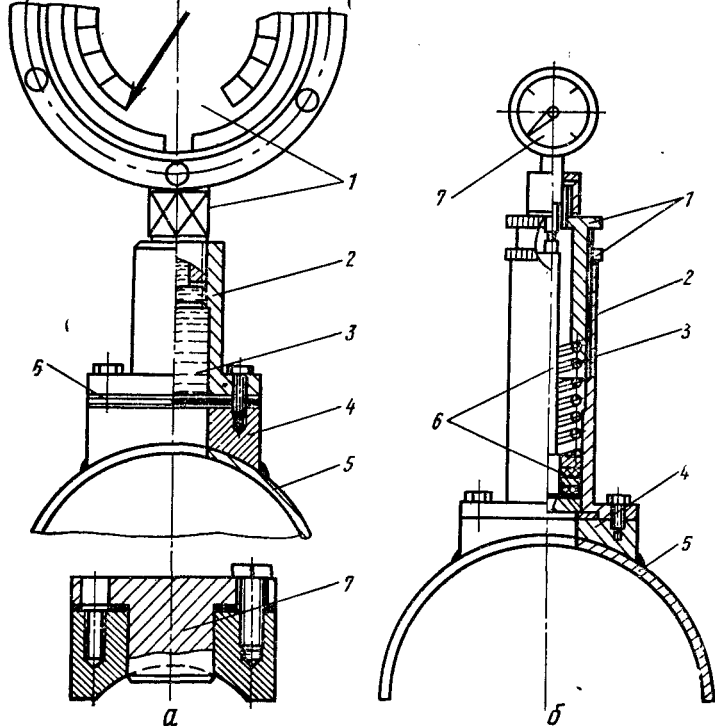
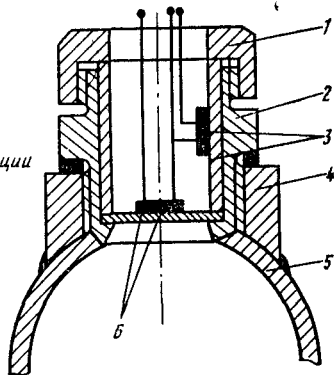
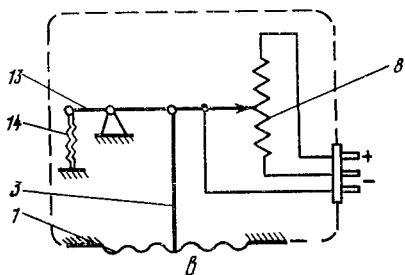
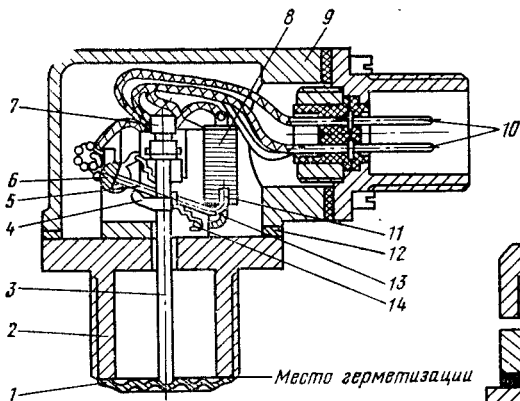


Рис. 69. Датчики давления пластично-вязких продуктов:

a — манометр с трубкой Бурдона и буферной жидкостью: 1 — манометр; мембрана; 7 — заглушка; *б* — прибор с пружиной и индикатором: 1 — устано
5 — корпус аппарата; 6 — поршень с кожаными уплотнениями и хвостовиком; давления: 1 — мембрана; 2 — корпус; 3 — шток; 4 — поперечина-поводок; 9 — крышка; 10 — разъемник для вывода электрического сигнала; 11 — щетка; жимная гайка; 2 — корпус; 3 — втулка с компенсационным тензодатчиком; тензодатчиком.

проследить пульсации давления, скорость распространения волны сжатия.

Устройство с буферной жидкостью (см. рис. 69, *a*) имеет манометр с трубкой Бурдона. Его штуцер рас-
сверлен до диаметра 10 мм и внутренняя полость залита глицерином. При установке манометра резиновая мем-
брана деформируется, а манометр показывает избы-
точное давление до $0,5 \cdot 10^5$ Па, которое вычитают из
дальнейших показаний, пользуясь тарировочными кри-
выми.



2 — корпус; 3 — глицерин; 4 — бобышка; 5 — корпус аппарата; 6 — резиновая вочная гайка и контргайка; 2 — корпус; 3 — сменная пружина; 4 — бобышка; 7 — индикатор или датчик перемещений; 8 — потенциометрический датчик; 5 — рычаг; 6 — ось; 7 — пластинчатая пружина; 8 — потенциометр (реохорд); 12 — прокладка; 13 — щеткодержатель; 14 — пружина; 2 — меддоза; 1 — при-
4 — бобышка; 5 — корпус аппарата; 6 — стальная сменная мембрана с рабочим

В устройствах второго типа (рис. 69, б) силовым элементом служит пружина, а регистрирующим — индикатор часового типа. Поршень под действием давления продукта сжимает сменную пружину, а его хвостовик перемещает головку индикатора часового типа, который с помощью конической разрезной втулки и гайки устанавливается неподвижно. Датчик тарируют на прессе для тарировки манометров; в него можно вставлять пружины различной жесткости, что позволяет измерять давление в широком диапазоне. Для непре-

рывной записи давлений вместо индикатора можно использовать, например, индукционный датчик перемещений.

В устройстве третьего типа (см. рис. 69, в) чувствительным элементом служит гофрированная мембрана, соединенная с корпусом методом диффузионной сварки. Шток, закрепленный в центре мембраны, передает ее деформацию на щетку, которая скользит по реохорду. Изменение сопротивления можно измерять осциллографом (без усилителя) или потенциометром. У этого датчика входной зоны к мембране, в противоположность предыдущим устройствам, нет. В лаборатории реологии МТИММПа используют также различные модификации этого датчика. В одной из конструкций, например, датчик сконструирован так, что он вставляется в специальное гнездо и прижимается сверху накидной гайкой подобно устройству, показанному на рис. 69, г. Эти датчики используют для измерения давления или перепада давлений на участке трубы или в рабочих органах. Непрерывная запись показаний на открытой для визуального наблюдения ленте значительно облегчает проведение экспериментов и их дальнейшую обработку.

В устройстве четвертого типа (см. рис. 69, г) силовым элементом является упругая стальная мембрана, регистрирующим — тензодатчик электрического сопротивления. Прогиб мембраны под действием давления продукта вызывает удлинение датчика и, следовательно, изменение его электрического сопротивления и силы тока в цепи, что записывается на фотоленте шлейфового осциллографа. Прибор состоит из корпуса с наружной резьбой для крепления на аппарате, сменной мембраны, прижимной втулки, компенсационного тензомера и гайки. Прибор тарируют на прессе. В зависимости от интервала измеряемого давления меняют толщину мембраны (δ , м), которую определяют из уравнения

$$\delta = 0,86R \sqrt{\frac{p}{\sigma}},$$

где p — максимальное давление продукта, Па;
 σ — допустимое напряжение, Па (около $1000 \cdot 10^5$ Па);
 R — радиус незащемленной части мембраны, м.

Датчик первого типа прост по конструкции и в эксплуатации, но требует частых смен резиновой мембраны.

Остальные датчики работают без разборки более продолжительное время, однако точность и воспроизводимость их показаний удовлетворительна в том случае, если пружина или мембрана работают в области напряжений до предела пропорциональности.

Датчики первого и второго типов не требуют дополнительной аппаратуры и могут быть установлены на любом аппарате, датчики третьего и четвертого типов работают в комплекте с осциллографической установкой при отсутствии вибраций в условиях нормальной влажности.

Стенд для реологических исследований должен позволять легко измерять геометрические, кинематические, динамические и энергетические факторы. Следовательно, он должен иметь набор сменных рабочих органов различного размера, побудитель движения с регулируемой подачей или регулируемым давлением. Скорость перемещения или частота вращения рабочего органа также должны легко изменяться. В качестве материала для тарировки, наладки стендов и предварительных испытаний целесообразно применять модельный продукт с заранее заданными реологическими свойствами.

Для измерения физических величин используют различные электрические самопишущие приборы (ваттметры, потенциометры, осциллографы и пр.). В качестве примера ниже дано описание ряда стендов, испытанных во многих отраслях пищевой промышленности.

Стенд для испытания трубопроводов должен иметь набор труб различного диаметра, причем для каждого диаметра следует обеспечить возможность получения различной длины, составляя отрезки труб по 1,5—2,5 м. Для установки датчиков давления удобно использовать короткие трубы (0,15—0,20 м) одинакового диаметра с основной трубой. Материал труб при транспортировке пластично-вязких продуктов, как правило, не влияет на сопротивление течению, так как к стенке прилипает тонкий слой мелкодисперсного вещества за счет высокой адгезии: шероховатость и адгезионная активность материала обезличиваются. Исследования на промышленных установках проводятся так же, как и на экспериментальных.

Для определения эпюр деформаций использовали открытые лотки при перемещении жидкообразной си-

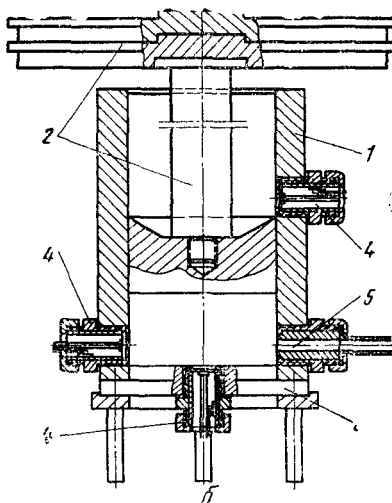
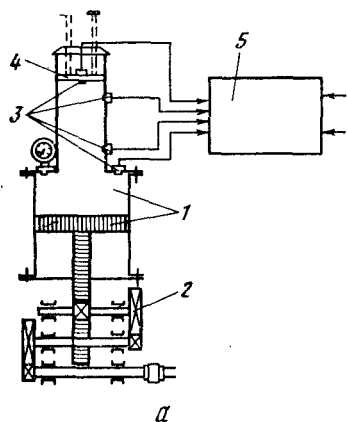
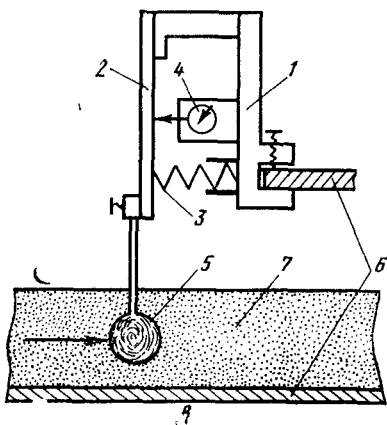


Рис. 76. Экспериментальный стенд для исследования
 а — заполнение дозаторов: 1 — цилиндр с поршнем; 2 — механический привод; 3 — датчик давления; 4 — дозатор с регулируемой по высоте крышкой; 5 — осциллографическая установка; б — истечение через отверстия и насадки: 1 — цилиндр; 2 — поршень с грузами; 3 — дно подставкой; 4 — мешдозы; 5 — сменные насадки и отверстия; б — obtыкивание лопасти; 1 — Г-образная ступина; 2 — упругая балка; 3 — демфирующая пружина; 4 — индикатор перемещений; 5 — сменная лопасть; б — крышка и чаша куттера; 7 — продукт.



стемы. Для твердообразных систем применяли разрезную по оси трубу, которую вставляли в точно пригнанную целую трубу [34]. Трубу устанавливали на стенд, заполняли продуктом, снимали, засыпали с торца угольный порошок, прокачивали продукт, который затем замораживали в трубе и разрезали по оси, срезы фотографировали. Хорошие результаты показал метод рентгеновского просвечивания [175]. Для этого полиэтиленовую трубу заполняли продуктом, снимали, в торец засыпали свинцовые опилки, устанавливали на стенд и

включали насос. Кинетику развития деформаций можно наблюдать визуально и фотографировать с помощью рентгеновской установки.

Стенд для исследования процесса объемного дозирования (рис. 70, а), который конструктивно оформляется, много проще весового и имеет высокую производительность, должен допускать изменение геометрических (форма сечения, размеры и объем), кинематических (скорость заполнения дозатора) и динамических (реологические свойства, давление) факторов [176]. Установка, на которой изучали процесс дозирования колбасного фарша, состояла из цилиндра диаметром 0,29 м, поршня с механическим приводом и набора дозаторов круглых, прямоугольных и квадратных сечений размером от 0,020 до 0,125 м при высоте формы от 0,005 до 0,1 м. Для изменения скорости нагнетания продукта меняли частоту вращения ротора электродвигателя. Для изучения кинетики развития деформаций несколько форм было выполнено разъемными по оси. В них нагнетали продукт из цилиндра, где он был уложен слоями: натуральный и подкрашенный, причем оба слоя имели одинаковые величины реологических свойств. Давление измеряли тензометрическими датчиками до входа в дозатор, на боковой поверхности и в центре верхней крышки дозатора.

Стенд для изучения процесса истечения (рис. 70, б) через отверстия и насадки [51] должен иметь побудитель движения, набор насадок и отверстий и датчики давления. В качестве побудителя движения хорошо зарекомендовал себя цилиндр с поршнем, который приводится в движение от грузов, электро- или гидропривода (см. рис. 70, б). Давление фарша на входе в трубку определяли с помощью манометра на тензодатчиках, установленного симметрично выходному отверстию на боковой поверхности цилиндра. Анализ осциллограмм показал в большинстве случаев постоянство давления при истечении продукта. В тех случаях, когда давление изменяется по мере истечения продукта из вытеснителя, определяется среднее его значение по площади осциллограммы. При диаметре цилиндра 0,05 и 0,10 м насадки могут иметь размеры: диаметры от 0,003 до 0,014 м, относительная длина (отношение длины к диаметру) от 0 до 75.

Наряду с цилиндрическими трубками малого диаметра в промышленных аппаратах встречаются конические расходящиеся (угол конусности $\alpha > 0$) и сходящиеся ($\alpha < 0$) насадки, которые также должны входить в комплект экспериментального стенда.

Стенд для исследования внешнего обтекания лопасти (рис. 70, в) представляет собой прибор [201] с неподвижной сменной лопастью и вращающейся вокруг вертикальной оси тороидальной (половина тора) чашей с исследуемым продуктом. При исследовании прибор крепили на крышку куттера вместимостью 220 и 80 л, когда ножи были сняты. Чаша куттера представляет собой полукорпус, вращающийся вокруг вертикальной оси. Различную скорость обтекания получали, перемещая прибор по радиусу чаши. В отличие от других устройств, где в основном использовали тензометрический метод измерения усилий, применяли упругую балку равного сопротивления и деформацию прогиба измеряли индикатором часового типа. Прибор тарировали в вертикальном положении с помощью грузов и блока.

Тарировку и наладку экспериментальных стендов в ряде случаев целесообразно проводить на модельном материале [34, 44]. Пищевые массы являются ценными и дорогостоящими продуктами; их свойства существенно меняются во времени; при интенсивном механическом воздействии, например мятии в насосе, может происходить необратимое изменение реологических свойств. Следовательно, использование натурального продукта для отладки и тарировки испытательных стендов, отработки методики экспериментов и получения первичных экспериментальных данных нецелесообразно. Учитывая это, можно рекомендовать доступный материал с неизменными во времени величинами свойств и такого строения, которое исключает необратимую его деструкцию при механическом воздействии и микробиологические изменения величин свойств во времени. Кроме того, к материалу необходимо предъявить и ряд других требований. Он должен иметь подобное изменение определяющих процесс параметров под воздействием аналогичных факторов при числовом их соответствии параметрам натурального продукта. Материал и продукт должны иметь одинаковый или похожий тип структуры и подобие эпюр скоростей и деформаций в

приборах при исследовании свойств, в рабочих органах стендов при их тарировке и наладке. В последнем случае основные критерии гидродинамического подобия должны быть численно равны. Наконец, материал должен хорошо воспроизводить в последовательных измерениях свои свойства, величину которых можно было бы заранее задать путем изменения компонентов в смеси.

В качестве такого материала, отвечающего практически всем перечисленным требованиям, можно применять пасту бентонитовой глины. Наряду с изменением ее влажности W (в кг воды на 1 кг смеси) в пасту добавляли буковые опилки (концентрация c_0 в долях единицы по массе, т. е. кг опилок на 1 кг смеси), размер которых от 0,5 до 1 мм.

Работами акад. П. А. Ребиндера и Н. Н. Серб-Серби-

Т а б л и ц а 57

Обозначение кривой на рис. 71	W	$X=W-0,58$	c_0	$B \cdot 100^m$	B	m	θ_0
	кг на 1 кг продукта				в системе единиц СИ		
01	0,624	0,044	0,00	193,37	3,53	0,870	697,0
02	0,644	0,064	0,00	109,40	2,00	0,870	390,8
03	0,646	0,066	0,00	103,25	1,88	0,870	368,0
04	0,678	0,098	0,00	40,82	0,75	0,870	146,0
05	0,703	0,123	0,00	19,77	0,36	0,870	70,6
06	0,710	0,130	0,00	16,14	0,29	0,870	57,5
07	0,755	0,175	0,00	4,38	0,08	0,870	15,6
21	0,645	0,065	0,02	100,88	2,34	0,837	334,0
22	0,678	0,098	0,02	37,75	0,86	0,820	119,2
23	0,680	0,100	0,02	35,51	0,82	0,819	112,5
41	0,648	0,068	0,04	87,37	2,19	0,801	266,0
42	0,651	0,071	0,04	79,70	2,02	0,798	240,0
43	0,677	0,097	0,04	35,98	1,03	0,772	102,0
44	0,681	0,101	0,04	31,84	0,93	0,767	89,2
61	0,652	0,072	0,06	73,00	2,20	0,760	212,0
62	0,657	0,077	0,06	62,37	1,95	0,753	169,0
63	0,660	0,080	0,06	56,88	1,80	0,748	152,0
64	0,676	0,096	0,06	34,36	1,22	0,724	89,0
65	0,678	0,098	0,06	32,27	1,17	0,721	81,0
80	0,620	0,040	0,08	193,00	5,10	0,789	569,0
81	0,638	0,058	0,08	108,14	3,40	0,752	294,0
82	0,674	0,094	0,08	34,06	1,49	0,679	78,5
83	0,676	0,096	0,08	31,82	1,42	0,675	72,0

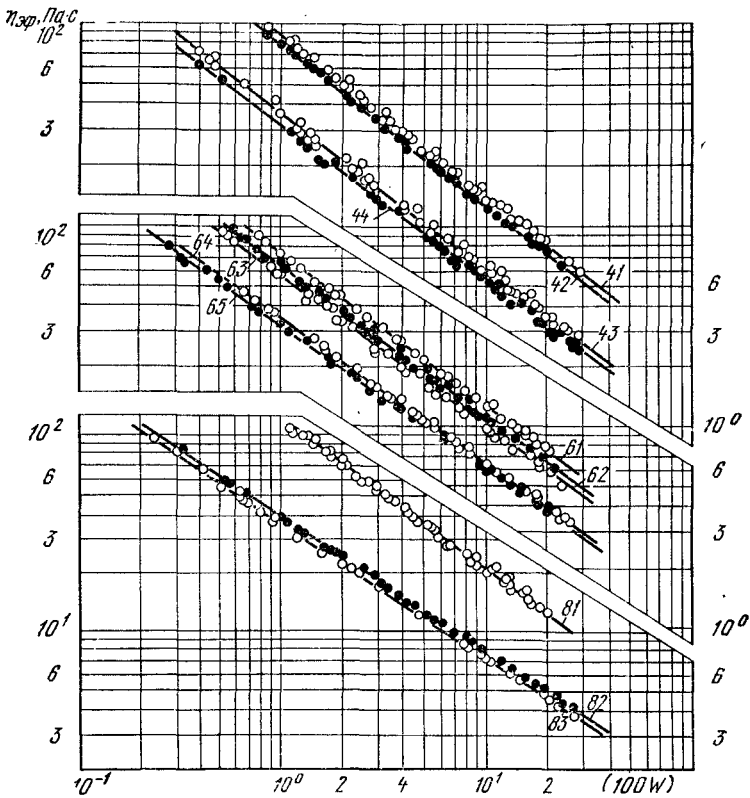
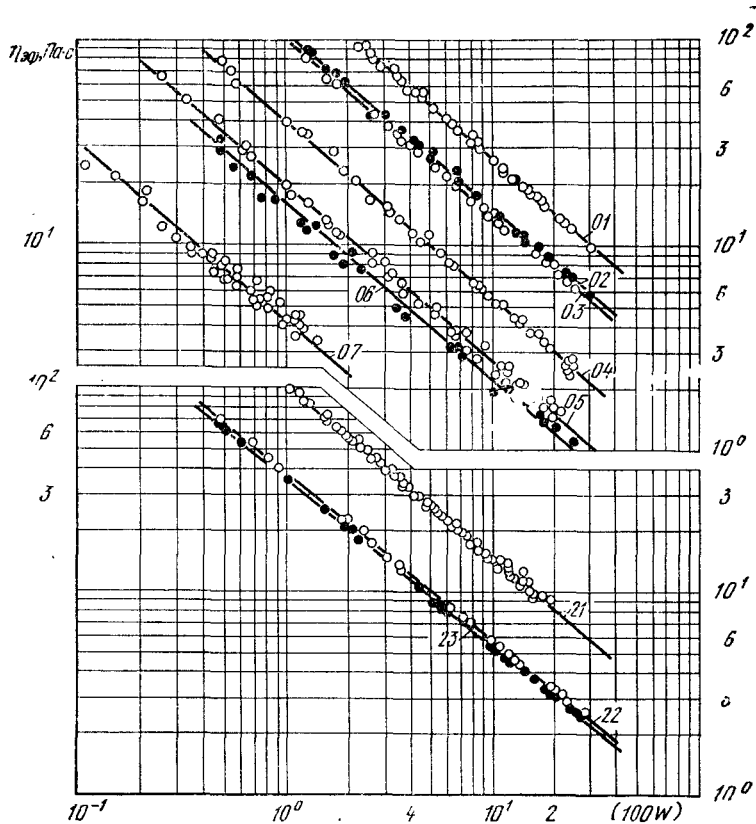


Рис. 71. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига для опилок; первая цифра на кривых обозначает содержание опилок

ной, Б. С. Филатова, С. Ю. Жуховицкого и др. установлена принадлежность глиняной пасты к тиксотропным коагуляционным структурам и найдены величины ее основных сдвиговых свойств. Однако для учета специфики изменения числовых значений свойств в связи с добавлением в пасту опилок, которые, набухая во времени, способствуют менее резкому уменьшению величин свойств при увеличении влажности, были проведены обширные реологические исследования [44]. Значения величин свойств пасты стабилизируются на третьи сутки после изготовления и в дальнейшем не меняются.



глиняной пасты с различной влажностью и содержанием буковых (%), вторая — порядковый номер по влажности (см. табл. 57).

Н. Н. Серб-Сербина установила время стабилизации значений свойств для пасты без опилок около суток.

Вискозиметрические исследования были выполнены на ротационном вискозиметре РВ-8. На рис. 71 представлены зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига. Меняя влажность и содержание опилок, можно получить систему с различными значениями реологических свойств. Кривизна реограмм, т. е. темп нарастания градиента скорости при увеличении напряжения сдвига, при постоянной влажности определяется содержанием опилок; с увеличением его кривые становятся

более пологими. Повышение влажности (табл. 57) вызывает существенное уменьшение реологических характеристик в основном за счет утолщения прослоек дисперсионной среды. Предельное напряжение сдвига обратно пропорционально c_0 ; коэффициент B в формуле (II—44) незначительно зависит от c_0 . Характер изменения этих величин при увеличении влажности подобен. Темп разрушения структуры для пасты без опилок не зависит от влажности, что также было показано для фарша; наклон линий на графике $\lg \eta_{эф} \ln \omega$ постоянен (см. рис. 71). Наличие опилок вызывает уменьшение темпа разрушения структуры при увеличении влажности, т. е. на графике линии перестают быть параллельными, что обусловлено набуханием опилок.

Графо-аналитическая обработка экспериментальных данных, полученных в результате реологических исследований глиняной пасты, позволила установить обобщенные зависимости для расчета предельного напряжения сдвига (Θ_0 , Па) и эффективной вязкости ($\eta_{эф}$, Па·с

$$\Theta_0 = 2500 \exp [-(29 + 100c_0) X];$$

$$\eta_{эф} = 700 \exp [-(29 + 40c_0) X] (100\omega)^{25.4c_0X - 0.87},$$

где c_0 — массовая концентрация опилок, кг опилок / 1 кг пасты;
 $X = W - 0,58$ — избыточная влажность, кг воды на 1 кг пасты;
 W — относительная влажность, кг воды на 1 кг пасты;
 $0,58$ — критическая влажность, соответствующая переходу системы из пластичного состояния в пластично-вязкое;
 ω — средняя скорость потока, м/с.

Относительная плотность пасты связана с влажностью соотношением

$$\rho_{отн} = 1 + 0,733 (1 - W).$$

Эти уравнения при известных значениях предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости продукта позволяют определить соотношение компонентов в глиняной пасте, при котором ее свойства будут численно соответствовать свойствам натурального продукта. Использование такой пасты для тарировки, наладки экспериментальных стендов и отработки методики проведения опытов (при подобии гидродинамических критериев) позволяет получить вид расчетного уравнения д

описания соответствующего процесса течения. Уточнение вида уравнения, определение постоянных, входящих в него, производят после исследований с использованием натурального продукта.

Однако поиски в разработке модельного реологического материала должны продолжаться, поскольку глиняная паста как модельный материал наряду с рядом достоинств имеет недостаток: величины свойств значительно изменяются при изменении влажности (добавление опилок снижает этот эффект). В связи с этим при длительном хранении глиняная паста должна находиться в герметичных сосудах, и в каждой серии экспериментов должна быть определена ее влажность. В ряде стран разработаны модельные материалы, реологические свойства которых менее чувствительны к изменению влажности.

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНО-ВЯЗКИХ ПРОДУКТОВ

В теории капиллярной вискозиметрии получено уравнение движения любых сред в общем виде:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \dot{\epsilon}(\theta) d\theta, \quad (\text{VI—2})$$

где V_c — объемный расход, м³/с;
 R — внутренний радиус трубы, м;
 θ_c — напряжение сдвига на стенке трубы, Па;
 θ — напряжение сдвига в любом слое на расстоянии r от оси трубы, Па;
 $\dot{\epsilon}(\theta)$ — функция градиента скорости от напряжения сдвига, с⁻¹.

Градиент скорости по живому сечению потока определяется эпюрой скоростей $u(r)$. Если эпюру скоростей удастся описать математической зависимостью, то интегрирование уравнения (VI—2) обычно не представляет затруднений. Для установления вида функций $\dot{\epsilon}(\theta)$ и $u(r)$ используют данные вискозиметрии, описав поведение продукта той или иной математической моделью, или исследуют режим движения, применяя дифференциальный метод исследования. Вискозиметрические способы достаточно подробно описаны в I и II главах,

поэтому здесь рассмотрим лишь метод экспериментального установления режимов движения.

Характер распределения скоростей и деформаций по поперечному сечению потока наряду с величинами реологических свойств и типом структуры обуславливает выбор расчетной формулы для определения потерь давления [см. уравнение (VI—2)]. Традиционно, со времени опубликования уравнения Букингама, исследователи пытались представить течение пластично-вязкого тела в виде структурного режима, при котором центральная часть потока (ядро) движется как твердый стержень с максимальной скоростью, испытывая незначительные деформации. Наибольшие деформации в ядре возникают в момент начала движения.

В следующем цилиндрическом слое, промежуточном слое скорость уменьшается несколько быстрее, чем в ядре, в пристенном слое скорость достигает нулевого значения, т. е. тончайший слой продукта прилипает к стенке трубы вследствие высокой адгезии. Такой механизм движения может вызывать перемещение к стенке мельчайших частиц третьей фазы, особенно заметное, если они обладают пониженной когезионной способностью к двум другим фазам и повышенной адгезионной способностью к материалу стенки трубы. И. М. Белкин, Г. В. Виноградов и А. И. Леонов [13] аналогичным образом объясняют перемещение частиц к поверхности, учитывая при этом и эффект Вайссенберга, довольно часто проявляющийся в упругопластичных системах. Структурный режим может быть осложнен проскальзыванием продукта относительно стенки, что наблюдается у пластичных высококонцентрированных грубодисперсных систем, например при движении обезжиренного творога или измельченного мяса со средним размером частиц 0,003 м и более, если содержание жировых частиц очень мало.

Значительно расширяет представление о режимах течения рассмотрение модели движения «степенной жидкости». На рис. 72 построены эпюры скоростей [154, 159] для круглой трубы при различном индексе течения жидкости:

$$\frac{u}{w} = \frac{1 + 3n}{1 + n} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (\text{VI—3})$$

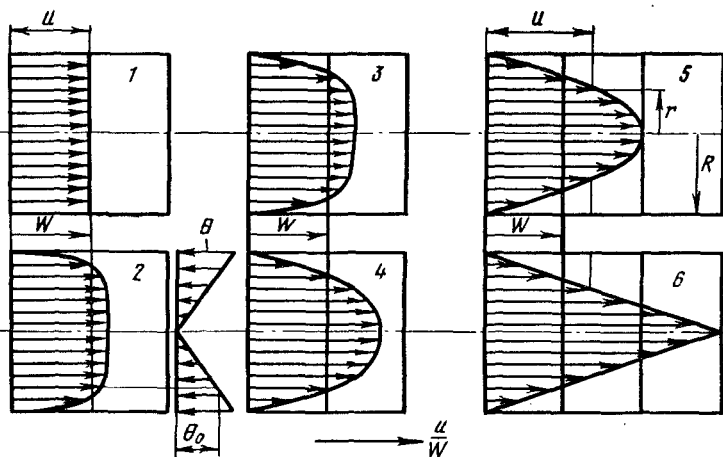


Рис. 72. Эпюры относительных скоростей при течении по круглой трубе «степенной жидкости», имеющей различный индекс течения n :

1 — 0; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,5; 5 — 1,0; 6 — ∞ ; w — средняя скорость по объемному расходу; u — локальная скорость элементарного слоя; θ — напряжение сдвига; θ_0 — предельное напряжение сдвига.

где u — локальная скорость, т.е. скорость элементарного слоя, расположенного на расстоянии r от оси трубы, м/с;
 w — средняя скорость потока по уравнению (VI-1), м/с;
 R — внутренний радиус трубы, м;
 n — индексу течения по уравнениям (I-38), (II-68).

Абсолютные значения локальной и средней скоростей при отсутствии проскальзывания вычисляют по выражениям [62, 159]:

$$u = \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \frac{R \dot{\epsilon}_1 n}{1+n} \left[\frac{R}{2 \dot{\epsilon}_1 B_0^*} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (\text{VI-4})$$

$$w = \frac{R \dot{\epsilon}_1 n}{1+3n} \left[\frac{R}{2 \dot{\epsilon}_1 B_0^*} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (\text{VI-4a})$$

где $\frac{\partial p}{\partial l}$ — градиент давления по длине трубы, Па/м;

B_0^* — эффективная вязкость при градиенте скорости $\dot{\epsilon}_1 = 1 \text{ с}^{-1}$, Па·с.

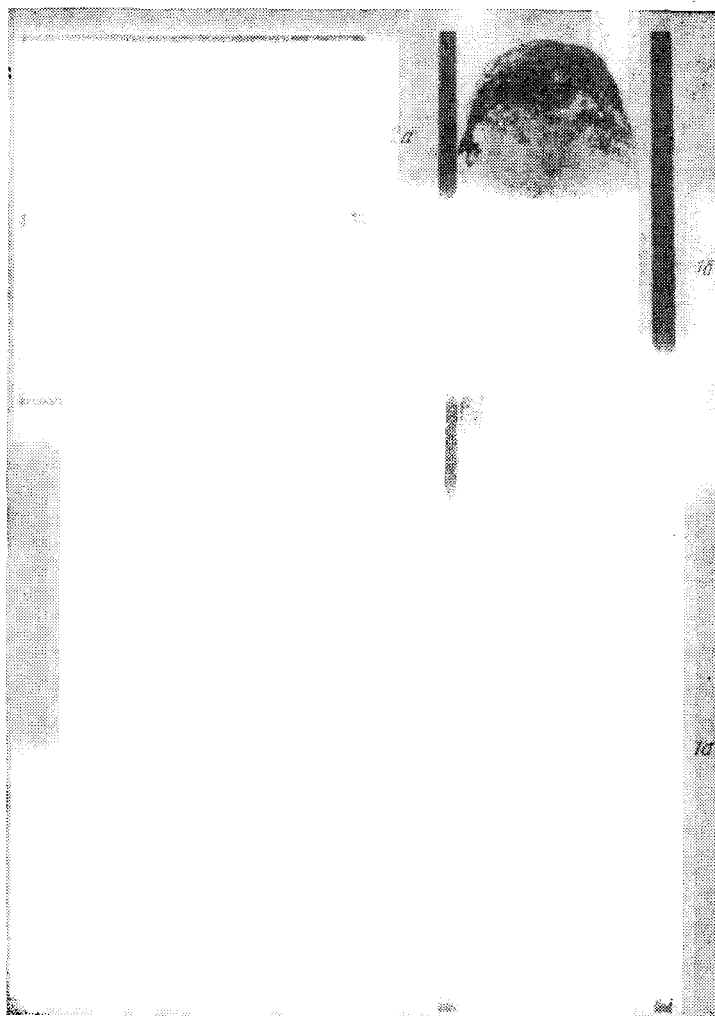


Рис. 73. Опытные эпюры распределения деформаций мясного фарша по поперечному сечению потока при диаметрах трубы: 1 — 0,0515 м; 2 — 0,0452; 3 — 0,0248; 4 — 0,0144 м; расстояние от входа в трубу; а — 0,25; б — 0,50; в — 0,75 м.

Градиент скорости следует рассчитывать по формуле, которая в наибольшей мере соответствует экспериментам и по которой определяют эффективную вязкость.

Для всех эпюр характерно то, что объем заштрихованного тела вращения равен объемному секунднему расходу, т. е.

$$V_0 = \pi R^2 w.$$

На рис. 73 приведены опытные эпюры деформаций фарша при движении его по трубам различного диаметра, полученные способом рентгеновского просвечивания [175]. Индекс течения фарша лежит в пределах 0,2—0,3, поэтому эпюры деформаций, особенно для трубы большого диаметра, хорошо согласуются с эпюрами скоростей (см. рис. 72). На основании рассмотрения рентгенограмм была дана следующая общая картина распределения скоростей: во всех случаях к стенке прилипает слой малой толщины тонкодисперсного вещества, состоящий из мельчайших частичек фарша, жира и пр.; затем движется промежуточный слой и, наконец, ядро потока в виде твердого стержня, имея, однако, небольшие деформации. Режим движения фарша определен как структурно-скользящий при условии, что относительно стенки проскальзывает не тонкодисперсная пленка, а более крупные частички мяса, соединительной ткани и пр.

Исследования характера распределения скоростей в ротационном вискозиметре РВ-4 с широким зазором также показали наличие трех слоев: малодеформируемого слоя у стенки наружного цилиндра, промежуточного и тонкого градиентного слоя у внутреннего цилиндра. Наблюдаемая аналогия распределения скоростей и теоретические соображения о движении «степенной жидкости» в трубе и вискозиметре создали предпосылки для использования данных вискозиметрических исследований в расчете трубопровода.

На рис. 74 показаны опытные эпюры распределения деформаций при движении особой сырково-творожной массы по металлической трубе, разрезанной по оси [76]. Сравнение рис. 74 с предыдущими показывает, что эпюры деформаций сырково-творожной массы подобны эпюрам фарша. Однако этот метод, несмотря на кажущуюся простоту, более трудоемок и продолжителен по

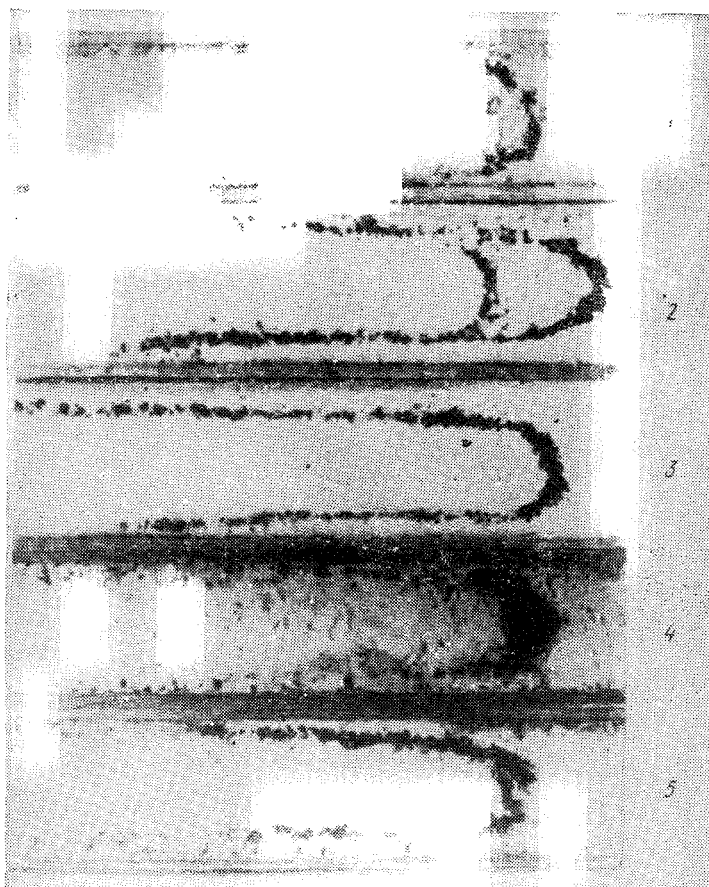


Рис. 74. Опытные эпюры распределения деформаций особой твёрдой смоляно-сырковой массы при диаметре трубы 0,0315 м на расстоянии от входа в трубу:
1 — 0,1 м; 2 — 0,6; 3 — 1,2; 4 — 0,1; 5 — 1,2 м

равнению с рентгеновским просвечиванием. При разрезании по оси трубы даже замороженного продукта возможно нарушение слоя угольного порошка. Оба описанных экспериментальных метода требуют тщательности выполнения подготовительно-заключительных работ, слой свинцовых опилок или угольного порошка не должен быть больше 1—4 мм. При большой толщине слоя (20—30 мм) порошок движется подобно пробке, деформации продукта уплотняют этот слой неравномерно по радиусу. Обычно неудачные, испорченные эпюры составляют 70—80% от количества всех выполненных опытов.

Таким образом, экспериментальные эпюры деформаций и результаты вискозиметрических исследований позволяют отнести колбасный фарш и сырково-творожную массу к «степенным жидкостям» и использовать для расчета их течения соответствующие уравнения.

Для жидкостей, которые не подчиняются степенному закону, уравнение (VI—3) можно заменить более общим [154, 191]:

$$\frac{u}{u_{\max}} = 1 - a_1 \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} + a_2 \left(\frac{r}{R} \right)^{2m},$$

где u_{\max} — максимальная локальная скорость на оси трубы;
 a_1, a_2, m — эмпирические коэффициенты, причем последний — целое число больше двух; при $a_2=0$ и $a_1=1$ уравнение по форме записи подобно (VI—3).

Давление на выходе из побудителя движения $p_{\text{общ}}$ (в Па) в общем случае складывается из следующих составляющих:

$$p_{\text{общ}} = \pm \rho gh + p + p_m + p_{\text{ин}} + p_{\text{п}} + p_k + p_{\text{об}}, \quad (\text{VI—5})$$

где ρ — объемная масса перекачиваемого продукта, кг/м³;
 h — высота нагнетания продукта, м (положительная величина — подача вверх, отрицательная — вниз).

Первый член в уравнении (VI—5) обычно учитывают при перемещении ньютоновских и слабоструктурированных жидкостей. При движении пластично-вязких тел следствие распорных усилий геометрический напор может проявляться лишь частично. Тем не менее при движении продукта вверх его следует, по-видимому, учитывать полностью.

Для расчета второго члена — потерь давления по длине трубы (p) при движении различных продуктов

предложено множество уравнений. Одни из них сложны по своей структуре и не решаются относительно потерь давления, а позволяют определить расход продукта, другие содержат 5 и более реологических констант или эмпирических коэффициентов. Каждая константа или коэффициент определены с ошибкой $\pm 5\%$ а обычно до $\pm 10\%$, отсюда становится очевидным бесплодность использования таких уравнений для расчета процессов движения. Поэтому ниже рассмотрены проверенные для расчета течения мясных и молочных продуктов уравнения, а также в качестве примера приведены некоторые другие зависимости.

Третий член — потери давления в местных сопротивлениях (p_m) — можно вычислить сравнительно точно для течения ньютоновских и слабоструктурированных жидкостей, для пластично-вязких систем мясной и молочной промышленности методы расчета местных сопротивлений отсутствуют.

Четвертый член — инерционные потери давления ($p_{ин}$), обусловленные неравномерностью движения, т. е. возникающие при неустановившемся режиме движения, что, например, наблюдается при подаче продукта поршневыми или кулачковыми насосами. Для ньютоновских жидкостей инерционный напор вычисляют по аналитическим уравнениям.

Пятый член уравнения ($p_{п}$) показывает величину противодействия, если продукт подается в какой-либо технологический аппарат. Например, фарш по трубопроводу поступает в формующую полость котлетного автомата, через которую проходят объемные дозаторы; давление, необходимое для заполнения форм дозаторов будет соответствовать величине противодействия.

Шестой член уравнения (p_k) показывает величину давления, необходимую для создания кинетической энергии потока. В простейшем случае — это потери давления со струей выходящего из трубы продукта. Этот член может иметь существенную величину при высокой скорости истечения (несколько метров в секунду).

Седьмой член ($p_{об}$) учитывает потери давления, возникающие за счет объемного сжатия продукта. Ньютоновские жидкости практически несжимаемы, поэтому при течении их эти потери не учитывают.

Уравнение (VI—5) при необходимости может содер

жать и дополнительные члены. Основной, главнейшей величиной будут потери давления по длине трубы (второй член). При течении жидкообразных систем, даже обладающих небольшой аномалией, действуют основные гидравлические зависимости (формулы Блазиуса, Никурадзе, Альтшуля и пр.). К таким системам можно отнести расплавленный животный жир, растительные масла, мясо-костные бульоны, молоко, осветленные соки и пр. (см. табл. 56). Учитывая сказанное, в этом разделе основное внимание уделено определению потерь давления по длине трубы при течении по ней пластично-вязких пищевых продуктов.

Потери давления (p , Па) при течении многих мясных и молочных продуктов по трубам можно выразить посредством эмпирической зависимости [34]:

$$\frac{p}{l/d} = A\omega^n, \quad (\text{VI—6})$$

или

$$\frac{p}{l/d} = A\omega_*^n,$$

где $\frac{p}{l/d}$ — величина, пропорциональная напряжению на стенке

трубы, которое равно $\theta_c = \frac{p}{4l/d}$;

l, d — длина и внутренний диаметр трубы соответственно, м;

ω — средняя скорость потока, м/с;

$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_1}$ — относительная скорость, численно равная скорости, выраженной в м/с;

ω_1 — скорость, равная единице ее измерения, т. е. 1 м/с;

A — эмпирический коэффициент, равный учетверенному напряжению на стенке трубы при $\omega=1$; зависит от диаметра трубы и реологических характеристик продукта; его числовое значение в двух формулах одинаково;

n — индекс течения.

Для производственных композиций ряда мясных и молочных продуктов [34] эмпирические коэффициенты приведены в табл. 58. Эмпирическое уравнение (VI—6), простое по структуре, удобно для практических расчетов, но применимо только для исследованных диапазонов диаметров (от 0,03 до 0,08 м) и скоростей (от 0,01 до 1,60 м/с). Коэффициенты, входящие в уравнение (VI—6), необходимо определять для каждого вида перекачиваемого продукта.

По мнению ряда авторов [159], уравнение вид (VI—6) представленное в consistentных переменных применимо ко всем аномально-вязким системам, в том числе и не подчиняющимся степенному закону.

Consistentные переменные [159, 209] нашли широкое применение для обобщения экспериментальных данных при течении «степенных жидкостей» по трубам, капиллярам вискозиметров и пр. Подробно теоретические вопросы течения «степенной жидкости» рассмотрены в главе II [см. уравнения (II—58), (II—71)]. Специфика их применения к расчету трубопроводов заключается в том, что они решены относительно потерь давления, а не относительно вязкости:

$$\frac{pd}{4l} = B_0^* \cdot \epsilon_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8\omega}{\epsilon_1 d} \right)^n, \quad (\text{VI—6})$$

или

$$\frac{pd}{4l} = A_1 \left(\frac{8\omega}{\epsilon_1 d} \right)^n. \quad (\text{VI—7})$$

Таблица 58

Продукт (сырой фарш)	Коэффициенты для расчета трубопроводов			
	определенные экспериментально		вычисленные по уравнению (VI—12 а)	
	к уравнению (VI—6)			
	A*	n	A**	n
Говядина, куттерованная с водой	10200	0,24	9800	0,24
Свинина полужирная, куттерованная с водой	9800	0,25	9750	0,25
Колбаса				
любительская	10200	0,19	8600	0,19
докторская	6300	0,22	7400	0,22
чайная	6000	0,19	6000	0,19
ливерная (30 °С)	12000	0,18	10300	0,18
то же (60 °С)	5000	0,18	5200	0,18
Сосиски свиные	5100	0,21	5000	0,21
Котлеты	5800	0,21	6000	0,21

Продукт (сырой фарш)	Коэффициенты для расчета трубопроводов		Коэффициенты для расчета насадок к уравнению (VI-6)	
	к уравнению (VI-7а)			
	A_1	n	A	n
Говядина, куттерованная с водой	600	0,27	16000	0,27
Свинина полужирная, куттерованная с водой				
Колбаса	—	—	15500	0,28
любительская	700	0,21	13000	0,21
докторская	470	0,25	11000	0,25
чайная	490	0,21	9100	0,21
ливерная (30 °С)	890	0,20	—	—
то же (60 °С)	445	0,20	—	—
Сосиски свиные	375	0,23	8000	0,23
Котлеты	410	0,24	9100	0,24

* Коэффициенты, осредненные по опытным данным для нескольких диаметров труб, отличаются от опытных в пределах $\pm 15\%$.

** Коэффициенты вычислены для диаметра трубы 0,04 м по единичной вязкости B_0 , когда градиент скорости определен по формуле Маргулиса (III-30).

Экспериментально коэффициенты A_1 и n определяют по графику

$$\lg\left(\frac{pd}{4l}\right) = \lg A_1 + n \lg\left(\frac{8w}{\epsilon_1 d}\right), \quad (\text{VI-76})$$

на который наносят точки, полученные из опыта.

Для расчета коэффициента A_1 на основании данных ротационной (или капиллярной) вискозиметрии используют зависимость

$$A_1 = B_0^* \epsilon_1 \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n = \frac{B_0^* \epsilon_1}{f_4(n)}, \quad (\text{VI-7в})$$

где

$$f_4(n) = \left(\frac{4n}{3n+1}\right)^n \text{ — функция индекса течения (см. рис. 13, а).}$$

Значения коэффициента A_1 для различных продуктов приведены в табл. 58. На рис. 75 показаны кривые течения различных продуктов в консистентных переменных по уравнению (VI—7а).

Обобщение экспериментальных данных по течению «степенной жидкости» в круглой трубе приводит к зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления и обобщенного критерия Рейнольдса. Из уравнения степенного закона в консистентных переменных (VI—7) путем несложных преобразований можно получить уравнение Дарси-Вейсбаха. Для этого в уравнение (VI—7) следует ввести замену:

$$B_0^* \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n = B_{01}^*, \quad (\text{VI—7e})$$

тогда уравнение (VI—7) будет иметь следующий вид

$$\frac{pd}{4l} = B_{01}^* \dot{\epsilon}_1^{1-n} \left(\frac{8w}{d} \right)^n.$$

В этом уравнении числовое значение B_{01}^* , имеющее размерность вязкости, равно числовому значению A_1 уравнений (VI—7а), (VI—7в), которое имеет размерность напряжения.

Традиционный прием позволяет получить уравнение Дарси-Вейсбаха:

$$p = \frac{4 \cdot 2 \cdot 8}{d^n \omega^{2-n} \rho} \cdot \frac{l}{d} \rho \frac{\omega^2}{2} = \lambda' \frac{l}{d} \rho \frac{\omega^2}{2}, \quad (\text{VI—8})$$

$$\frac{1}{B_{01}^* 8^{n-1} \dot{\epsilon}_1^{1-n}}$$

где $\lambda' = 64/\text{Re}'$ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Обобщенный критерий Рейнольдса, исходя из последней зависимости, будет иметь вид

$$\text{Re}' = \frac{d^n \omega^{2-n} \rho}{B_{01}^* 8^{n-1} \dot{\epsilon}_1^{1-n}}. \quad (\text{VI—9})$$

Для ньютоновской жидкости ($n=1$) Re превращается в обычный критерий Рейнольдса.

По предложению Р. Вельтман, в общем случае критерий Рейнольдса можно представить в виде

$$\text{Re} = \frac{\omega \rho}{\text{«вязкость»}}, \quad (\text{VI—10})$$

где «вязкость» для истинно вязких жидкостей — ньюто

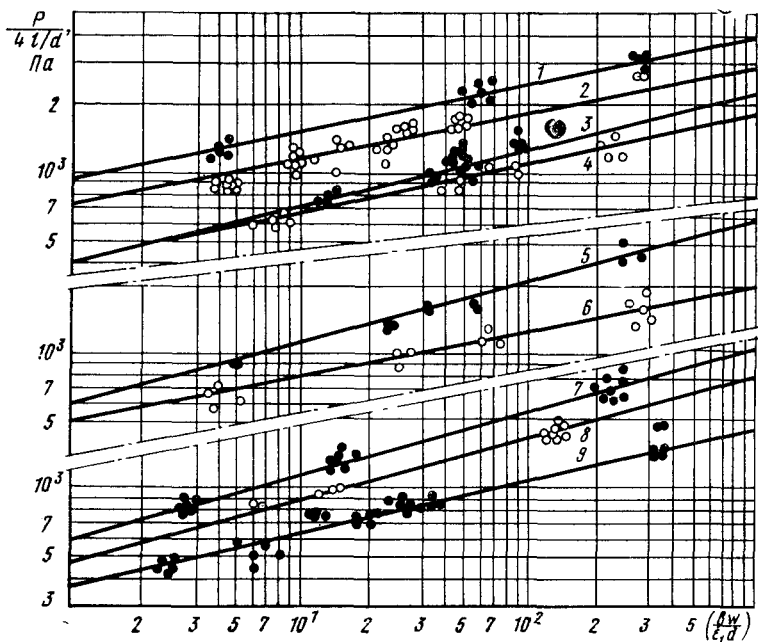


Рис. 75. Зависимость напряжений сдвига на стенке трубы от среднего градиента скорости для различных продуктов:

1 — фарш ливерной колбасы при 30° С; 2 — фарш любительской колбасы; 3 — котлетный фарш; 4 — фарш ливерной колбасы при 60° С; 5 — свииния полужирная куттерованная с водой; 6 — фарш чайной колбасы; 7 — говядина куттерованная с водой; 8 — фарш докторской колбасы; 9 — фарш сосисок свиных.

новская вязкость; для пластиков, следующих уравнению Бингама, — пластическая вязкость, для псевдопластичных и дилатентных систем — эффективная (кажущаяся) вязкость, измеренная в условиях преобладающих скоростей потока.

Уравнение течения степенной жидкости [62] при отсутствии проскальзывания продукта вдоль стенки

$$V_c = \frac{\pi d^3}{4} \left\{ \frac{nd\dot{\epsilon}_1}{2(3n+1)} \left[\frac{d}{4B_0^* \epsilon_1} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \right]^{1/n} \right\} \quad (\text{VI-11})$$

представляет собой зависимость, которая обобщает уравнения (VI-6) и (VI-7), если давление по длине трубы уменьшается линейно, как это экспериментально

показано для колбасного фарша [33]. Переход от объемного расхода к среднеобъемной скорости осуществляется по уравнению расхода (VI—1).

После несложных преобразований уравнения (VI—11) получим

$$\frac{p}{l/d} = 4B_0^* \varepsilon_1 \left[\frac{2(3n+1)}{\varepsilon_1 n d} \right]^n \omega^n, \quad (\text{VI—12})$$

т. е. уравнение вида (VI—6), в котором

$$A = 4B_0^* \varepsilon_1 \left[\frac{2(3n+1)}{\varepsilon_1 n d} \right]^n. \quad (\text{VI—12a})$$

Сопоставление теоретических значений коэффициентов A , n по уравнению (VI—12a) и эмпирических дано в табл. 58 для некоторых видов фарша. Из табл. 58 видно, что теоретическое уравнение довольно хорошо соответствует экспериментальным данным.

При наличии проскальзывания член в фигурных скобках уравнения (VI—11) рекомендуется дополнять слагаемым

$$k \frac{d}{4} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) = \frac{\omega_{\text{ск}} d}{4\theta_c} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right), \quad (\text{VI—12б})$$

где $\omega_{\text{ск}}$ — скорость проскальзывания продукта относительно стенки;

θ_c — напряжение на стенке трубы.

Уравнение Букингама находит широкое применение для обобщения экспериментальных данных [183]:

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta l} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right], \quad (\text{VI—13})$$

где d_0 — диаметр ядра потока, м (при структурном режиме движения его величина определяется предельным напряжением сдвига);

l — длина трубы, м;

η — пластическая вязкость, Па·с.

Отношение диаметра ядра потока к диаметру трубы можно представить отношением предельного напряжения сдвига к напряжению на стенке трубы:

$$\frac{d_0}{d} = \frac{4\theta_c l}{p d}. \quad (\text{VI—13a})$$

Уравнение (VI—13) получено для модели течения Шведова — Бингама. Пренебрегая третьим членом, из

уравнения можно легко найти потери давления, привести его к виду уравнения Дарси-Вейсбаха, а коэффициент гидравлического сопротивления вычислить по обобщенному критерию Рейнольдса. Однако в двучленной форме записи уравнение Букингама применимо при $d_0/d \leq 0,5$ с ошибкой до 6% [183].

Учитывая этот недостаток, уравнение Букингама предлагается записывать в виде

$$V_c = \frac{\pi \rho d^4}{128 \eta l} f\left(\frac{d_0}{d}\right), \quad (\text{VI-14})$$

где

$f\left(\frac{d_0}{d}\right) = a_1 - a_2 \frac{d_0}{d}$ — функция относительного размера ядра

потока (табл. 59); различные виды аппроксимаций этой функции предложены Э. К. Латыповым и Б. С. Филатовым, Р. И. Шишенко [183], Ю. А. Мачихиным [111] и др. [158].

Таблица 59

Коэффициенты для аппроксимации уравнения Букингама (VI-13), (VI-16)				Средняя толщина слоя сдвига в долях радиуса трубы
a_1	a_2	a_3	K	
1	1	8	64	0,25
0,855	1	8	75	0,25
1	1,33	6	64	0,33
1	2,67	3	64	0,66
1	4	2	64	1,00
0,38	0,4	20	168	0,11
0,32	0,32	25	200	0,08

С учетом аппроксимации в уравнении Дарси-Вейсбаха

$$\rho = \lambda^* \frac{l}{d} \rho \frac{w^2}{2} \quad (\text{VI-15})$$

коэффициент гидравлического сопротивления λ^* определяется зависимостью

$$\lambda^* = \frac{K}{\text{Re}^*}, \quad (\text{IV-16})$$

где $\text{Re}^* = \text{Re} f\left(\frac{d_0}{d}\right)$ — обобщенный критерий Рейнольдса,

$$Re^* = \frac{Re}{\left(1 + \frac{1}{a_3} \frac{\theta_0 d}{\eta \omega}\right)^2};$$

$Re = \frac{\omega d \rho}{\eta}$ — критерий Рейнольдса, вычисленный по пластической вязкости.

Величины эмпирических коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 и K приведены в табл. 59 [111].

Таким образом, если течение данного продукта можно описать моделью Бингама, то вид аппроксимации устанавливается эмпирически. Например, при движении пралиновых масс по трубопроводам удовлетворительное совпадение с опытом дает способ аппроксимации по номеру 7 табл. 59, если обобщенный критерий Рейнольдса находится в пределах от 0,1 до 1,0. За этими пределами в формуле (VI—16) коэффициент $K=220$, а Re^* приобретает степень 0,92. Указанные зависимости применимы при изменении скорости движения пралиновой массы от 0,01 до 0,20 м/с, диаметра трубы от 0,03 до 0,08 м, предельного напряжения сдвига от 100 до 1000 Па, пластической вязкости от 10 до 200 Па·с. Для расчета различных случаев течения пищевых масс в мундштуках, насадках и предложены аналоги уравнения Букингама [150].

Уравнение течения упруговязкой жидкости [154] по модели Фойгта-Кельвина (см. рис. 1, δ) с последовательно включенным вязким элементом, т. е.

$$\begin{aligned} \epsilon_{эл} G + \eta_{эл} \dot{\epsilon}_{эл} &= \eta_{в} \dot{\epsilon}_{в}, \\ \epsilon &= \epsilon_{эл} + \epsilon_{в} \end{aligned}$$

имеет вид

$$V_c = \frac{\pi r d^4}{8l} \left[\frac{1}{\eta_{в}} + \frac{1}{\eta_{эл}} \exp\left(-\frac{G}{\eta_{эл}} \tau\right) \right], \quad (VI-17)$$

где $\epsilon_{эл}$, $\dot{\epsilon}_{эл}$, $\epsilon_{в}$, $\dot{\epsilon}_{в}$ — эластические и вязкие относительные деформации и скорости деформации соответственно;

$\eta_{эл}$, $\eta_{в}$ — эластическая и ньютоновская вязкости, Па·с;

τ — продолжительность развития эластических деформаций, с.

Уравнение течения сред Кессона [105] можно представить зависимостью

$$-V_{\text{ср}}^r = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_{\text{к}} l} \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 - \frac{4}{7} \left(\frac{d_0}{d} \right)^3 + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right) + \frac{4}{7} \left(\frac{d_0}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{VI—18})$$

где $\eta_{\text{к}}$ — кессоновская вязкость, Па·с;

$\left(\frac{d_0}{d} \right)$ — отношение диаметра ядра потока к диаметру трубы; вычисляют его по зависимости (VI—13а), куда входит кессоновское предельное напряжение сдвига.

Уравнение (VI—18) позволяет вычислить расход продукта в зависимости от потерь давления. Однако в общем случае оно аналитически неразрешимо относительно потерь давления при известном расходе. Такую задачу следует решать графически.

Пренебрегая влиянием стержнеподобного ядра потока на потери давления, А. М. Маслов [105] для сред Кессона получил более простое уравнение, которое аналогично уравнению Дарси-Вейсбаха (VI—15). В этом случае обобщенный критерий Рейнольдса можно определить по зависимости

$$\text{Re}^* = \frac{\rho \omega d}{\eta_{\text{к}} \left(1 + \sqrt{\frac{\theta_0 d}{8 \eta_{\text{к}} \omega}} \right)^2},$$

а коэффициент K в формуле (VI—16) равен 64.

Экспериментальных данных о применимости этих уравнений для расчета течения пищевых продуктов не имеется, хотя в литературе отмечено, что кривые течения расплавов шоколада, высокожирных сливок и других продуктов можно характеризовать формулой Кессона [217].

При наличии пристенного эффекта (n — эффект [13], который выражается в выдавливании жидкой дисперсионной фазы к стенке трубы с образованием «смазочного слоя») уравнение течения принимает вид [90]

$$\theta = \theta_0 + \left[B_1^* \left(-\frac{du}{dr} \right) \right]^{1/a},$$

где коэффициент a — величина, обратная индексу течения, т. е. $a = \frac{1}{n}$; B_1^* — вязкостная составляющая; выражена по уравнению (II—9).

В этом случае расход продукта определяется уравнением

$$V_c = \pi R^3 \frac{(\theta - \theta_0)^{a+1}}{\eta \theta^3} \left[\frac{2(\theta - \theta_0)^2}{(a+1)(a+2)(a+3)} - \frac{2(\theta^2 - \theta \theta_0)}{(a+1)(a+2)} + \frac{\theta^2}{(a+1)} \right] + k \frac{\theta}{R},$$

где k — коэффициент, характеризующий проскальзывание продукта относительно стенки.

Полученная формула представляет некоторый интерес, хотя при выводе ее были сделаны, вероятно, некоторые допущения.

Существенный интерес представляют труды Г. В. Виноградова, Н. В. Тябина, Д. С. Великовского и др., где даются методы расчета течения по основе вискозиметрических данных. Эти методы не требуют знания закона течения в виде непрерывной зависимости истинного градиента скорости от напряжения. Перспективны для обобщений процессов движения критериальные зависимости, в том числе использующие критерии Рейнольдса с эффективной вязкостью, число пластичности и пр.

Полученные уравнения течения охватывают определенный класс подобных явлений. Для установления границ каждого такого класса базируются на основных положениях теории подобия.

Критериальное уравнение динамики движения пластично-вязких масс [33, 91] получено на основании π -теоремы метода анализа размерностей. В качестве носителей размерностей приняты: для геометрических факторов — характерный линейный размер — диаметр, для кинематических — средняя скорость потока, для динамических — предельное напряжение сдвига. В общем случае критериальное уравнение имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{Eu}{Eu'} &= f\left(\frac{l}{d}, Eu' Re_{\text{эф}}\right), \\ \frac{Eu}{Eu'} &= C \frac{l}{d} (Eu' Re_{\text{эф}})^{-q}, \end{aligned} \right\} \quad \text{или} \quad \text{(VI-1)}$$

где C, q — эмпирические коэффициенты, причем первый зависит от диаметра и включает размерность метр; $C = a_1 d$ (табл. 60);

$Eu = \frac{p}{\rho \omega^2}$ — критерий Эйлера (характеризует соотношение потенциальной и кинетической энергии в потоке);

$Eu' = \frac{\theta_0}{\rho \omega^2}$ — видоизмененный критерий Эйлера (характеризует соотношение работы пластических сил и кинетической энергии);

$Re_{эф} = \frac{w d \rho}{\eta_{эф}}$ — критерий Рейнольдса, вычисленный по эффективной вязкости (характеризует соотношение кинетической энергии и работы сил вязкого сопротивления).

Т а б л и ц а 60

Форма канала или обтекаемого тела	Коэффициенты к критериальному уравнению (VI—19)		
	a_1	a_2	q
Цилиндрический трубопровод	1800	1,082	0,882
Цилиндрические насадки	2600	1,00	1,00
Лопасты (квадратная пластина, шар)	1600	0,80	1,00

Примечание. Коэффициенты a_2 имеют размерность m^{-a_2} .

Графо-аналитическая обработка экспериментальных данных для случаев движения по трубам колбасного фарша различных видов позволила получить расчетное уравнение

$$p = 1800 d^{-0,8} \theta_0^{0,118} (\eta_{эф} \rho_{отн} \omega)^{0,882}, \quad (VI-20)$$

где 1800 — опытно-расчетный коэффициент, имеющий размерность $m^{-1,082}$;

$\rho_{отн}$ — относительная (к воде) плотность продукта.

Уравнение (VI—20) применимо при изменении скорости от 0,01 до 1,6 м/с, диаметра — от 0,03 до 0,08 м.

Критериальное уравнение можно привести к виду уравнения (VI—6), тогда величины коэффициентов A и n будут определяться по зависимостям:

$$A = 1800 d^{0,2} \theta_0^{0,118} (\rho_{отн} B \omega_1)^{0,882}, \quad n = 0,882 (1 - m),$$

где B — эффективная вязкость при скорости $\omega_1 = 1$ м/с, (см. табл. 13), Па·с;

m — темп разрушения структуры по вискозиметрическим данным.

Критериальные уравнения (VI—19) и (VI—20) приведены также к виду уравнения Дарси-Вейсбаха (VI—

8), где коэффициент гидравлического сопротивления определяют в результате аналогичных преобразований. Это уравнение оказалось применимо для расчета насадок внешнего обтекания лопасти и др.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Расчет трубопроводного транспорта

Перед проектированием установки для трубопроводного транспорта необходимо определить следующие параметры: диаметр трубопровода, давление продукта на входе в трубу и мощность для выполнения прочностных расчетов и для подбора электродвигателя.

I. Исходные параметры

1. Рецепттура фарша

2. Производительность трубопровода M_c (в кг/с)

$$M_c = \frac{M_{cm}}{3600\tau_p}, \quad (VI-21)$$

где M_{cm} — выработка за смену, кг;

τ_p — эффективное время работы в смену, ч;

3600 — переводной коэффициент, с/ч.

3. Общая длина трубопровода l (в м) с учетом поворотов (отношение радиуса закругления к диаметру трубы должно быть больше шести, с тем чтобы не учитывать потери в местных сопротивлениях).

II. Выбираемые параметры

Скорость движения фарша по трубопроводу w_0 (в м/с). Ее оптимальное значение находится в пределах 0,2—0,5 м/с (чем гуще фарш, тем меньше скорость)¹

III. Расчетные параметры

1. Объемный расход V_c (в м³/с).

$$V_c = \frac{M_c}{\rho}, \quad (VI-22)$$

где ρ — плотность фарша, кг/м³.

¹ Вместо скорости в качестве расчетного параметра может быть оптимальный диаметр, определение которого связано с громоздкими вычислениями.

Плотность фарша определяют по формуле

$$\rho = 1037 - (290 \varphi + 10,5 U) + 22 \lg p_{\tau},$$

где φ — жирность фарша, кг жира на 1 кг фарша;

U — влагосодержание фарша, кг влаги на 1 кг сухого остатка;

p_{τ} — давление в трубопроводе, равное половине давления p на выходе из насоса, Па.

Примечания: 1. Если давление дано в атмосферах, то его значение необходимо умножить на 10^5 .

2. Плотность для жирных видов фарша находится в диапазоне 960—980 для обезжиренных — 1030—1040 кг/м³.

2. Диаметр трубопровода d_0 (в м) определяют по формуле расхода

$$d_0 = \sqrt{\frac{4V_c}{\pi w_0}}. \quad (\text{VI-23})$$

По значению диаметра d_0 по ГОСТу выбирают ближайшую величину d , м.

Действительную среднюю скорость w (в м/с) движения фарша вычисляют по формуле

$$w = \frac{4V_c}{\pi d^2}. \quad (\text{VI-24})$$

3. Консистентную переменную (градиент скорости) $\dot{\varepsilon}$ (1/с) вычисляют по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{8w}{d}. \quad (\text{VI-25})$$

Безразмерная консистентная переменная

$$\dot{\varepsilon}_* = \frac{8w}{\varepsilon_1 d}, \quad (\text{VI-25a})$$

где $\varepsilon_1 = 1$, т.е. градиент скорости, равный единице его измерения.

4. Консистентную переменную (напряжение сдвига) θ (в Па) определяют по формуле

$$\theta = A_1 \dot{\varepsilon}_*^n = A_1 \left(\frac{8w}{\varepsilon_1 d} \right)^n, \quad (\text{VI-26})$$

или

$$\theta = \frac{pd}{4l}, \quad (\text{VI-27})$$

где A_1 — напряжение сдвига при единичном значении градиента скорости, Па;

n — индекс течения;

p — потери давления или давление на выходе из насоса, Па.

Величины A_1 и n выбирают из табл. 58 или определяют по формулам:

$$A_1 = B_0^* \varepsilon_1 \left(\frac{3n + 1}{4n} \right)^n, \quad (\text{VI-28})$$

$$n = 1 - m, \quad (\text{VI-29})$$

где B_0^* , m — эффективная вязкость (в Па·с) при единичном значении градиента скорости и темп разрушения структуры соответственно (см. табл. 13).

5. Потери давления p (в Па) — давление фарша на выходе из насоса, определяют по формуле (VI-27)

$$p = \frac{4l\theta}{d}. \quad (\text{VI-30})$$

Полезная мощность насоса N (в кВт)

$$N = pV_c \cdot 10^{-3}. \quad (\text{VI-31})$$

IV. Выбор оборудования.

1. Насос выбирают по требуемой производительности трубопровода M_c или $M_{\text{ч}} = 3600 M_c$, принимая во внимание, что объемный к. п. д. составляет 0,5—0,6.

2. Мощность электродвигателя $N_{\text{эд}}$ (в кВт)

$$N_{\text{эд}} = \frac{a}{K_{\text{ш}}} \left(\frac{N}{K_{\text{н}}} + \frac{N_{\text{ш}}}{K_{\text{ш}}} \right), \quad (\text{VI-32})$$

где a — коэффициент запаса мощности (для коротких трубопроводов до 5 м $a=1,2$, для длинных $a=1,5$);

$K_{\text{ш}}$; $K_{\text{н}}$; $K_{\text{ш}}$ — к. п. д. соответственно механических передач от электродвигателя к насосу, насоса и шнеков (плателей);

N ; $N_{\text{ш}}$ — полезная мощность, развиваемая насосом и шнеком соответственно, кВт.

Электродвигатель выбирают по каталогу.

В связи с тем что пищевые продукты являются скоропортящимися средами, существенное значение имеют очистка и мойка трубопроводов. Перед мойкой из труб должен быть удален продукт.

Программа безразборной мойки трубопроводов, передающих маловязкие жидкости, следующая: удаление продукта, ополаскивание холодной водой, циркуляционная мойка горячим щелочным раствором (концентрация 1%, температура 70—80° С), ополаскивание водой, циркуляционная мойка холодным стерилизующим раствором (гипохлорид натрия), ополаскивание водой. Для безразборной мойки трубопровод должен иметь наклон (0,05—0,1) в направлении возвратных линий; скорости движения раствора от 1 до 1,5 м/с.

Для быстрого определения бактериальной чистоты трубопровода после безразборной мойки можно использовать раствор радиоактивного изотопа, испускающего гамма-лучи. При наличии отложений или загрязнений изотоп откладывается на них; определить эти места можно с помощью счетчика.

Для мойки спусков используют разбрызгивающие перфорированные головки. Для удаления остатков продукта со стенок хорошо зарекомендовал себя способ механической очистки. На конце гибкого вала, который приводится во вращение от электродвигателя, устанавливают диск с закрепленными радиально резиновыми полосками. При вращении диска полоски очищают внутреннюю поверхность спуска [102]. Иногда внутреннюю поверхность труб или спусков стерилизуют острым паром.

Подробное рассмотрение вопросов мойки трубопроводов и оборудования [19, 57, 71, 119], использования трубопроводов, арматуры [20, 182] и расходомеров [87], расчета трубопроводов для легкотекучих систем [34, 39, 46, 182] могут представить содержание отдельной монографии. Как видно из приведенной выше библиографии, названные вопросы в молочной промышленности разработаны более подробно и традиционно им уделялось больше внимания.

Представляет интерес расчет оптимального диаметра трубопровода с учетом того, чтобы и толщина стенки была оптимальной, так как транспортировка твердообразных продуктов, мясного фарша и др. связана с относительно высокими давлениями и расходами энергии.

Эксплуатационные расходы при транспортировке складываются из расходов на амортизацию, текущий ремонт труб и стоимости электроэнергии. Общую стоимость C в руб. на 1 т передаваемой продукции определяют по уравнению

$$C = C_a + C_э = k l \frac{a + \tau}{m_T M_{см}} (c_T + m) + \frac{N \tau c_э}{M_{см} K_0}, \quad (\text{VI—33})$$

где C_a — стоимость амортизации и текущего ремонта трубопровода, руб./т;

$C_э$ — стоимость электроэнергии для перекачки фарша, руб./т;

k — коэффициент затрат на непредвиденные работы, арматуру и доставку труб к месту сборки;

l — геометрическая длина трубы, м;

a — коэффициент амортизации в долях единицы, 1/год;

τ — коэффициент затрат на текущий ремонт, 1/год;

m_T — число рабочих смен в году, смен в год;

$M_{см}$ — производительность трубопровода за эффективное время работы в смену, т в смену;

c_T — стоимость 1 пог. м трубы, руб./м;

m — стоимость монтажа 1 пог. м трубы, руб./м;

N — полезная мощность, развиваемая насосом, кВт;

τ — эффективное время работы насоса в смену, ч в смену;

c_0 — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

K_0 — общий к. п. д. насоса, передач, электродвигателя.

Уравнение (VI—33) в противоположность уравнению (VI—34) не зависит от значений стоимостных коэффициентов (зависимость VI—37) и с учетом соотношений (VI—35), (VI—36) может быть использовано для расчетов путем последовательных приближений или с помощью ЭВМ.

При оптимальном режиме работы (с минимальной стоимостью) первая производная суммарной стоимости по диаметру равна нулю. Откуда формула для расчета оптимального внутреннего диаметра d_0 (в м) имеет вид

$$d_0 = \sqrt{\frac{2,78c_0 M_1 A' K_{wd} l_n}{10^4 K_0 \rho k l \left(\frac{A_0}{2\sigma} A' K_{wd} l_n + S \right)}}, \quad (\text{VI—34})$$

где $2,78 \cdot 10^{-4}$ — переводной коэффициент, кВт·ч·с²/(т·м²);

$M_1 = \frac{M_{cm} m_r}{a + \tau}$ — количество перекачиваемой продукции за время,

в течение которого стоимость амортизации станет равной первоначальным затратам, т;

A' — коэффициент давления, Па: A' — соответственно равен: для измельченной говядины 34 000, для фарша любительской вареной колбасы и свинины куттерованной 18 000, для фарша сосисок свиных 10 000;

K_{wd} — коэффициент скорости (производительности), при M_{cm}/τ , равном 0,2; 0,8; 2,5; 5,0; 10 и выше, K_{wd} будет соответственно 0,25; 0,32; 0,40; 0,46; 0,52.

l_n — приведенная длина трубопровода, м;

ρ — плотность фарша, кг/м³;

A_0, S — стоимостные коэффициенты (табл. 61);

σ — допустимое напряжение для материала стенки трубы, Па; допустимое внутреннее рабочее давление, например для стеклянных труб $\rho \approx (7,5 \div \div 28 d) 10^5$ при изменении диаметра от 0,04 до 0,2 м.

По величине оптимального диаметра, выбираемого по стандартам с округлением в сторону уменьшения, и давлению $p_0 = A' K_{wd} \cdot \frac{l_n}{d_0}$, которое ему соответствует, определяют оптимальную толщину стенки трубы δ_0 (в м):

$$\delta_0 = \frac{p_0 d_0}{2\sigma}. \quad (\text{VI—35})$$

Материал трубы	A_0 , руб./м ³	S , руб./м ³	E , руб./м	σ , Па
Нержавеющая сталь при диаметре больше 0,04 м	35000	102	6,0	10 ⁸
Полиэтилен высокого давления	11000	13	0,6	15·10 ⁸
Стекло	5800	9	2,0	40·10 ⁸

Действительную толщину стенки выбирают по каталогам с округлением в сторону увеличения (на 1—5 мм).

Полезную мощность N (в кВт), развиваемую насосом, определяют по зависимости

$$N = 2,78 \cdot 10^{-4} \frac{\rho_0 M_{см}}{\tau\rho}. \quad (\text{VI-36})$$

С учетом данных прейскурантов стоимость 1 пог. м трубы и ее монтажа вычисляют по соотношению

$$c_T + m = A_0 \delta d + Sd + E = \frac{A_0}{2\sigma} \rho d^2 + Sd + E, \quad (\text{VI-37})$$

где E — коэффициент (см. табл. 61). Вид формулы и значения коэффициентов при изменении цен изменятся.

Общую стоимость насосной установки $C_{общ}$ (в руб./т) с трубопроводом вычисляют по формуле

$$C_{общ} = C + k_{н.в} \frac{C_n + C_{эд}}{M_1},$$

где C_n — стоимость насоса, руб.;

$k_{н.в}$ — коэффициент затрат на неподвижные расходы, арматуру, доставку и монтаж;

$C_{эд}$ — стоимость электродвигателя, руб.

Исходные параметры для расчета принимают в соответствии с технико-экономическими нормами и заданным объемом производства.

Расчеты процесса перемешивания

Давление на лопасть p (в Па) при ее движении в пластично-вязком продукте (рис. 76), исходя из критерияльного уравнения, в котором симплекс геометрического подобия l/d равен единице, определяют по уравнению (VI-38)

$$p = 1600d^{-0,2} \eta_{эф} \omega = 1600Bd^{-0,2} \omega^n. \quad (\text{VI-38})$$

При движении шара и пластины (размер от 0,03 до 0,06 м) с одинаковой площадью сечения наблюдается небольшое различие давлений сопротивления, что объясняется следующим. Перед пластиной образуется выпуклая «мертвая» зона фарша, которая вызывает дополнительное сопротивление трения на ее обтекание. С другой стороны, вследствие большой липкости фарша на боковой поверхности шара образуется слой, увеличивающий диаметр шара. Вихреобразования за лопастью, что наблюдается у ньютоновских жидкостей, при движении в фарше не происходит. Однако размер «туннеля» при прохождении шара меньше, чем при прохождении пластины. При длительном движении в фарше давление сопротивления на пластину практически не меняется, в то время как при движении шара увеличивается за счет налипшего на поверхность слоя.

Проведенные исследования изменения давления сопротивления показали, что при определенной длительности куттерования, которая зависит от влагосодержания, кривые имеют ярко выраженный экстремум (рис. 76). Анализ всех данных показывает, что по силе (давлению) сопротивления можно судить о моменте достижения максимального значения величин свойств. Если оснастить каждый куттер подобным прибором с автоматической записью показаний от тензодатчика (например, на ЭПП-09), то, с одной стороны, каждый фаршесоставитель может найти оптимальное время куттерования, когда давление сопротивления будет наибольшим, с другой — на каждый замес фарша остается «паспорт». Такой прибор легко изготовить и протарировать. Место установки его на куттере должно быть зафиксировано.

Расчеты процесса истечения

При истечении через отверстия и насадки общее давление перед входом складывается из потерь при внезапном сужении (вход) по длине, которые отнесены к входному диаметру и рассчитаны на цилиндрический насадок, и потерь при расширении или сужении потока за счет конусности. Последние учитывают посредством угла конусности α с соответствующим знаком. Потери давления со струей уходящей жидкости учитывают вторым членом уравнения (VI—5), который вычисляют

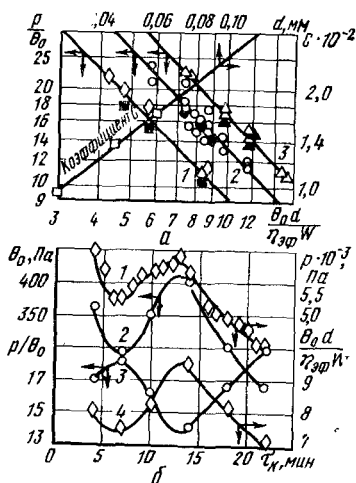


Рис. 76. Динамика обтекания фаршем пластины и шара: а — при неизменных свойствах фарша для пластин с характерным размером: 1 — 0,0292 м; 2 — 0,045; 3 — 0,060 м; б — при куттеровании фарша: 1 — давление сопротивления; 2 — предельные напряжения сдвига; 3, 4 — критерии подобия.

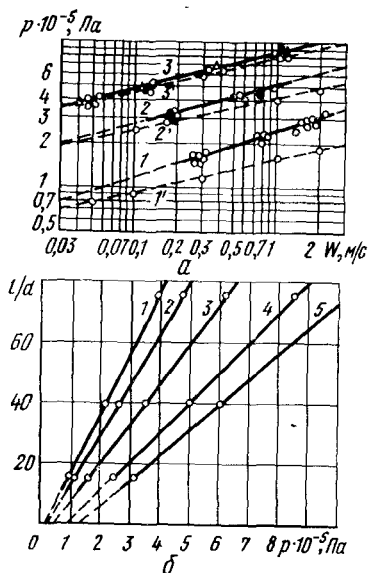


Рис. 77. Зависимость потерь давления при истечении фарша докторской колбасы через насадки диаметром 0,008 м:

а — от скорости истечения при относительной длине: 1 — 15; 2 — 40; 3 — 75 (сплошная линия — общие потери; пунктирная — потери по длине); б — от относительной длины при различной скорости истечения: 1 — 0,05 м/с; 2 — 0,1; 3 — 0,3; 4 — 1,0; 5 — 2,0 м/с.

по критериальному уравнению (см. табл. 60) или по уравнению (VI—6), где коэффициенты находят по табл. 58.

Представляет интерес методика обобщения экспериментальных данных [51]. В соответствии с этой методикой в логарифмических шкалах строили зависимости общих потерь давления от скорости истечения для разных относительных длин насадок (рис. 77, а).

Затем при фиксированных скоростях 0,05; 0,1; 0,3; 1,0; 2,0 м/с находили общие потери давления и строили график их зависимости от относительной длины (рис. 77, б). Экстраполяция прямых до пересечения с осью

абсцисс давала потери давления в местном сопротивлении. Для проверки такого метода определения местных сопротивлений проводили специальные эксперименты, в которых реализовали истечение фарша через отверстия с толщиной стенки, практически равной нулю. Данные, полученные методом экстраполяции, полностью подтвердились прямыми экспериментами.

Найденные значения местных сопротивлений вычитали из общих потерь (рис. 77, а) и получали зависимость потерь по длине от скорости истечения. Индекс течения для всех размеров насадок оставался постоянным для каждого вида фарша: пунктирные линии на рис. 77, а параллельны.

Дальнейшую обработку экспериментальных данных выполняют традиционными методами: для расчета общих потерь давления p (в Па) получили следующую зависимость [34, 51]:

$$p = 790V^{0.4} d^{-0.86} w^{0.56} + 2600ld^{-1} \eta_{эф} w (1 + 0,08\alpha), \quad (VI-39)$$

При $\alpha=0$ формула превращается в расчетную для цилиндрических насадок, при $l=0$ — для отверстий. Если $\alpha=-12,5^\circ$, происходит отрыв струи и насадка работает в определенной мере как отверстие. Это подтверждается экспериментально при скоростях истечения больше 0,02 м/с. Пределы применимости уравнения (VI-39) для диаметров — от 0,003 до 0,014 м, угла конусности — до $\pm 12,5^\circ$, отношения длины к диаметру от 0 до 75, скорости истечения — от 0,01 до 6 м/с.

Процесс истечения крупнокускового мяса состоит из трех периодов: подпрессовка, сжатие до давления начала истечения (наибольшее давление) и само истечение. Для определения давления истечения получены зависимости:

$$p = a_1 10^6 d^{-0.86},$$

или

$$p = a_2 10^6 w^{0.5}, \quad (VI-39a)$$

где d — диаметр (от 0,006 до 0,015 м) при длине насадок 0,045 м;

w — средняя скорость истечения (от 0,43 до 2,7 м/с);

a_1, a_2 — эмпирические коэффициенты, равны соответственно 2,3 и 130 для говяжьего мяса и 0,9 и 45 для свиного.

Расчеты процессов дозирования

Процессы дозирования по назначению чрезвычайно многообразны. Одной из основных задач дозирования является создание базы для механизации и автоматизации производственных процессов при одновременном обеспечении точности и соблюдении рецептуры. Наиболее типичными функциями дозирования являются отмеривание продукта по заданному объему, массе, длине и поддержание заданного объемного или массового расхода. Для реализации последнего кроме специальных дозирующих устройств используют расходомеры и насосы-дозаторы с постоянной производительностью.

Различают два основных метода дозирования: по объему и по массе. При объемном дозировании реологические свойства продукта и способ заполнения формы определяют процесс и конструкцию машины, при массовом — имеют второстепенное значение. Поэтому рассмотрим только первый способ на примере дозирования пластично-вязких масс.

Схематически метод объемного дозирования можно представить как отмеривание определенного объема продукта и заполнение тары. В одну тару можно дозировать несколько компонентов. Для перемещения тары могут быть использованы непрерывные и пульсирующие конвейеры и роторные (карусельные) машины. Принципиальные схемы некоторых рабочих органов дозаторов показаны на рис. 78. Поскольку продукты труднотекучие, то их подачу в рабочие органы следует осуществлять принудительно: с помощью напорных шнеков или лопастей, насосов или поршневых шприцев (на рисунках условно не показаны).

При конструировании дозирующих устройств обычно исходят из кинематики питающих устройств, не увязывая кинематические расчеты с динамикой течения продукта и его реологическими свойствами. Имеющиеся расчетные зависимости, описывающие динамику течения продукта в форме дозатора, получены для случая «статического» заполнения неподвижной формы продуктом. По подобной схеме работают устройства, показанные на рис. 78, *а*, *б*. Названные зависимости можно использовать также и для приближенного расчета динамического процесса заполнения формы (рис. 78, *в*, *г*, *д*, *е*).

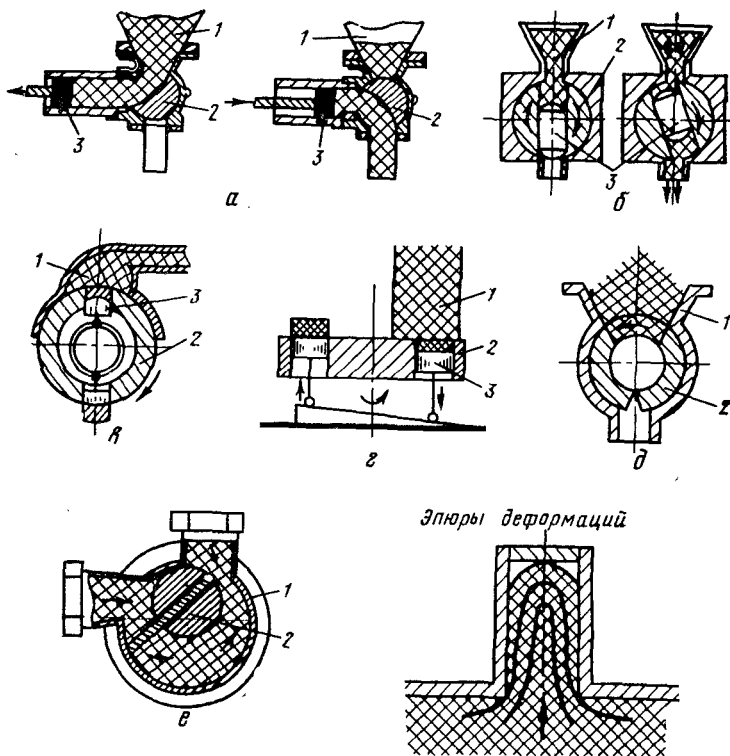


Рис. 78. Принципиальные схемы дозаторов а, б, в, г — поршневого типа:

1 — бункер; 2 — ротор; 3 — поршень; д, е — роторного типа: 1 — корпус; 2 — ротор (кулачки).

Заполнение формы пластично-вязким продуктом представляет собой нестационарный процесс. Продукт, подходя к форме, деформируется и движется в ней, имея выпуклую верхнюю поверхность. При подходе к крышке или дну формы скорость продукта замедляется и начинается заполнение углового пространства. Процесс считается законченным, когда весь объем формы занят продуктом. Необходимое для этого давление складывается из следующих составляющих: потери в местных сопротивлениях — внезапное сужение на входе в форму p_m ; потери при движении по длине формы $p_{дл}$ и давле

ние, необходимое для окончательного заполнения формы $p_{сж}$ (его величину определяют в центре крышки, когда угловые пространства заполнены продуктом).

Продолжительность заполнения формы обычно известно. Исходя из общей производительности технологической линии, ее объем и геометрические размеры определяются назначением формуемого продукта. Поэтому в качестве основной расчетной величины можно принять полное давление, которое необходимо создать перед формой для ее заполнения в заданный промежуток времени. Если давление превышает необходимое, то продукт сжимается, плотность его увеличивается, что приводит к увеличению массы дозы и появлению «оплоя» (подобие «языков» сбоку дозы) при выходе дозы из замыкающего звена. При недостаточном давлении масса дозы получается меньше установленной.

Таким образом, полное оптимальное давление p (в Па) [176] перед входом в форму составит:

$$p = p_m + p_{дл} + p_{сж}. \quad (\text{VI—40})$$

Составляющие общего давления вычисляют по зависимостям:

$$p_m = A_2 \theta_0^{0,4} d_3^{-0,86} \omega^{0,56}; \quad (\text{VI—40a})$$

$$p_{дл} = C_1 l d_3^{-1} \eta_{эф} \rho_{отн} \omega; \quad (\text{VI—40б})$$

$$p_{сж} = D \cdot 10^{a\omega}. \quad (\text{VI—40в})$$

В этих формулах A_2 , C_1 , D — эмпирические коэффициенты (их значения приведены в табл. 62);

Т а б л и ц а 62

Потери давления	Кoeffициенты	Кoeffициенты при форме сечения дозаторов		
		квадрат	круг	прямоугольник
На сжатие	D	$1,23 \theta_0 - 100$	$0,9 \theta_0 + 250$	$0,7 \theta_0$
	a^*	21	$0,008 \theta_0 + 14$	53
При входе в дозатор	A_2	37,5	112	33
По длине	C_1	1000	$65 \theta_0^{0,55}$	$1900 d_3^{0,3}$

Примечание. Числовой множитель, входящий в коэффициент C_1 , имеет размерность для квадрата м^{-1} , для круга $\text{м}^{0,1} \cdot \text{Н}^{-0,55}$, для прямоугольника $\text{м}^{-1,3}$, A_2 имеет размерность $\text{Н}^{0,6} \text{с}^{0,56} \text{м}^{-0,9}$.

l, d_3 — длина дозатора и эквивалентный диаметр поперечного сечения формы, равный диаметру круга или стороне квадрата

Для прямоугольного сечения $d_3 = \frac{2b_1b_2}{b_1+b_2}$, где b_1 и b_2 — длины сторон прямоугольника;

ω — средняя скорость заполнения дозатора, м/с (выражается как скорость равномерного движения, т.е. $\omega = l/\tau$, где τ — продолжительность заполнения дозатора, с);

$\omega^* = \omega + 0,004$ м/с — кинематический коэффициент, зависящий от средней скорости движения продукта в дозаторе;

$a = 56 (F_0 \cdot 10^2)^{2,5} + a^*$ — геометрический коэффициент, зависящий от площади сечения дозатора F_0 (в м²), его формы и специфики заполнения углового пространства у дна, последнее отражается величиной a^* (см. табл. 62).

Предельное напряжение сдвига и эффективная вязкость приведены в табл. 13, эффективную вязкость вычисляют по формуле (II—44).

Поскольку при увеличении давления плотность фарша также увеличивается, то целесообразно корректировать объем формы для найденных величин давления плотности с тем, чтобы получать дозы постоянной массы.

Пределы применимости уравнений (VI—40): по скорости от 0,001 до 0,1 м/с, по предельному напряжению сдвига от 200 до 1000 Па; по площади сечения от 0,00 до 0,01 м²; по длине формы от 0,005 до 0,12 м. Таким образом, для расчета объемного дозатора необходимо знать структурно-механические свойства фарша и его плотность. Производительность задается техническим заданием. Геометрическая форма и размер дозатора определяют назначением и требованием к продукту. Эти параметры позволяют с учетом гидравлического уравнения расхода рассчитать скорость заполнения формы дозатора. Оптимальное давление, необходимое для заполнения формы на 100%, находят по уравнениям (VI—40).

Расчеты процесса неизотермического движения пластично-вязких продуктов по трубопроводам

Это движение, связанное с нагреванием, имеет как вспомогательное, так и самостоятельное значение. Первый случай может реализоваться, когда за счет нагрева у стенки трубы образуется пленка, играющая роль смазки. Расчеты показывают, что общее нагревание продук-

та за 6—8 с пребывания в трубе составляет около 1°С, когда поверхность трубы имеет температуру около 40—50°С, т. е. выше температуры плавления жира. Второй случай связан с нагреванием всей массы продукта, поэтому скорость его движения должна быть небольшой. Во избежание «заклинивания» трубопровода при нагревании белковых денатурируемых систем температура не должна быть выше температуры денатурации (35—40°С).

Для расчета скорости w (в м/с) движения колбасного фарша по трубе при нагревании его до заданной температуры предложена формула [34]

$$w = \frac{l}{\tau} = 1,1 \frac{al}{d^2} \exp(3,45\partial_{\text{оси}}), \quad (\text{VI—41})$$

где $\partial_{\text{оси}} = \frac{t_c - t_{\text{оси}}}{t_c - t_0}$ — безразмерная температура на оси трубы;

t_c — температура стенки трубы, К;

t_0 — начальная температура фарша, К;

$t_{\text{оси}}$ — температура фарша на оси трубы на выходе из нее, К;

l — длина трубы, м;

τ — время пребывания фарша в трубе, с;

a — коэффициент температуропроводности, м²/с.

Формула (VI—41) справедлива при $0,2 < \partial_{\text{оси}} < 0,9$ для диаметров от 0,02 до 0,07 м при отсутствии конвективных токов в трубе.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи α [в Вт/(м²·К)] от трубы движущемуся фаршу [42] найдена формула

$$\alpha = 1,7 \frac{\lambda}{d} \left(\text{Pe} \frac{d}{l} \right)^{1/3}, \quad (\text{VI—42})$$

где $\text{Pe} = \frac{wd}{a}$ — критерий Пекле;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

При течении по трубам «степенной жидкости» приближенное решение дифференциального уравнения теплопроводности [192, 209] дает расчетную зависимость

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = 1,75 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{1/3} \left(\frac{M_{\text{сс}}}{\lambda l} \right)^{1/3} \left(\frac{\theta_0}{\theta_{\text{ост}}} \right)^{0,14}, \quad (\text{VI—43})$$

где n — индекс течения, вычисленный по отношению логарифмов консистентных переменных;

M_c — массовый расход, кг/с;
 c — удельная теплоемкость продукта, Дж/(кг·К);
 $\theta_0, \theta_{\text{ост}}$ — предельное напряжение сдвига, вычисленное при температуре в центре потока и на стенке трубы соответственно, Па (в некоторых формулах рекомендуется брать отношение пластичностей, в других — вязкостей);

$$Gz = \frac{M_c c}{\lambda l} \text{ — критерий Гретца, причем } Gz = \frac{\pi}{4} \text{Pe} \frac{d}{l}.$$

Уравнение (VI—43) применимо для очень вязких жидкостей при $Gz > 20$ и $n > 0,1$ при отсутствии конвективных токов в трубе. При индексе течения в пределах от 0,2 до 0,3 оно приводится к виду

$$\alpha = (1,88 \div 2,00) \frac{\lambda}{d} \left(\text{Pe} \frac{d}{l} \right)^{1/3}, \quad (\text{VI—43.})$$

т. е. близкому уравнению (VI—42).

Для поршневого режима движения ($n=0$, см. рис. 72)

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = \frac{8}{\pi} + \frac{4}{\pi} \sqrt{Gz}, \quad (\text{VI—4.})$$

Если имеется искажение профиля скоростей вследствие изменения вязкости жидкости с температурой (маля вязкие жидкости), решение задачи значительно упрощается [192].

**УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
ПЛАСТИЧНО-ВЯЗКИХ МЯСНЫХ И МОЛОЧНЫХ
ПРОДУКТОВ****НАСОСЫ**

Комплексная механизация различных отраслей пищевой промышленности [37] немыслима без наличия достаточно надежных и современных устройств для межоперационной транспортировки продукта, нагнетания его в форму и т. п., причем перспективность таких устройств непрерывного действия не вызывает сомнений [129, 137].

Основное конструктивное отличие насосов для перекачки пластично-вязких тел от насосов для вязких жидкостей объясняется наличием у первых предельного напряжения сдвига. Оно может обуславливать сводообразование перед рабочим органом, что в свою очередь является причиной уменьшения подачи продукта. Поэтому питание должно быть принудительным либо продукт через весьма широкое окно должен поступать непосредственно на рабочие органы насоса.

Основные типы насосов. На рис. 79, 80, 81 приведены некоторые конструкции насосов, в которых используют как принудительное всасывание с питателем, так и расширенное место входа продукта на ротор. Часто вместо этих двух способов или в дополнение к ним применяют вакуумирование начала рабочей зоны насоса. Для перекачки пластично-вязких тел, основными элементами являются эксцентрический ротор с лопатками, винт, кулачок и пр., используя их в том или ином сочетании, предложены различные конструкции насосов.

Одновинтовые насосы (рис. 79, а, б, в) имеют питающий, транспортирующий и напорный шнеки. Разделительный диск (см. рис. 79, а) или барабан (см. рис. 79, б) препятствуют проворачиванию продукта вместе с напорным шнеком. У насоса, изображенного на рис. 79, а, он имеет всего два витка и, следовательно, путь, проходимый продуктом в сжатом состоянии, небольшой.

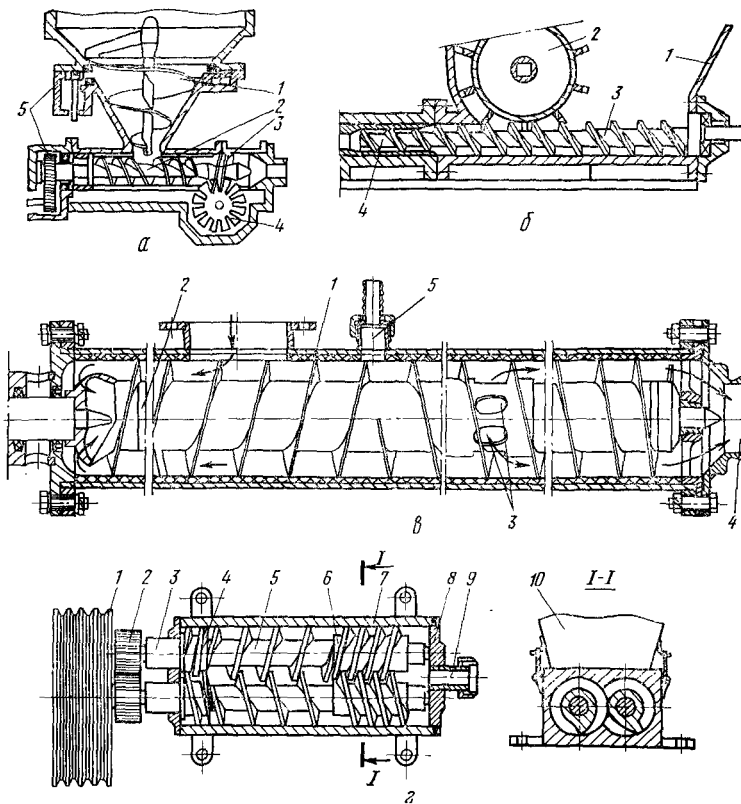


Рис. 79. Принципиальные схемы винтовых насосов:

a — шнекового с вакуумной камерой: 1 — питающий шнек; 2 — транспортирующий шнек; 3 — напорный шнек; 4 — замыкающий диск; 5 — привод к шнеку; 6 — шнековый насос; 1 — корпус; 2 — барабан с замыкающими пластинами; 3 — транспортирующая и 4 — напорная части шнека; *в* — шнековый с вакуумированием в тонком слое ВАКОЛ ВНИИМПа: 1 — корпус; 2 — транспортирующий шнек на полую трубку; 3 — нагнетательный шнек с отверстиями для хода продукта; 4 — напорный трубопровод; 5 — вакуумлиния; 6 — насос с двумя винтовыми вытеснителями: 1 — приводной клиноременный шкив; 2 — синхронизирующие шестерни; 3 — хвостовик винтов; 4 — отбойные винты; 5 — питающие шнеки; 6 — напорные винты; 7 — корпус; 8 — передняя крышка с подшипниками скольжения для вала винтов; 9 — напорная труба; 10 — бункер для продукта.

В насосе конструкции ВНИИМПа (см. рис. 79, *в*) шнек имеет левую и правую навивку. При входе в горловины продукт вакуумируется и перемещается от центра в сторону, затем входит в полую трубу шнека и перемещается

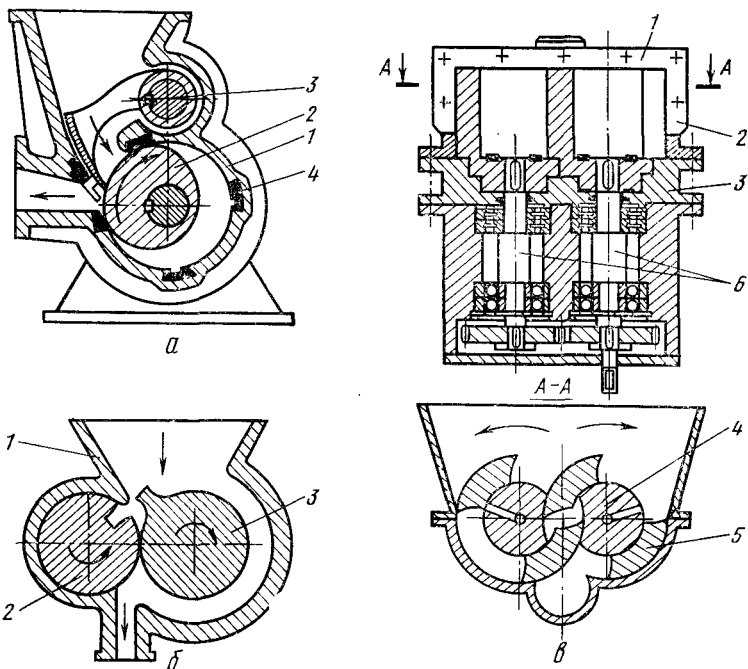


Рис. 80. Принципиальные схемы кулачковых насосов:

a — роторно-лабиринтный; 1 — корпус; 2 — ротор; 3 — замыкающий шибер с рычагом; 4 — эластичное уплотнение с язычковыми губками; б — однокулачковый роторный; 1 — корпус; 2 — ротор с впадиной; 3 — ротор с напорным кулачком; б — кулачковый (роторно-поршневой): 1 — передняя крышка; 2 — корпус; 3 — корпус приводных валов; 4 — неподвижные оси; 5 — вращающиеся поршни (кулачки); 6 — приводные валы к поршням.

к выходным отверстиям, второй раз вакуумируется и напорным шнеком подается в нагнетательный трубопровод.

Двухвинтовые насосы (рис. 79, г) имеют подпорные шнеки, давление нагнетания создается двумя находящимися в зацеплении винтами. Продукт перемещается вдоль нарезки винта за счет вытеснения его из впадины выступом соседнего винта. Таким образом, продукт как бы течет между двумя выступами и проходит путь, равный длине винтовой линии. Названные факторы вызывают интенсивное мятые и перетиравание продукта. Обратный перепуск возможен через зазор винт-статор, также

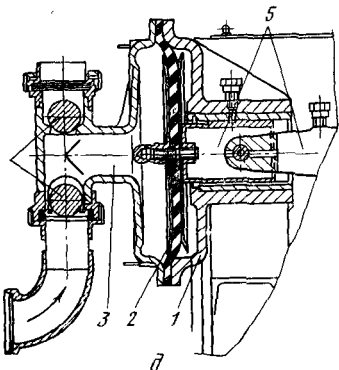
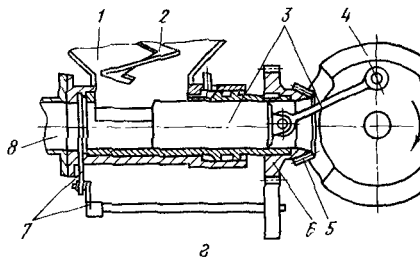
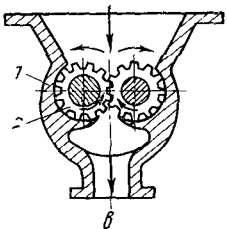
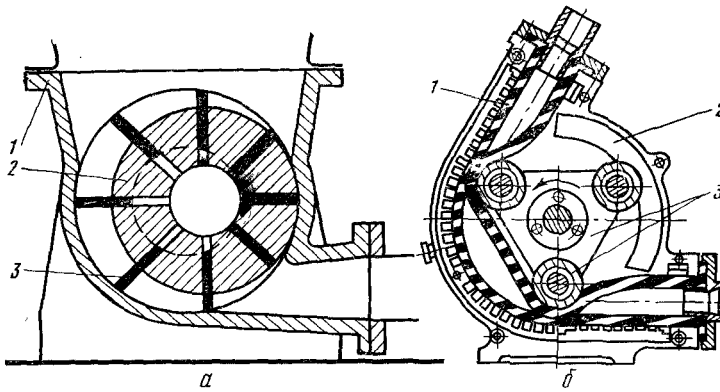


Рис. 81. Принципиальные схемы объемных насосов:

а — эксцентриково-лопастной: корпус; 2 — ротор; 3 — лопатки; шланговый: 1 — гибкий шланг; 2 — насос; 3 — ролики; *в* — шестеренный: корпус; 2 — шестерни; 3 — поршень; *г* — мембранный: 1 — корпус; 2 — мембрана; 3 — рабочая камера для жести; 4 — всасывающий и нагнетательный шаровые клапаны; 5 — поршень (зун) с кривошипно-шатунным механизмом;

проходит усиленный износ поверхности винтовой нарезки из-за распорных усилий между двумя винтами.

В ротационно-шиберном насосе (рис. 80, а) ротор без каких-либо кулачков или пластин служит вытеснителем. В наиболее удаленной части от оси вращения поверхность ротора представляет собой круговой цилиндр, соответствующий расточке рабочей камеры насоса. Расстояние между уплотнениями не превышает длины дуги кругового цилиндра ротора. Уплотнения имеют язычковые губки, которые под действием давления нагнетания плотно прижимаются к ротору. Зона нагнетания отделена от зоны всасывания качающимся шибером, имеющим уплотнения при контакте с ротором и статором.

Однозубчатый насос (рис. 80, б) по принципу работы подобен шестеренчатому, отличается от них тем, что за один оборот ротора защемленный объем в паре зуб—впадина бывает один раз. Замыкающий ротор может быть выполнен из твердой резины, что обеспечивает большую герметичность.

Роторно-поршневой (кулачковый) насос (рис. 80, в) состоит из корпуса, двух неподвижных осей и четырех вращающихся поршней — полых цилиндров с двумя диаметрными вырезами в четверть кольца каждый. Они закреплены попарно на двух валах, установленных в подшипниках качения и приводимых в движение через пару зубчатых колес. Валы вращаются в разные стороны.

Поршни захватывают из бункера порции фарша и перемещают их без изменения объема в камеру нагнетания, перекрывая поочередно зазор между осями и исключая тем самым возврат фарша в зону всасывания. При переносе порции фарша давление в нем остается неизменным и равным давлению в камере всасывания; оно повышается только в камере нагнетания. Наличие четырех поршней дало возможность увеличить загрузочную горловину и исключить в значительной мере зависание фарша в бункере. Значительные поверхности сопряжения вращающихся и неподвижных частей создают достаточно герметичное разделение зон нагнетания и всасывания, исключая обратный перепуск и перетирание фарша. Путь движения фарша небольшой — около четверти окружности. Такая конструкция насоса не снижает качества фарша при перекачке, дает возможность создать высокие давления, необходимые для пере-

качки фарша на большие расстояния. Испытания насосов на фарше вареных и копченых колбас (в том числе с шпиком) показали, что «мятие» и перетиранье практически отсутствуют. Такого типа насосы с успехом используют для перекачки сметаны [28].

В эксцентриково-лопастных насосах (рис. 81, а) объем рабочего пространства между двумя лопастями при перемещении продукта из зоны всасывания в зону нагнетания меняется, что увеличивает локальные давления в переносимом объеме. Последнее создает препятствия для обратного перепуска продукта. Перепуск тем легче, чем тоньше лопатка и больше зазор между лопаткой и статором, который в процессе эксплуатации непрерывно увеличивается. Перепуск при повышении давления может быть столь большим, что насос работает «на себя». Таким образом, продукт интенсивно перетирается, что в ряде случаев вызывает ухудшение качества. В потоке продукта в трубе возможны пустоты и подача пульсирующая.

В шланговом насосе (рис. 81, б) в рабочей зоне продукт находится в эластичном шланге, из которого выдавливается роликами. Они укреплены на вращающемся роторе. Переносимый объем продукта из зоны всасывания в зону нагнетания остается неизменным.

Шестеренчатые насосы (рис. 81, в) («Донбасс», «Франк-а-Матик», Московского мясокомбината и др.) применяют для перекачки продуктов с небольшими размерами предельных напряжений сдвига. Продукт из зоны всасывания переносится в зону нагнетания в зазорах шестерен, вытесняясь из них, когда шестерни приходят в зацепление. При этом появляется сжатие продукта в защемленном объеме впадин, оно в 2—4 раза превышает давление нагнетания, так как защемленный объем наступает перед полным вытеснением продукта [111, 112]. Но тем не менее испытания шестеренчатых насосов дали положительные результаты.

Насос работает хорошо на маловязких жидкостях при больших оборотах непосредственно от вала двигателя; с увеличением вязкости жидкости частота вращения должна снижаться [112]. Для уменьшения вредного действия защемленного объема предлагается фрезерование разгрузочных канавок в боковых поверхностях корпуса насоса. Канавки можно выполнять направ-

ными в сторону нагнетания. Это позволяет разгрузить опорные подшипники и повысить долговечность зубчатого зацепления.

Шестеренчатый насос, разработанный в конструкторском бюро Московского мясокомбината, с большим модулем (0,008 м) при высокой частоте вращения шестерен (960 об/мин) используют для перекачки фаршей без шпика для вареных колбас. Производственные испытания насоса показали значения общего к. п. д. в пределах 0,15—0,20.

Поршневой насос-шприц (рис. 81, з) для мясного фарша [94] имеет корпус, шнековый питатель с загрузочным бункером, сообщающийся с питателем цилиндр и поршень, соединенный с приводом. Цилиндр выполнен в виде поворотного барабана, на боковой поверхности которого образованы окно для загрузки фарша и каналы для соединения загрузочной камеры цилиндра с вакуумной системой. При перемещении поршня из крайнего левого положения вправо полый цилиндр поворачивается от секторного зубчатого колеса так, что полости бункера и цилиндра совмещаются через загрузочное окно и фарш засасывается в цилиндр. Одновременно закрывается задвижка с помощью кривошипного механизма. В крайнем правом положении поршня процесс всасывания заканчивается, приводное секторное зубчатое колесо снова входит в зацепление с шестерней, цилиндр поворачивается на 180° и перекрывает окно всасывания, а задвижка открывается. При дальнейшем вращении приводное секторное зубчатое колесо снова выходит из зацепления с шестерней и движение клапанов приостанавливается: всасывающее окно перекрыто, а задвижка открыта. При продолжении движения поршня влево происходит процесс вытеснения фарша в фаршепровод.

Мембранные насосы (УДМ-4, ОНМ-2, ОНМ-4 и др.) широко используют для перекачки вязких и «нежных» молочных продуктов (например, сметаны, сливок, кефира, закваски и др.), а также для вакуумного откачивания молока из трубопроводов.

Мембранный насос (рис. 81, д) по принципу работы подобен поршневому, с той разницей, что поршень от перекачиваемого продукта отделен мембраной, изготовленной из пищевой резины. В результате колебания

мембраны, приводимой в движение через поршень кривошипно-шатунного механизма, в рабочей камере вначале создается вакуум, а затем давление. При соответствующем ходе поршня осуществляются процессы всасывания и нагнетания. В некоторых конструкциях насосов поршень не связан жестко с мембраной. Между ними имеется буферная жидкость (например, машинное масло), через которую приводится в колебательное движение сама мембрана. Достоинством насосов этого типа является отсутствие уплотнений и прямого контакта рабочего органа с продуктом.

Основные требования к насосам для перекачки вязких продуктов сводятся к следующему.

Насос должен представлять собой отдельную компактную машину с загрузкой продукта в бункер-накапитель, откуда он поступает непосредственно на рабочие органы. Место входа должно иметь достаточный радиус, чтобы исключить зависание, «свободообразование» продукта. Наличие питающих устройств — шнеков, пастных колес и т. п. нежелательно в том случае, когда не допускается мятие и перетиравание продукта. Сопротивления рабочих органов должны быть такими, чтобы в процессе всасывания создавался вакуум.

Протяженность пути продукта от зоны всасывания до зоны нагнетания должна быть минимальной при большой скорости перемещения и неизменном, но значительном объеме, чтобы исключить мятие и разрушение структуры. В эксцентриково-лопастных насосах объем и давление в продукте изменяются вследствие изменения сечения рабочего пространства от зоны всасывания до зоны нагнетания; в винтовых насосах путь движения примерно равен длине винтовой линии, в шестеренчатых — объем неизменен, путь движения небольшой (0,5—0,75 длины окружности), но заполнение объема частичное и вытеснение из него продукта неполное. В защемленном объеме возникают высокие давления.

Возврат продукта (обратный перепуск) в зону всасывания через зазоры под действием давления в зоне нагнетания должен быть минимальным. При обратном перепуске через узкие щели продукт подвергается интенсивным механическим воздействиям, перетирается. Это вызывает механические изменения структуры вплоть до глубоких качественных перерождений и и-

няет реологические и другие свойства продукта. Для устранения возврата продукта площадь замыкания должна быть возможно большей, а размер щели минимальным. Однако в ряде случаев перетирание продукта в насосе, т. е. получение определенного гомогенизирующего эффекта, может быть желательным, например, при изготовлении фарша для ливерных колбас, в процессе приготовления смеси для творожно-сырковых масс и т. д.

Интенсивное механическое воздействие на продукт рабочих органов вытеснителя ведет к разрушению структурной сетки, а также уменьшению вязкости и предельного напряжения сдвига. После выхода продукта из насоса во время движения его по трубе (при гораздо меньших напряжениях) структура восстанавливается, а величины реологических свойств увеличиваются до своего первоначального значения или более высокого. Следовательно, поток по длине трубы будет неоднородным. При высоких скоростях движения продукта по трубе (0,5—1,5 м/с) неоднородность не успевает проявиться; при низких скоростях (около 0,01 м/с и меньше) течение становится неустановившимся. Отсюда следует важный практический вывод, что для получения равномерного движения с малой скоростью воздействующие на продукт касательные напряжения в вытеснителе должны быть меньше аналогичных в трубопроводе.

Исследование насосов и их основные характеристики.

В практике для испытаний различных насосов широко применяют самопишущие приборы, что позволяет измерять точнее и в большем количестве переменные величины, характеризующие работу установки [45, 154].

При испытании насосов на различных режимах работы в общем случае измеряют геометрические размеры, массовый расход $M(p, n)$ (в кг/с), давление на выходе из насоса p (в Па), частоту вращения ротора насоса n (об/мин), мощность на валу электродвигателя в рабочем режиме (кВт) по ваттметру с учетом к. п. д. двигателя при различной нагрузке, мощность на валу двигателя на холостом ходу (кВт) при той же частоте вращения. Мощность, развиваемую в приводе к насосу (редуктор, шестерни и пр.), измеряют отдельно при снятых соединительных муфтах к рабочим органам; ее вычитают из двух найденных выше и получают мощ-

ность рабочего $N_{p.x}$ и холостого $N_{x.x}$ ходов на валу насоса (во всех формулах имеются в виду именно эти мощности).

Измеренные величины позволяют рассчитать следующие показатели: по геометрическим размерам — теоретическую производительность $M_{\text{теор}}$; по мощности рабочего и холостого ходов — мощность на валу насоса $N(p, n)$ в кВт; она используется на преодоление гидравлических потерь в насосе, обеспечение обратного перепуска и создание напора продукта на выходе из насоса:

$$N(p, n) = N_{p.x} - N_{x.x} = N_{\Gamma} + N_V + N; \quad (\text{VII-1})$$

По давлению и производительности определяют мощность, сообщаемую продукту N (в кВт), т. е. полезную выходную мощность насоса,

$$N = 10^{-6} \cdot \frac{\rho M(p, n)}{\rho_{\text{отн}}}, \quad (\text{VII-2})$$

где $\rho_{\text{отн}} = \rho / \rho_{\text{в}}$ — относительная плотность продукта, которая, однако, должна иметь размерность кг/м³ для сохранения размерности в формуле; ее величина близка к единице.

По полезной и затраченной мощности определяют полный к. п. д. насоса K , который учитывает все потери и характеризует степень совершенства машин:

$$K = \frac{N}{N_{p.x}} = K_V K_{\Gamma} K_M. \quad (\text{VII-3})$$

Частные к. п. д. характеризуют соответствующую сторону работы вытеснителя. Объемный к. п. д. K_V учитывает обратный перепуск продукта, утечки и пр.

$$K_V = \frac{M(p, n)}{M_{\text{теор}}}. \quad (\text{VII-3a})$$

Гидравлический к. п. д. K_{Γ} учитывает потери давления (Δp) на трение, местные сопротивления и течение продукта внутри вытеснителя; эти потери трансформируются в тепловую энергию и их можно измерить по перепаду температур до и после насоса:

$$K_{\Gamma} = \frac{p}{p + \Delta p}. \quad (\text{VII-3b})$$

Механический к. п. д. K_M учитывает потери в сопряженных деталях вытеснителя — в подшипниках, между ротором и корпусом и пр.:

$$K_M = \frac{N(p, n)}{N_{p.x}} = \frac{N_{p.x} - N_{x.x}}{N_{p.x}} = \frac{N(p, n)}{N(p, n) + N_{x.x}} \quad (\text{VII—3в})$$

Иногда вводят понятие индикаторного к. п. д., $K_{\text{инд}} = K_V K_R$. Следует отметить, что определение частных к. п. д. довольно затруднительно. В практике испытания насосов обычно ограничиваются отыскиванием общего к. п. д. и его исследованием.

В соответствии с общими положениями, приведенными выше, были испытаны три типа насосов, применяемых в колбасном производстве: эксцентриково-лопастной [121], двухвинтовой [32, 134] и роторно-поршневой (кулачковый) [122]. Их схемы приведены на рис. 79, 80, 81.

Испытания эксцентриково-лопастного насоса были проведены на Московском мясокомбинате при перекачке фарша для русских сосисок [121]. До испытаний насос находился в эксплуатации около 3 мес. Радиальный зазор между лопатками и статором составлял от 0,3 до 1 мм при средней величине 0,6 мм; боковые зазоры — 0,4—0,5 мм.

Теоретическую производительность $M_{\text{теор}}$ (в кг/с) рассчитывают по геометрическим размерам:

$$M_{\text{теор}} = \frac{\rho n}{60} V = \frac{\rho n}{60} \left[2\pi \left(\frac{D}{2} - e \right) - z\delta \right] 2be = 1,76 \quad (\text{VII—4})$$

где ρ — плотность продукта, кг/м³;
 V — объем рабочей камеры насоса, м³;
 D — внутренний диаметр статора, м ($D=0,258$ м);
 e — эксцентриситет, м ($e=0,019$ м);
 z — число лопаток ($z=8$);
 δ — толщина лопатки, м ($\delta=0,007$ м);
 b — ширина ротора (лопатки), м ($b=0,124$ м).

По действительному расходу, измеренному объемно-массовым методом, определяют среднюю скорость течения фарша по трубе. Графические зависимости $p(l)$, являясь прямыми по длине трубы, позволили экстраполировать давления к выходному отверстию из насоса, т. е. получить средние их значения на выходе из камеры нагнетания.

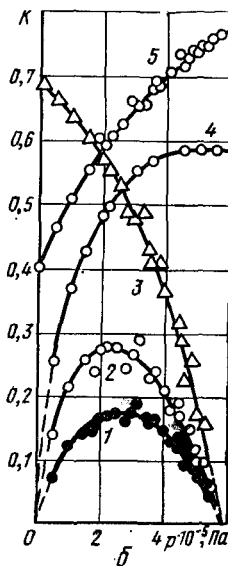
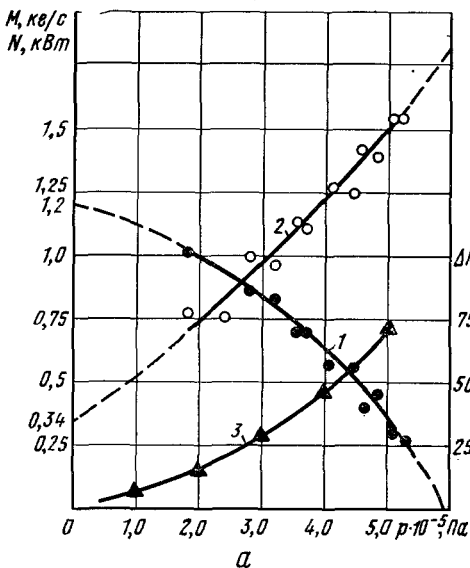


Рис. 82. Зависимость характеристик эксцентриково-лопастного насоса от давления нагнетания:

a — расходно-напорные характеристики: 1 — массовый расход; 2 — мощность; 3 — величина обратного перепуска; b — коэффициенты полезного действия насосов: 1 — общего; 2 — индикаторного; 3 — объемного; 4 — гидравлического; 5 — механического.

По экспериментальным данным, определены зависимости между массовым расходом, мощностью, развиваемой при вытеснении фарша, и давлением на выходе из камеры нагнетания. С увеличением давления до некоторого предельного, которое зависит от зазора между лопаткой и корпусом, расход равен нулю: у исследованного насоса $p_{\text{пред}} = 5,96 \cdot 10^5$ Па, $N_{\text{пред}} = 1,825$ кВт (рис. 82). У того же насоса после смены лопаток (величина зазоров около 0,2 мм) $p_{\text{пред}}$ увеличилось до $12 \cdot 10^5$ Па.

При $p=0$ ($l=0$) расход достигает максимального значения: $M_0 \approx 1,2$ кг/с при минимальной мощности $N_0 = 0,34$ кВт (см. рис. 82). Фарш через зазоры практически не просачивается, а мощность расходуется на преодоление внутренних сопротивлений и создание скорости истечения. Разница в значениях между теоретическим расходом $M_{\text{теор}} = 1,76$ кг/с и расходом M_0 при $p=0$ дает представление о степени заполнения фаршем

межлопаточных пространств, которая у исследуемого фаршенасоса составляет около 0,68. Кратность величин M и M_0 характеризует процентное соотношение «перепуска» фарша из зоны нагнетания в зону всасывания.

Полезную мощность, развиваемую насосом, вычисляли с учетом полученных экспериментальных данных по уравнению (VII—2). Поскольку известна мощность на валу насоса, общий к. п. д. рассчитывали по уравнению (VII—3). Вычисление объемного и механического к. п. д. также не представляет затруднений.

Анализ зависимостей экспериментальных данных показывает, что оптимальный диапазон давлений для вытеснителя около $2,8 \cdot 10^5$ Па (рис. 82, б). При работе с высокими давлениями общий к. п. д. снижается, вытеснитель работает «на себя», что приводит к интенсивному перетиранию фарша и быстрому износу рабочих органов, в первую очередь поверхности кулачок — лопатка. Оптимальному давлению соответствует оптимальная производительность (около 0,95 кг/с). В таком режиме фаршенасос может перекачивать фарш на расстояние до 6 м. Максимальное значение общего к. п. д. достигает 17,2%, а $K_{инд}$ — 27,5%. Величина K_V зависит от давления нагнетания и меняется от 68% при свободном истечении фарша до 0 при давлении до $6 \cdot 10^5$ Па. В области давлений $3,5 \cdot 10^5$ — $6,0 \cdot 10^5$ K_r изменяется незначительно, при более низких давлениях его величина резко понижается, стремясь к нулю.

Все характеристики зависят от степени износа рабочих органов фаршенасоса и меняются в процессе работы в весьма значительном интервале. Известно, что «перепуск» внутри насоса прямо пропорционален кубу зазора между ротором и корпусом и обратно пропорционален величине плоскости их сопряжения в первой степени. Сопряжение лопаток эксцентриково-лопастных насосов с корпусом осуществляется по небольшим поверхностям при существенной величине зазора, что и обуславливает неудовлетворительную работу в области высоких давлений. Для оценки влияния на к. п. д. величины зазоров предложен специальный критерий, который, однако, учитывает пульсацию и перепуски только для ньютоновских жидкостей.

Перепуск фарша через зазоры сказывается на величине его реологических свойств, которые были исследо-

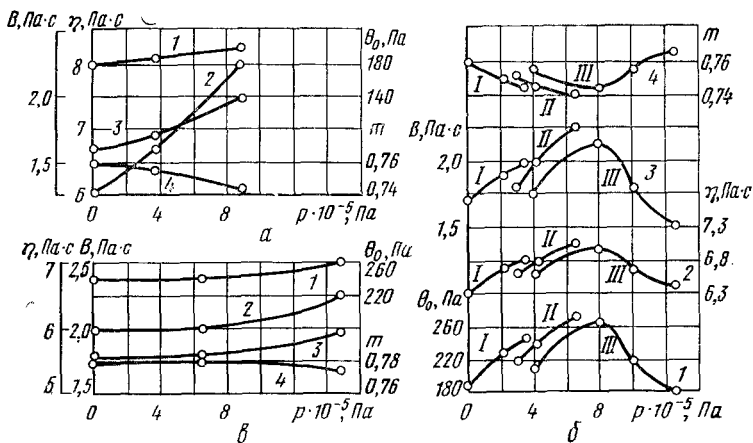


Рис. 83. Зависимость изменения структурно-механических свойств фарша от давления нагнетания, развиваемого насосами: а — эксцентриково-лопастной; б — двухвинтовой; в — роторно-поршневой; 1 — предельное напряжение сдвига; 2 — пластическая вязкость; 3 — эффективная вязкость при единичной скорости [по формуле (II-44)]; 4 — темп разрушения структуры; I — однократное прохождение через насос; II — двукратное; III — многократное.

ваны как функция этой величины для того же насоса после смены лопаток (зазоры уменьшены до 0,2 мм). С увеличением давления значения реологических свойств возрастают, что может быть обусловлено механической деструкцией тканей мяса. Следовательно, перетирание и перепуск фарша обнаруживаются не только прямыми измерениями по производительности, но и косвенными — по изменению величины реологических свойств (рис. 83).

Проведенные испытания показали весьма низкие значения к. п. д. исследуемого насоса (15—20%), а также неудовлетворительную его работу. Оптимальный режим работы насоса данного типоразмера: производительность 0,7—1,0 кг/с, давление $2 \cdot 10^5$ — $4 \cdot 10^5$ Па, частота вращения ротора 36 об/мин, тогда к. п. д. 0,15—0,17.

Испытания двухвинтового насоса были проведены в лабораторных и производственных условиях [134]. Теоретическую производительность насоса $M_{\text{теор}}$ (в кг/с) определили по его геометрическим размерам:

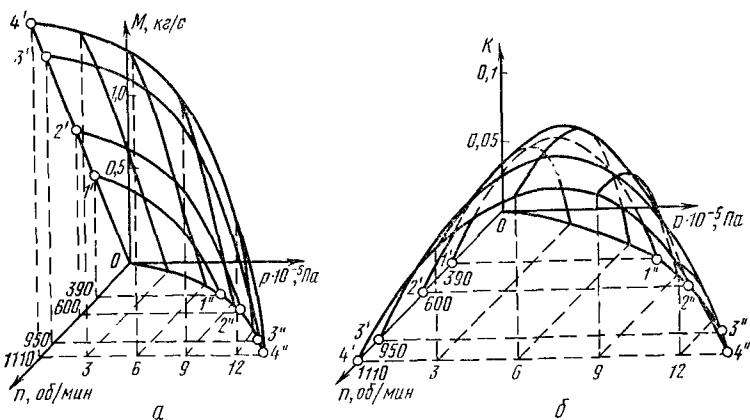


рис. 84. Зависимость характеристик двухвинтового насоса от давления нагнетания и частоты вращения винтов:

— производительность; б — общий к. п. д.

$$M_{\text{теор}} = \frac{\rho n}{240} h \left[\pi (D_{\text{н}}^2 - D_{\text{в}}^2) - D_{\text{н}}^2 \left(\alpha \frac{\pi}{180} - \sin \alpha \right) \right] =$$

$$= 3,9 \cdot 10^{-3} n, \quad (\text{VII-5})$$

где h — шаг винта, м ($h=0,036$ м);
 $D_{\text{н}}$, $D_{\text{в}}$ — паружный и внутренний диаметры винта соответственно,
 м ($D_{\text{н}}=0,125$ и $D_{\text{в}}=0,075$ м);
 α — угол пересечения винтов, определяемый из выражения.

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{D_{\text{н}} + D_{\text{в}}}{2D_{\text{н}}}$$

Основные показатели работы насоса при различной частоте вращения винтов приведены на рис. 84 и в табл. 63. Измерение и расчет мощности и к. п. д. выполнены по вышеприведенной методике. Полученные характеристики для двухвинтового фаршенасоса типичны для роторных насосов.

Зависимость секундной производительности от давления и частоты вращения (рис. 84, а) представляет собой криволинейную поверхность, ее пересечение с плоскостью $p-n$ выражает зависимость предельного давления от частоты вращения $p_{\text{пред}}$, когда $M=0$. На-

Частота вращения винтов, об/мин	Теоретическая производительность, кг/с	Действительная производительность при свободном истечении, кг/с	Максимальное значение объемного, к. п. д.	Мощность холостого хода, кВт	Мощность свободном течении $N (o, n)$ кВт
390	1,52	0,72	0,475	0,31	1,40
600	2,34	1,10	0,470	0,58	2,20
950	3,70	1,72	0,465	1,20	3,45
1110	4,35	2,02	0,465	1,60	4,05

пример, при 1110 об/мин и давлении в камере нагнетания $p = p_{\text{пред}} = 14 \cdot 10^5$ Па вытеснитель практически начинает работать «на себя», т. е. весь фарш, захваченный винтами, просачивается из камеры нагнетания в зону всасывания через зазоры между рабочими органами. Предельному давлению соответствуют предельные значения мощности (рис. 85, а).

При свободном истечении фарша производительность вытеснителя имеет максимальную величину при минимальной мощности. Однако понятие «свободное истечение» для этого насоса условно, поскольку торцевая крышка с патрубком создает существенное сопротивление: расчет давления на конце винтов по мощности свободного истечения (см. табл. 63) дает величину около $20 \cdot 10^5$ Па для всех скоростей вращения. Эта величина давления эффективная, она учитывает механическое трение, сопротивление структуры фарша, обратный перепуск и т. д. В названном режиме объемный к. п. д. практически не изменяется (см. табл. 63). Низкое значение к. п. д. объясняется наличием зазоров до 1 мм между винтами и статором и между винтовыми поверхностями, так как винты приводятся в действие от двух сопряженных шестерен. Большие зазоры обусловлены как сложностью изготовления рабочих поверхностей, так и быстрым износом. У торцевой крышки валы винтов помещены в конические подшипники скольжения, большие распорные усилия между винтами при вытеснении «защемленного» объема способствуют быстрой «выработке» подшипников и, следовательно, износу винтов.

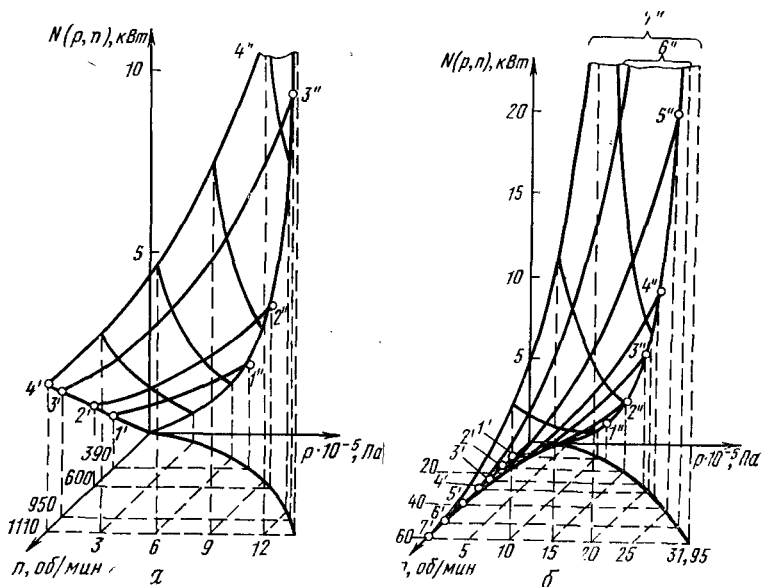


Рис. 85. Зависимость мощности, развиваемой на валу насоса (за вычетом мощности холостого хода), от давления нагнетания и частоты вращения ротора для:

а — двухвинтового насоса; б — роторно-поршневого насоса.

При увеличении частоты вращения при малых давлениях производительность растет быстрее, чем мощность (см. рис. 84, а и 85, а). Когда давление приближается к предельному значению, темп нарастания мощности опережает увеличение производительности, что влияет на к. п. д. вытеснителя, который резко уменьшается, приближаясь к нулю (рис. 84, б).

Двухвинтовой насос имеет сравнительно высокую частоту вращения винтов при максимальном к. п. д. Это обусловлено тем, что теоретическая производительность питательных шнеков в 7 раз выше, чем напорных винтов. В действительности до частоты вращения 800—900 об/мин производительность шнеков больше производительности напорных винтов даже с учетом того, что заполнение рабочего объема шнеков с увеличением частоты вращения уменьшается. При частоте вращения меньше 600 об/мин вследствие слишком большой произ-

водительности шнеков по сравнению с производительностью винтов происходит интенсивное мятие и перетиранье фарша в зоне питательных шнеков; на это расходуется значительная часть энергии, которая переходит в основном в тепловую. По сравнению с другими типами фаршенасосов у винтового более длинный путь прохождения фарша от захвата до камеры нагнетания и больший «перепуск» продукта из камеры нагнетания в зону всасывания через зазоры рабочих органов. Это является причиной резкого изменения структурно-механических свойств фарша в процессе перекачивания (см. рис. 83).

Повышение давления в нагнетательной линии сопровождается мтием и перетираньем фарша. Эти процессы ведут к расщеплению и «размочаливанию» волокон и частиц и возрастанию числовых значений структурно-механических свойств. Более продолжительное и интенсивное механическое, а следовательно, и тепловое воздействие на фарш приводит к глубоким изменениям его структуры, при этом темп разрушения структуры увеличивается, а реологические свойства фарша уменьшаются (см. рис. 83). В данном случае критическим является давление $8 \cdot 10^5$ Па на выходе из насоса, при превышении которого процессы ослабления прочности структуры становятся преобладающими. При испытании других насосов таких глубоких изменений структуры обнаружено не было.

Реологические исследования показывают, что насос обладает определенным гомогенизирующим эффектом.

Таким образом, проведенные испытания показали низкое значение к. п. д. двухвинтового насоса (до 14% в оптимальном режиме). В процессе работы он интенсивно мнет и перетирает фарш, изменяя тем самым его структуру и реологические свойства. В определенной мере целесообразно использовать насос для перекачки продуктов, которые требуется перетирать или пластифицировать. Оптимальный режим работы насоса данного типоразмера: производительность 1,3—1,6 кг/с, давление $5 \cdot 10^5$ — $8 \cdot 10^5$ Па, частота вращения 800—950 об/мин, к. п. д. 0,12—0,14.

Интересные исследования двухвинтового шприца В-101, разработанного Ленинградским мясокомбинатом, провели на Первом колбасном заводе [32] с целью опр

деления оптимальных конструктивных и технологических параметров шприца и разработки практических конструкторско-технологических рекомендаций.

Рабочие органы шприца — два составных шнека диаметром 0,074 м и длиной рабочей части 6Д — находятся во взаимном несилевом зацеплении. В движение их приводит асинхронный электродвигатель через цепной вариатор, клиноременную передачу и синхронизирующие шестерни. Частоту вращения шнеков изменяли от 300 до 900 об/мин. Конструктивно шнеки состоят из двух зон — питающей и дозирующей, это позволяет изменять шаг и число заходов отдельно каждой из зон.

Методика исследования принципиально не отличается от описанной выше. По величине вязкости, измеренной на вискозиметре «Реотест», все виды фарша (13 наименований) были разделены на три группы: первая — фарш для колбас молочной, столовой, докторской, отдельной, говяжьей, чайной, русской и любительской; вторая — для закусочной и телячьей; третья — для таллинской, ростовской и сервелата. Исследовали один вид фарша из каждой группы: из первой — для молочной колбасы, из второй — для закусочной, из третьей — для сервелата.

Из рис. 86 видно, что с увеличением давления на выходе производительность шнеков уменьшается: чем больше шаг шнеков, тем они более чувствительны к изменению давления. При открытом выходе из машины ($p=0$) максимальную производительность обеспечивают шнеки с шагом 0,064 м.

С возрастанием давления на входе в насадку расход фарша через нее увеличивается. При неизменном давлении чем больше диаметр выходной насадки (меньше коэффициент сопротивления), тем больше расход фарша через насадку. В данных исследованиях расход максимален при диаметре выходной насадки 0,038 м (см. рис. 86).

Очевидно, что каждой выходной насадке соответствуют некоторые оптимальные геометрические размеры шнека, обеспечивающие максимальную производительность. При совмещении расходно-напорных характеристик шнеков и выходных насадок в местах их пересечения определяют рабочие точки шприца: *A*, *B*, *C*, *D* (см. рис. 86). При выходной насадке диаметром 0,038 м

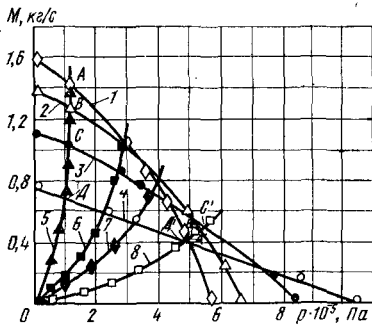


Рис. 86. Расходно-напорные характеристики с шагом:

1 — 0,064 м; 2 — 0,048; 3 — 0,036; 4 — 0,024 м и диаметром выходных насадок: 5 — 0,038; 6 — 0,022; 7 — 0,016; 8 — 0,010 м.

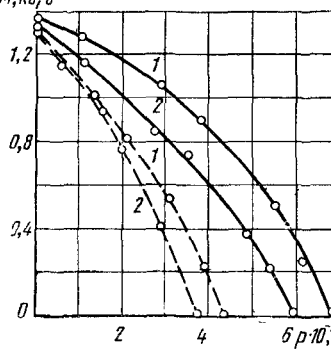


Рис. 87. Расходно-напорные характеристики однозаходных 1 и двухзаходных 2 шнеков с шагом 0,048 м при перекачке фарша закусочной (сплошные линии) и молочной (пунктирные линии) колбас

точка *A* будет определять режим работы шнека с шагом 0,064 м, *B* — 0,048 м, *C* — 0,036 м и *D* — 0,024 м. Шнек с шагом 0,064 м обеспечит наибольшую производительность.

С увеличением частоты вращения шнека и сопротивления выходной насадки возрастает потребляемая мощность. Эта мощность зависит от вязкости, понижаясь с уменьшением последней.

Производительность шприца возрастает с увеличением частоты вращения шнеков, причем это возрастание тем больше, чем меньше сопротивление выходной насадки. Одновременно можно сделать вывод, что вязкость фарша практически не влияет на производительность шприца при отсутствии сводообразования и заполнения рабочего объема шнека без пустот.

Однако чем больше вязкость фарша, тем выше давление в выходной насадке и, следовательно, тем больше затрачиваемая мощность. Это подтверждается графиками, изображенными на рис. 87, где кривая 1 соответствует кривой 2 на рис. 86. Из рис. 87 видно также, что двухзаходные шнеки при прочих равных условиях более чувствительны к изменению давления на выходе из шприца. Это можно объяснить увеличением общей площади боковых зазоров в зацеплении нагнетающих двухзаходных шнеков, что приводит к возрастанию обратно-

го потока. Кроме того, если число заходов шнека увеличивается, то возрастает общая площадь соприкосновения фарша с его лопастями. За счет этого увеличивается энергия, затрачиваемая на трение между лопастями и фаршем, и, как следствие, фарш перетирается, его качество снижается, а коэффициент полезного действия шнека уменьшается.

В результате исследований экспериментально установлена связь между геометрическими, силовыми параметрами, режимом работы двухшнекового шприца и реологическими свойствами перерабатываемого фарша.

Рекомендуются следующие оптимальные конструктивные и технологические параметры работы двухшнекового шприца: шнек однозаходный с шагом 0,064 м и диаметром 0,074 м; частота вращения шнеков 600—700 об/мин, давление формования $(3 \div 4) 10^{-5}$ Па (для фарша первой и второй групп), $(5 \div 7) 10^{-5}$ Па (для фарша третьей группы).

Роторно-поршневой насос испытывали на Московском мясокомбинате [122]. Графо-аналитической обработкой экспериментальных данных были получены основные зависимости работы роторно-поршневого фаршенасоса, развернутые в пространственных координатах по давлению и частоте вращения по аналогии с графиком, изображенным на рис. 84. На рис. 88, а представлена расходная характеристика, которая описывается уравнением

$$(p \cdot 10^{-6})^2 + (M - 0,023n + 1)^2 = (0,038n + 1)^2. \quad (\text{VII}-6)$$

Линиями $1'-1''$, $2'-2''$ и т. д. выражают зависимость $M(p)$ при постоянной частоте вращения, пересекающие их кривые дают зависимость $M(n)$ при постоянном давлении на выходе из камеры нагнетания. Кривая $M(n)$ при давлении равном нулю, получена при свободном истечении фарша из насоса. Для этого случая уравнение (VII—6) приводится к виду

$$M_0 = 0,061n. \quad (\text{VII}-6a)$$

При свободном истечении обратный перепуск фарша практически отсутствует, полезная энергия расходуется на создание скорости истечения, преодоление внутренних сопротивлений структуры фарша и внешнего трения между фаршем и корпусом. Таким образом, экспери-

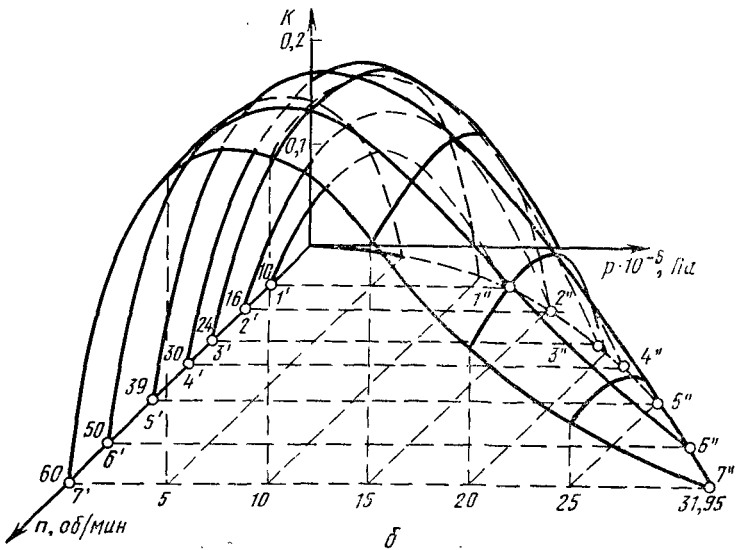
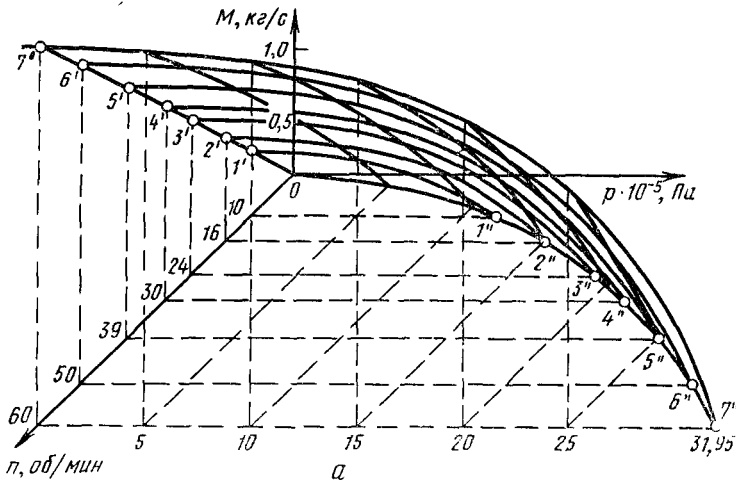


Рис. 88. Зависимость характеристик роторно-поршневого насоса от давления нагнетания и частоты вращения роторов:
 а — производительности; б — общего к. п. д.

ментальная линия $I'-7'$ приближается к зависимости $M_{\text{теор}}(n)$. $M_{\text{теор}}$ (в кг/с) — теоретическая производительность, которая, исходя из геометрических соображений, равна произведению объема между коаксиальными цилиндрами на частоту вращения n (в об/мин) и плотность ρ (в кг/м³):

$$M_{\text{теор}} = \frac{\rho n}{240} \pi b (D_n^2 - D_o^2) = 0,073n, \quad (\text{VII}-7)$$

где D_n — наружный диаметр поршня, м ($D_n=0,2$ м);
 D_o — диаметр оси, м ($D_o=0,11$ м);
 b — ширина поршня, м ($b=0,2$ м);
 ρ — плотность фарша, кг/м³ ($\rho=1000$ кг/м³).

Разность $M_{\text{теор}} - M_0 = 0,012n$ при постоянной частоте вращения характеризует степень заполнения рабочих полостей насоса. С увеличением частоты вращения степень заполнения уменьшается, так как образующийся после прохождения поршня свод фарша не успевает оседать и целиком заполнять рабочую полость между поршнями. При давлении, равном нулю, т. е. при свободном истечении, коэффициент заполнения, исходя из зависимостей (VII-6a) и (VII-7) будет определяться соотношением

$$\lambda = \frac{M_0}{M_{\text{теор}}} = \frac{0,061n}{0,073n} = 0,835,$$

т. е. не зависит от частоты вращения. Прямая по уравнению (VII-6a) аппроксимирует действительную кривую $I'-7'$ на рис. 88, а, давая завышенный на 2% результат при $n=60$. При 80—100 об/мин и более аппроксимация кривой $I'-7'$ неверна, так как в этой области зависимость $M_0(n)$ криволинейна. Полученная максимальная ошибка 2% для исследованной области частоты вращения не имеет сколько-нибудь существенного значения, в то время как аппроксимация значительно упрощает расчетные зависимости.

При увеличении давления производительность понижается, стремясь к нулю. При $M=0$ в камере нагнетания создаются предельные давления $p_{\text{пред}}$. С увеличением частоты вращения возрастает $p_{\text{пред}}$ (см. рис. 88, а, кривая $0-I''-7''$); эта зависимость описывается уравнениями при $M=0$ и $p=p_{\text{пред}}$:

$$p_{\text{пред}} = 3,02 \cdot 10^4 \sqrt{n(n+134)}. \quad (\text{VII}-8)$$

Мощностную характеристику $N(p, n)$ снимали одновременно с расходной и вычисляли по выражению (VII—1). Зависимость развиваемой мощности от давления и частоты вращения показана на рис. 85, б. В общем случае мощность на холостом ходу зависит от p и n . Однако получить зависимость $M_{x,x}(p)$ невозможно, поэтому для всех расчетов выведена зависимость $N_{x,x}(n)$, которая имеет S-образный характер, интенсивно увеличиваясь при $n=0 \div 15$ и $n > 55$:

n , об/мин	5	10	16	24	30	39	50	60
$N_{x,x}$, кВт	1,05	1,33	1,53	1,65	1,74	1,93	2,19	2,53

Для достижения наибольшего значения механического к. п. д. не следует выходить за пределы $20 < n < 55$.

При работе насоса «на себя», т. е. при закрытом кра-не на напорном трубопроводе, он развивает предельную мощность $N_{\text{пред}}$ (в кВт), которая выражается зависимостью, справедливой при $p_{\text{пред}} \leq 26,4 \cdot 10^5$:

$$N_{\text{пред}} = 24 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{p_{\text{пред}} \cdot 10^{-5}}{26,4} \right)^2} \right]. \quad (\text{VII—9})$$

При сравнении мощностных характеристик для двухвинтового (см. рис. 85, а) и роторно-поршневого (см. рис. 85, б) насосов установлено некоторое различие между ними при давлении, равном нулю, т. е. при свободном истечении. Для этого случая у двухвинтового насоса мощность сильно возрастает при увеличении частоты вращения, что обусловлено значительными сопротивлениями при выходе из зоны нагнетания в напорный трубопровод. У роторно-поршневого насоса эти сопротивления невелики, поэтому мощность с увеличением частоты вращения повышается незначительно (см. рис. 85, б подъем линии 0—1'—...—7' практически незаметен). На схемах, изображенных на рис. 79, г и 80, в, отчетливо видна разница в конструкциях входовых сопротивлений.

В совокупности расходная и мощностная характеристики позволяют с учетом мощности холостого хода рассчитать и построить зависимость $K(p, n)$ (см. рис. 88, б). Коэффициент подачи автоматически учитывается объемным к. п. д. Здесь не выделены отдельно составляющие общего к. п. д., так как в итоге именно он является основным для технических расчетов. Наиболь-

шее значение общего к. п. д. исследованного фаршенасоса 0,32—0,33. При $p=0$ и $p=p_{\text{пред}}$ общий к. п. д. равен нулю, предельная кривая 0—1''—2''—7'' описывается уравнением (VII—8). Как видно из рис. 88, б, рациональная область работы насоса ограничивается значениями:

$$p = (4 \div 14) 10^5 \text{ Па}, \quad n = 35 - 60 \text{ об/мин},$$

хотя увеличение p до $(20 \div 22) 10^5$ дает значения общего к. п. д., примерно равные к. п. д. эксцентриково-лопастного насоса в оптимальном режиме работы. Криволинейная поверхность $K(p, n)$ описывается зависимостью

$$K = 0,156 + 0,17 \cos [7,5 (p \cdot 10^{-5} - 9)] - 0,4 \cdot 10^{-7} (p \cdot 10^{-5})^2 \times \\ \times |n - (47 + 0,0135 |p \cdot 10^{-5} - 16|^3)|^3. \quad (\text{VII—10})^*$$

Анализ уравнения (VII—10) позволяет найти оптимальные параметры работы фаршенасоса. Необходимое давление на выходе зависит от диаметра и длины трубопровода, расхода и реологических свойств фарша. Для вычисленного по этим показателям давления можно найти оптимальную частоту вращения $n_{\text{опт}}$ (в об/мин) при экстремальном значении общего к. п. д., т. е.

$$\frac{\partial K}{\partial n} = 0.$$

Дифференцирование и решение уравнения (VII—10) относительно n дает расчетную формулу

$$n_{\text{опт}} = 47 + 0,0135 |p \cdot 10^{-5} - 16|^3. \quad (\text{VII—11})$$

Полную мощность, развиваемую на валу фаршенасоса, можно определить по зависимости (VII—3) с учетом уравнения (VII—2):

$$N_{\text{р.х}} = \frac{pM(p, n)}{10^6 \rho_{\text{отн}} K}, \quad (\text{VII—12})$$

где p , $M(p, n)$, K — определяют по графикам или соответствующим аналитическим зависимостям.

При этом для транспортировки фарша желательно выбирать оптимальный диаметр фаршепровода.

* Прямые скобки показывают, что числа берут по абсолютному значению; косинус определяют по числу в квадратной скобке в градусах.

Все полученные аналитические зависимости для мощности и общего к. п. д. справедливы в области $p = (3 \div \div 22) 10^5$ Па, а если $n \leq 30$, то при $p \leq 0,85 p_{\text{пред}}$. Общая ошибка аналитических зависимостей не превосходит $\pm 15\%$, ошибки экспериментов укладываются в $\pm 8\%$. Оптимальные параметры работы насоса данного типоразмера: общий к. п. д. 0,32—0,33; производительность 2,3—3,5 кг/с при частоте вращения соответственно 40—60 об/мин; давление $(7 \div 12) 10^5$ Па; мощность на валу насоса до 11 кВт. Эти характеристики получены для насоса, размеры которого приведены в пояснении к зависимости (VII—7). Испытания насоса с другими рабочими размерами показали аналогичные результаты по оптимальной зоне давлений, величинам к. п. д., частоте вращения; производительность, естественно, была иной, и величина ее удовлетворительно определяется по уравнению (VII—7) с учетом коэффициента подачи.

Одновременно с основными испытаниями проводили реологические исследования фарша, взятого на выходе из насоса при различном давлении нагнетания (см. рис. 83). Величины свойств начинают изменяться при давлении около $10 \cdot 10^5$ Па и выше, т. е. в области за оптимальным режимом, где к. п. д. начинает уменьшаться (см. рис. 88, б). Уменьшение к. п. д. как отмечено, в частности, связано с обратным перепуском, увеличение величин реологических свойств — с перетираем фарша. Поскольку области перегиба кривых на этих двух графиках совпадают, то показатель изменения величин свойств может служить важной и даже априорной характеристикой работы насоса. Из графика изменения числовых значений свойств (см. рис. 83) видно также, что насос не мнет и не перетирает фарша включительно до области оптимальных режимов и поэтому может быть использован для перекачки фарша со шпиком для вареных колбас.

Органолептическая оценка этих видов фарша после перекачки подтвердила сделанные заключения.

При испытаниях установки насос — труба получили количественные данные о внутреннем массопереносе компонентов фарша. В табл. 64 приведены результаты химического анализа проб фарша, взятого на различных расстояниях от насоса и в различных местах поперечного сечения после того, как установка проработала 1 ч. Из таблицы видно, что содержание жира в пристенном слое наибольшее, белка — наименьшее.

С увеличением длины трубы «расслаивание» увеличивается. На качестве продукта это существенно не отражается, так как толщина пристенного слоя (около 3 мм) составляет примерно 10% всего живого сечения потока. Эти исследования подтверждают высказанные выше соображения об отложении жира на внутренней поверхности трубы, на поверхности ротора вискозиметра и пр.

Место отбора проб фарша	Средняя скорость, м/с	Содержание, %			
		влаги	жира	белка	зола
Бункер	—	67,84	18,20	11,54	2,42
Ядро потока—8,35 м от насоса	0,49	67,80	17,90	11,90	2,40
Ядро потока—19,1 м от насоса	0,30	67,52	17,40	12,68	2,40
Пристенный слой—19,1 м от насоса	0,30	67,49	19,30	10,78	2,43
Промежуточный слой—19,1 м от насоса	0,30	68,33	17,70	11,51	2,46

Таким образом, испытания показали, что роторно-поршневой насос имеет ряд конструктивных преимуществ, которые обеспечивают неизменность числовых значений реологических свойств фарша при сравнительно высоком давлении нагнетания и наиболее высокий к. п. д. по сравнению с другими фаршенасосами. Результаты испытаний и полученные по ним аналитические зависимости выявили взаимосвязь основных параметров, характеризующих работу насоса, и позволили установить оптимальные режимы его работы. В табл. 65 приведены характеристики некоторых насосов, которые при их расчете и проектировании можно принять за основные.

Исследование пульсаций давлений на выходе из на-

Т а б л и ц а 65

Фаршенасос	Наибольшее давление, Па	Оптимальный режим		
		давление, Па	общий к. п. д.	частота вращения, об/мин
Эксцентриково-лопастной	$15 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	0,15	40
Двухвинтовой	$20 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	0,12	800
Роторно-поршневой (кулачковый)	$30 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^5$	0,26	60
Шестеренчатый	$20 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	0,15	20

Примечание. У насосов различных типоразмеров значения параметров могут отличаться от приведенных до $\pm 50\%$ в зависимости от степени износа и точности подгонки сопряженных деталей. Наиболее вероятны отклонения по величинам давлений и к. п. д. в сторону уменьшения.

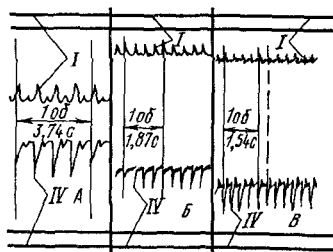
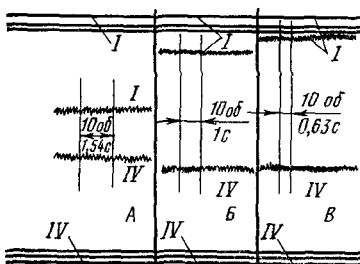
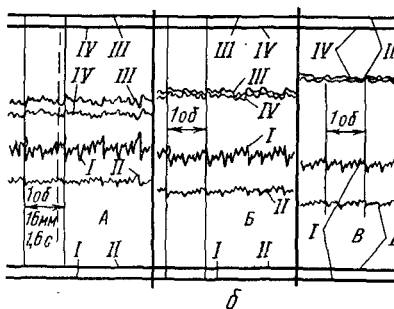
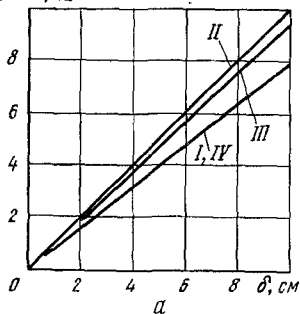
$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$ 

Рис. 89. График:

a — тарировки месдоз; *б, в, г* — осциллограммы работы насосов; *б* — эксцентриково-лопастной насос (36 об/мин): месдозы установлены на расстоянии от насоса: *I* — 0,3 м; *II* — 2,55; *III* — 2,68; *IV* — 3,33 м; общая длина трубопровода: *A* — 12,15 м; *B* — 9,45; *B* — 8,05 м; *в* — двухвинтовой насос; месдозы установлены на расстоянии от насоса *IV* — 0,3 м; *I* — 3,0 м; частота вращения винтов: *A* — 390 об/мин; *B* — 600; *B* — 950 об/мин; *г* — роторно-поршневой насос; месдозы установлены на расстоянии от насоса *IV* — 0,3; *I* — 3,0; частота вращения роторов: *A* — 16 об/мин; *B* — 32; *B* — 39 об/мин. (Римскими цифрами обозначены номера месдоз; одинаковыми цифрами на осциллограммах обозначены кривая записи давления и базисная линия).

гнетательных камер насосов [53] было предпринято в связи с тем, что в ряде случаев необходимо иметь равномерную подачу продукта.

Пульсацию давлений оказалось возможным изучить благодаря применению тензометрических датчиков давления с записью сигнала на ленте осциллографа. Исследования проводили для трех типов насосов в различных режимах работы. Типичные осциллограммы записей давлений для каждого насоса показаны на рис. 89, также приведен график тарировки соответствующих месдоз.

(обозначены римскими цифрами). На осциллограммах рисунка выделены области, соответствующие одному или десяти оборотам ротора.

Для эксцентриково-лопастного насоса в выделенной области ясно различимы пульсации от каждой лопасти, причем для любой месдозы линии пульсации подобны. Величины пульсаций обусловлены размером зазора между лопаткой и статором: чем меньше зазор, тем больше пульсация. Через каждый оборот ротора картина повторяется. По длине трубы амплитуда пульсаций уменьшается, например по осциллограмме А (рис. 89, б) наибольшие величины амплитуд пульсации показаны в табл. 66. На исследованном участке трубы пульсации

Т а б л и ц а 66

Показатели	Величины показателей для месдоз			
	I	II	III	IV
Отклонение зайчика, см				
наибольшее	6,00	3,85	3,80	3,80
наименьшее	5,00	3,40	3,40	3,40
Величина давлений $p \cdot 10^{-5}$, Па				
наибольшая	4,80	3,90	3,60	3,05
наименьшая	4,00	3,45	3,25	2,75
Величина пульсации $p \cdot 10^{-5}$, Па	0,80	0,45	0,35	0,30
Расстояние месдозы от насоса, м	0,30	2,55	2,68	3,33

давления аппроксимируются прямой, хотя вполне вероятно, что на конце трубы не доходят до нуля.

По осциллограммам подсчитана скорость распространения волны сжатия — около 50 м/с. Ее рассчитывали по времени запаздывания соответствующего пика давления у следующей месдозы. Одна и та же волна на осциллограмме А соединена пунктирной линией между датчиками I и II. Величина амплитуды пульсации связана также с давлением в начале трубы: чем больше давление (общая длина трубы), тем больше амплитуда, что видно из сравнения осциллограмм А, Б, В.

Для двухвинтового насоса на осциллограмме давления на один оборот имеется одна пульсация давления. Величины пульсаций незначительны — около 5%, но не превышают 10%. Из осциллограммы видно, что насос

работает стабильно, но отдельные пульсации не точно повторяют друг друга, и средняя линия давления не является прямой.

Роторно-поршневой насос обеспечивает устойчивую во времени подачу на всех по частоте вращения режимах работы. На один оборот насос выдает четыре дозы — по числу поршней, что напоминает подачу поршневого насоса. Месдозы в начале и конце трубы дают подобные кривые, волна сжатия (пунктирная линия на осциллограмме *B*) распространяется со скоростью примерно 50 м/с, и пульсации по длине трубы затухают. С увеличением частоты вращения длительность цикла сокращается, а пульсации уменьшаются. Наиболее равномерная подача, как видно из рис. 89, *г*, наблюдается при 32 об/мин. В остальном осциллограммы принципиально не отличаются от полученных для других насосов.

Таким образом, величина и характер пульсаций определяют выбор типа насоса в зависимости от вида перерабатываемого продукта и сущности технологического процесса, осуществляемого насосом: транспортировка, дозирование, шприцевание и т. д.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПНЕВМОГИДРОТРАНСПОРТИРОВКИ ПРОДУКТОВ

При проектировании систем пневмогидротранспортных трубопроводов предусматривают следующее: устройство индивидуальных трубопроводов для каждого вида транспортируемого материала и блоутанков вертикальной конструкции с расчетом их на прочность сосудов, работающих под давлением; расширение номенклатуры продуктов, транспортируемых методом непрерывного пневмогидротранспорта; разработку прибора для измерения и записи давления в процессе движения продуктов; исключение подводки электрического тока с целью внедрения автоматики на пневматическом приводе; создание испытательного стенда для исследования процесса пневмогидротранспортировки продуктов первичной переработки скота; разработку методики расчета пневмогидротранспорта на основе экспериментальных данных, полученных на испытательном стенде [36].

На Дзержинском мясокомбинате успешно действуют шесть передувных линий, на Горьковском — четыре. П

этим линиям транспортируют на расстояние до 250 м в зависимости от назначения, расположения цехов и отделений, мездровый жир, техническую и пищевую кровь, кишечный полуфабрикат, жир-сырец (табл. 67). На

Таблица 67

Транспортируемый продукт	Диаметр трубопровода,	Давление воздуха в блоутанке $P \cdot 10^{-5}$, Па	Степень разбавления продукта водой, %	Вместимость блоутанка, м ³	Высота подъема, м	Общая длина трубы, м	Потери давления на единицу длины трубы, Па/м
Технические отходы	0,15—0,20	3,0—4,0	10—15	0,5—1,0	10	250	1200
Жир мездровый	0,10	2,5—3,0	—	0,1—0,2	10	50	4000
Кровь пищевая	0,04	0,4—1,0	—	0,05	3	120	900
техническая	0,06	1,5—1,7	—	1,0—1,5	10	60	1100
Шквара	0,07	2,0—3,5	—	0,1—0,15	10	100	2600
Кишечные комплекты (свинные и бараньи)	0,13—0,15	2,0—2,5	10	0,1—0,15	—	50	5000
Каньга	0,15	1,5—2,5	20	1,0—2,5	10	60	2600
Кишечный полуфабрикат	0,10—0,13	1,0—1,5	20	0,1—0,15	—	—	2000

основе эксплуатации этих линий в течение последних лет и исследований на экспериментальном стенде определены ориентировочные конструктивные и рабочие параметры транспортных установок для перемещения продуктов первичной переработки скота (см. табл. 67) [36].

Один из основных параметров работы установок — величина давления — зависит от диаметра трубопровода, числа отводов горизонтального и вертикального направлений, вместимости блоутанка, расстояния транспортировки. В процессе эксплуатации давление легко корректировать: его верхний предел соответствует течению продукта по трубопроводу без кавитации и истечению в конце трубы без значительных хлопков и выбросов из приемной емкости; нижний предел должен быть

больше суммы потерь давления в месте входа продукта из блоутанка в трубу и потерь на транспортировку для исключения «завала» линии. За процессом передувки следят по манометру: давление в блоутанке линейно увеличивается до рабочего и в процессе транспортировки остается практически постоянным, по окончании передувки оно резко падает до $(0,3 \div 0,2) 10^5$ Па в зависимости от диаметра и длины трубопровода.

Для ориентировочных расчетов потерь давления Δp (в Па) можно применять формулу

$$\Delta p = k (\rho l + \rho gh), \quad (\text{VII}-13)$$

где k — коэффициент запаса; $k=1,1 \div 1,3$ (при меньшем значении диаметра и большом числе местных сопротивлений до 1,5—1,9);

ρl — потери давления на единицу длины прямой трубы Па/м (табл. 67);

l — длина трубопровода, м;

ρ — объемная масса перемещаемого продукта, кг/м³;

g — ускорение силы тяжести ($g=9,8$ м/с²);

h — высота подъема продукта, м.

Основные конструктивные части пневмогидротранспортных линий — передувочные блоутанки и рабочие транспортные трубопроводы. Пневматические блоутанки служат для введения продукта в трубопровод и обеспечения давления воздуха, необходимого для перемещения продукта по трубопроводу. При этом для передувки все продукты наиболее надежными оказались вертикальные блоутанки с коническими днищами. Их емкость составляла от 0,06 до 1,5 м³ и определялась производительностью соответствующего технологического участка, т. е. количеством продукта, который перемещается за один рабочий цикл. Непосредственно в процессе передувки сжатый воздух через водяную подушку двигает вперед себя «материальный поршень», состоящий из продукта и воды. Его длина зависит от вместимости блоутанка и диаметра транспортного трубопровода. Чем больше вместимость блоутанка и, следовательно, объем загрузки, тем больше длина поршня и рабочее давление, необходимое на преодоление сил инерции, трения и местных сопротивлений. Скорость движения материального поршня составляет 0,8—1,2 м/с.

Схема движения материального поршня показана на рис. 90, а. Если продукт попадает в закрытый резервуар, должны быть предусмотрены устройства для отвод

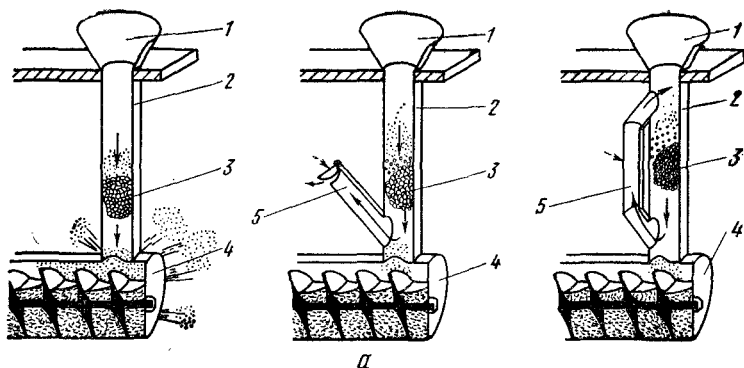
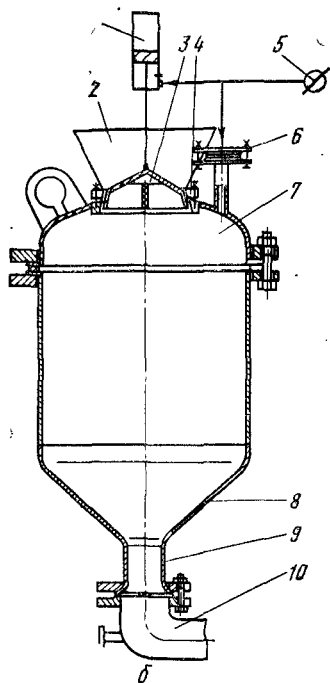


Рис. 90. Принципиальные схемы устройств для транспортировки продуктов гравитационным и пневмогидравлическим способами:

а — движения «материального поршня»: 1 — загрузочная горловина; 2 — трубопровод; 3 — «материальный поршень»; 4 — аппарат; 5 — устройство для ликвидации пневматического удара; *б* — блоутанк: 1 — пневмоцилиндр; 2 — приемная воронка; 3 — запорный конус; 4 — фланец; 5 — воздушный кран; 6 — штуцер ввода воздуха; 7 — съемная крышка; 8 — корпус; 9 — загрузочная горловина; 10 — трубопровод.



избытка воздуха. Если резервуар открытый, то необходимо установить ловушки, которые бы предотвращали выброс продукта из него.

Для исключения дополнительных операций, выполняемых вручную, воздух из пневматической системы подают через кран в блоутанк и одновременно под пошень пневмоцилиндра с запорным конусом (рис. 90, б). На блоутанке установлены приборы контроля и безопасности: манометр и предохранительный клапан, отрегулированный на давление, превышающее рабочее на $(0,4 \div 0,5) 10^5$ Па. С целью обеспечения вертикальной поточности и сокращения ручных операций при загрузке сырья в аппарат блоутанки монтировали ниже источника сырьем.

Трубопровод — основная часть пневмогидротранспортной системы; его диаметр зависит от вида транспортируемого материала (см. табл. 67). Все соединения должны быть герметичны, местные сопротивления минимальны, а износ- и вибростойкость высоки. Для установок по перемещению пищевых продуктов применяли трубы из нержавеющей стали, для технических отходов — из черных металлов. Для обеспечения герметичности и уменьшения сопротивления трубопровода особое внимание обращали на тщательность соединений труб сваркой и фланцами с паронитовыми прокладками, которые устойчивы к действию высоких температур при мойке и стерилизации трубопровода горячей водой или паром. Линию трубопровода прокладывали по кратчайшему пути, избегая искривлений. При подаче транспортируемого продукта на высоту участка подъема трубопровода располагали ближе к блоутанке.

Транспортный трубопровод часто меняет свое направление в горизонтальной и вертикальной плоскостях, поэтому большое влияние на потери давления оказывают радиусы его изгибов. Первоначальные результаты экспериментов показали, что следует ориентироваться на величину отношения радиуса поворота (изгиба) диаметру трубы, которая должна быть для жидких продуктов не менее трех, мажеобразных и мелкокусковых — не менее пяти, для крупнокусковых — не менее семи. При таких соотношениях потери давления незначительны. Отводы с выбранным радиусом изготавливали на трубогибочном станке. После монтажных работ

транспортную систему опрессовывали под давлением на 25% больше, чем в воздушном ресивере.

Для управления процессом и выбора оптимального режима транспортировки разработали датчик давления, с помощью которого измеряли и записывали давление в блоутанке и трубопроводах.

При разбавлении транспортируемого продукта водой значительно снижается рабочее давление перемещения, но уменьшается производительность линии. Разбавление наиболее эффективно при незначительном перемешивании компонентов (воды и продукта) перед передуванием или при одновременной подаче их в блоутанк. В первом случае продукт передувает из емкостей со встроенными механическими мешалками, во втором — вода поступает одновременно с транспортируемым продуктом в блоутанк и частично — в трубопровод. На водопроводе желательно устанавливать водомеры, а продукты дозировать по объему.

В начале работы транспортной линии необходимо передувать через трубопровод в летний период холодную воду, а в зимний — горячую. В конце работы следует промыть трубопровод горячей водой и подсушить его воздухом в течение 5—10 мин.

Продукты первичной переработки скота транспортируют следующим образом: материал загружают в блоутанк через приемную воронку (рис. 90). Одновременно в нее поступает вода из водопровода в заданном соотношении. В момент наполнения блоутанка (70—80%) загрузку прекращают. Открывают кран на воздушной линии и подают одновременно сжатый воздух в блоутанк и пневматический цилиндр механической герметизации блоутанка.

В процессе эксплуатации пневмогидротранспортных линий могут быть следующие основные неполадки в системе: «завалы» транспортного трубопровода из-за попадания посторонних предметов, снижение в момент транспортировки давления воздуха по сравнению с рабочим; значительные утечки воздуха из блоутанка по периметру запорного конуса; выход из строя пневмоцилиндра.

Для предотвращения попадания посторонних предметов в блоутанк крупнокусковые отходы убоя скота, транспортируемые в цех сухих кормов, измельчают.

Для ликвидации «завалов» в начале магистрального трубопровода устанавливают штуцер на фланцевом соединении для поддува воздуха в осевом направлении движения сырья. Для ликвидации утечек воздуха между фланцами прокладывают эластичную резину толщиной 5—7 мм. Все участки транспортных линий, находящиеся вне отапливаемых помещений, изолируют. При неудовлетворительной работе пневмоцилиндра его разбирают, заменяют манжеты, зеркало цилиндра смазывают машинным маслом.

Эксплуатация пневмогидротранспортных линий проста и безопасна при соблюдении требований инструкции. Она не требует высокой квалификации работающих. Линии позволили механизировать процесс транспортировки продуктов первичной переработки скота. В табл. 68 показана

Таблица 68

Цех	Уровень механизации, %			
	до внедрения линии (1973 г.)		после внедрения линии (1975 г.)	
	всего	транспортных операций	всего	транспортных операций
Убойный	49,5	64,7	55,0	64,7
Кишечный	27,3	3,8	42,3	27,9
Жировой	66,9	5,4	72,9	31,8
Сухих кормов	62,9	17,0	87,0	83,6
Все цехи первичной переработки	54,7	50,4	63,6	70,8

уровень механизации транспортных операций в процентах от общего уровня механизации по основным производствам первичной переработки скота Горьковско-мясокомбината № 2.

По сравнению с другими видами транспорта, применяемого в цехах первичной переработки скота, пневмогидросистемы имеют большую сменную производительность, дают возможность производить транспортировку даже в стесненных условиях производственных помещений, позволяют устранить потери продуктов в результате герметичности их перемещения, улучшают санитарно-гигиеническое состояние цехов и отделений, надежны в эксплуатации из-за отсутствия движущихся частей и узлов, создают возможность автоматизации транспортировки.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ФАРША

I. Исходные параметры

Вид фарша — говядина куттерованная

Производительность — 3000 кг, мясо измельчается на куттере, масса одной загрузки — 150 кг, за смену вырабатывается — 20 загрузок. Длительность перекачки одной загрузки примерно в два раза меньше времени куттерованья, т.е. 380 с, что в смену составит 2,1 часа. По формуле (VI—21) получаем $M_c = 0,3968$ кг/с.

При производительности 9000 кг и времени 6,3 ч — на 2 или 3 куттера M_c остается без изменений.

3. Общая длина трубопровода — 6 м.

II. Выбираемые параметры

Принимаем среднюю скорость 0,3 м/с (с последующей проверкой).

III. Расчетные параметры

1. Секундный объемный расход по формуле (VI—22):

$$V_c = \frac{0,3968}{1020} = 3,88 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Плотность принята 1020 кг/м³.

2. Диаметр трубопровода по формуле (VI—23):

$$d_o = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,88 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,3}} = 40,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

По ГОСТу или по имеющемуся в наличии размеру, принимаем $= 35,4 \cdot 10^{-3}$ м (величину диаметра следует брать несколько заниженной — на доли мм по сравнению с условным диаметром прохода по ГОСТу, учитывая, что происходит осаливание труб).

Тогда действительная скорость по (VI—24):

$$W = \frac{4 \cdot 3,88 \cdot 10^{-4}}{3,14(35,4 \cdot 10^{-3})^2} = 0,395 \text{ м/с.}$$

3. Коэффициентная переменная — «градиент скорости» по формуле (VI—25а):

$$\dot{\epsilon}_* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_1} = \frac{8,0,395}{1,35,4 \cdot 10^{-3}} = 89,3 \text{ с}^{-1}.$$

4. Консистентная переменная — «напряжение сдвига» по формуле (VI—26) или по графику рисунка 75:

$$\theta = 600 \cdot 89,3^{0,27} = 2015 \text{ Па},$$

где 600 и 0,27 взяты из таблицы 58.

5. Потери давления по формуле (VI—27):

$$p = \frac{4 \cdot 6 \cdot 2015}{35,4 \cdot 10^{-3}} = 13,68 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

6. Полезная мощность по формуле (VI—31):

$$N = 13,68 \cdot 10^6 \cdot 3,88 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} = 0,503 \text{ кВт}.$$

По п. 5 (см. главу VII) видно, что при таком давлении насос не работает в оптимальном режиме. Кроме того, высокое давление будет способствовать перетиранью фарша, т.е. ухудшению его качества. В связи с этим целесообразно уменьшать давление нагнетания. Это возможно путем увеличения длительности работы насоса, либо установкой трубы большого диаметра.

Пересчет по другому диаметру

III—2. Устанавливаем трубы с внутренним диаметром 49×10^{-3} м. Тогда $W = 0,206$ м/с.

III—3. Консистентная переменная: $\dot{\epsilon}_* = 33,7 \text{ с}^{-1}$.

III—4. Консистентная переменная: $\theta = 1550 \text{ Па}$.

III—5. Потери давления: $p = 7,59 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

III—6. Полезная мощность: $N = 0,295 \approx 0,3 \text{ кВт}$.

IV. Выбор оборудования

1. Насос устанавливают из имеющегося в наличии, руководствуясь данными главы VII, например, эксцентриково-лопастной. Так как давление больше оптимального, следовательно, КПД снижается, принимаем КПД 0,12.

2. Мощность двигателя по формуле (VI—32):

$$N_{\text{эд}} = \frac{1,2}{0,6} \cdot \frac{1,3}{0,12} = 5 \text{ кВт},$$

где 1,2 — коэффициент запаса мощности;

0,6 — КПД передач;

0,3 — полезная мощность;

0,12 — КПД насоса;

питаемые устройства с механическим (или другим) приводом отсутствуют.

Аналогично выполняются расчеты трубопроводов для других продуктов. Если в таблицах 13 и 58 отсутствует наименование продукта, для которого необходимо рассчитать трубопровод, то следует выполнить вискозиметрические исследования с помощью ротационного вискозиметра. В зависимости от вида кривой течения выбрать ту или иную расчетную формулу с учетом диапазона и следованных градиентов скорости.

Приложение II

Соотношение между единицами системы СИ и другими

Физические величины	Соотношение между единицами	Формула пересчета
Длина, м Масса, кг Время, с Температура, град шкалы Кельвина	$1 \text{ м} = 100 \text{ см}$ $1 \text{ кг} = 1000 \text{ г}$ $1 \text{ с} = \frac{1}{3600} \text{ ч} = 0,00027778 \text{ ч}$ $1^\circ\text{K} = 1^\circ\text{C}$	$l (\text{м}) = l (\text{см}) 0,01$ $m (\text{кг}) = m (\text{г}) 0,001$ $\tau (\text{с}) = \tau (\text{ч}) 3600$ $T (^\circ\text{K}) = t (^\circ\text{C}) + 273$
Сила, $\text{H} = \text{кгм/с}^2$	$1 \text{ H} = 0,102 \text{ кгс}$ $1 \text{ H} = 102 \text{ гс}$ $1 \text{ H} = 10^6 \text{ дин}$	$P (\text{H}) = P (\text{кгс}) 9,81$ $P (\text{H}) = P (\text{гс}) 0,00981$ $P (\text{H}) = P (\text{дин}) 10^{-6}$
Давление, напряжение, $\text{Па} = \text{H/м}^2 = \text{кг/м} \cdot \text{с}^2$	$1 \text{ Па} = 0,102 \text{ кгс/м}^2$ $1 \text{ Па} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ ат}$ $1 \text{ Па} = 10 \text{ дин/см}^2$ $1 \text{ Па} = 0,0075 \text{ мм рт. ст.}$ $1 \text{ Па} = 0,0102 \text{ гс/см}^2$	$p (\text{Па}) = p (\text{кгс/м}^2) 9,81$ $p (\text{Па}) = p (\text{ат}) 9,81 \cdot 10^4$ $p (\text{Па}) = p (\text{дин/см}^2) 0,1$ $p (\text{Па}) = p (\text{мм рт. ст.}) \times 133,3$ $p (\text{Па}) = p (\text{гс/см}^2) 98,1$
Коэффициент поверхностного натяжения, $\text{H/м} = \text{кг/с}^2$	$1 \text{ H/м} = 1000 \text{ дин/см}$ $1 \text{ H/м} = 0,102 \text{ кгс/м}$	$\alpha (\text{H/м}) = \alpha (\text{дин/см}) 10^{-3}$ $\alpha (\text{H/м}) = \alpha (\text{кгс/м}) 9,81$
Плотность, кг/м^3	$1 \text{ кг/м}^3 = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$	$\rho (\text{кг/м}^3) = \rho (\text{г/см}^3) \times 1000$ $\rho (\text{кг/м}^3) = \rho (\text{кгс} \times \text{с}^2/\text{м}^4) 9,81$
Удельный вес, $\text{H/м}^3 = \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}^2$	$1 \text{ H/м}^3 = 0,102 \text{ кгс/м}^3$ $1 \text{ H/м}^3 = 0,1 \text{ дин/см}^3$	$\gamma (\text{H/м}^3) = \gamma (\text{кгс/м}^3) 9,81$ $\gamma (\text{H/м}^3) = \gamma (\text{дин/см}^3) 10$ $\gamma (\text{H/м}^3) = \gamma (\text{гс/см}^3) \times 9,81 \cdot 10^3$

Физические величины	Соотношение между единицами	Формула пересчета
Вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с} = \text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2 =$ $= \text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$	$1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 0,102 \text{ кгс}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ $1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 10 \text{ Пз}$ $1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 1000 \text{ сПз}$ $1 \text{ г}/\text{см}\cdot\text{с} = 1 \text{ Пуаз (Пз)}$	$\eta (\text{Па}\cdot\text{с}) =$ $= \eta (\text{кгс}\cdot\text{с}/\text{м}^2) 9,81$ $\eta (\text{Па}\cdot\text{с}) = \eta (\text{Пз}) 0,1$ $\eta (\text{Па}\cdot\text{с}) = \eta (\text{сПз}) 10^{-3}$
Кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$	$1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$ $1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^6 \text{ сСт}$ $1 \text{ см}^2/\text{с} = 1 \text{ Стокс (Ст)}$	$\nu (\text{м}^2/\text{с}) = \nu (\text{Ст}) 10^{-4}$ $\nu (\text{м}^2/\text{с}) = \nu (\text{сСт}) 10^{-6}$
Импульс силы, $\text{Н}\cdot\text{с} = \text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$	$1 \text{ Н}\cdot\text{с} = 0,102 \text{ кгс}\cdot\text{с}$	$u (\text{Н}\cdot\text{с}) = u (\text{кгс}\cdot\text{с}) 9,81$
Энергия, Дж = $= \text{Н}\cdot\text{м} =$ $= \text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$	$1 \text{ Дж} = 0,102 \text{ кгс}\cdot\text{м}$ $1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}$ $1 \text{ Дж} = 2,78\cdot 10^{-7} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ $1 \text{ Дж} = 0,239 \text{ кал}$ $1 \text{ Дж} = 0,239\cdot 10^{-3} \text{ ккал}$ $1 \text{ Дж} = 1,02\cdot 10^{-2} \text{ л}\cdot\text{ат}$	$\mathcal{E} (\text{Дж}) = \mathcal{E} (\text{кгс}\cdot\text{м}) 9,81$ $\mathcal{E} (\text{Дж}) = \mathcal{E} (\text{эрг}) 10^{-7}$ $\mathcal{E} (\text{Дж}) =$ $= \mathcal{E} (\text{кВт}\cdot\text{ч}) 3,6\cdot 10^6$ $\mathcal{E} (\text{Дж}) = \mathcal{E} (\text{кал}) 4,19$ $\mathcal{E} (\text{Дж}) = \mathcal{E} (\text{ккал}) 4,19 \times$ $\times 10^3$ $\mathcal{E} (\text{Дж}) = \mathcal{E} (\text{л}\cdot\text{ат}) 98,1$ $\mathcal{E}_{\text{уд}} (\text{Дж}/\text{м}^3) =$ $= \mathcal{E}_{\text{уд}} (\text{кгс}\cdot\text{см}/\text{см}^3) 9,81 \times$ $\times 10^4$
Мощность, $\text{Вт} = \text{Дж}/\text{с} =$ $= \text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^3$	$1 \text{ Вт} = 0,102 \text{ кгс}\cdot\text{м}/\text{с}$ $1 \text{ Вт} = 1,36\cdot 10^{-3} \text{ л.с.}$ $1 \text{ Вт} = 10^7 \text{ эрг}/\text{с}$ $1 \text{ Вт} = 0,862 \text{ ккал}/\text{ч}$ $1 \text{ Вт} = 0,239 \text{ кал}/\text{с}$	$N (\text{Вт}) = N (\text{кгс}\cdot\text{м}/\text{с}) 9,81$ $N (\text{Вт}) = N (\text{л. с.}) 0,736 \times$ $\times 10^3$ $N (\text{Вт}) = N (\text{эрг}/\text{с}) 10^{-7}$ $N (\text{Вт}) = N (\text{ккал}/\text{ч}) 1,16$ $N (\text{Вт}) = N (\text{кал}/\text{с}) 4,19$
Энергия единицы массы, тепло фа- зовых превраще- ний, Дж/кг = $= \text{м}^2/\text{с}^2$	$1 \text{ Дж}/\text{кг} =$ $= 0,239\cdot 10^{-3} \text{ ккал}/\text{кг}$ $1 \text{ Дж}/\text{кг} =$ $= 0,239\cdot 10^{-3} \text{ кал}/\text{г}$	$r (\text{Дж}/\text{кг}) = r (\text{ккал}/\text{кг}) \times$ $\times 4,19\cdot 10^3$ $r (\text{Дж}/\text{кг}) = r (\text{кал}/\text{г}) \times$ $\times 4,19\cdot 10^3$

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Адгезиометры
классификация 124
конструкции 126
основные требования 122, 123
- Адгезионные свойства 20
— теории 40
- Адсорбционные эффекты 41
- Акалориметр — см. компрессионные приборы
- Анализ модельный 22, 23, 24, 25
- Аномалия вязкости 22
- Аномально-вязкие жидкости 29
- Аэрозоли 10
- Бачинского формула 45
- Белковых масс вязкость 200
- Бентонитовые глины 141, 285
- Бингама-Шведова модель 19, 25
- Бингамовые тела 26
- Бульона
вязкость 186
плотность 235
- Ван-дер-ваальса силы 10
- Вибрационные приборы
вискозиметры 71, 111
дефометры 118, 121
- Вискозиметры капиллярные
классификация 178
конструкции 88, 89, 90
- Вискозиметры прочие
Гепплера (шариковый) 104, 105
с плоскопараллельными пластинами 104, 105
- Вискозиметры ротационные
классификация 55, 56
конструкции
Бакунца 70, 71
Воларовича 70, 71
Мачихина 70, 71
МТИММП 70, 73
Реотест 70, 75
- Влага связанная
адсорбционно 13
механически 13
осмотически 13
химически 13
- Влагосодержание 166
- Влажность относительная 47, 166
- Вязкость
кессоновская 28, 305
наибольшая практически неразрушенной структуры 25, 33
наименьшая предельно разрушенной структуры 33
ньютоновская 21
пластическая 25, 30
эластическая 304
эффективная 21, 30, 34
пересчеты 81
- Гидродинамика 273
- Гистерезисные явления 37
- Гомогенизация 200
- Градиент
сдвига в капиллярном вискозиметре
истинный 92, 94, 95
средний 93
сдвига в ротационном вискозиметре
истинный 60, 68
логарифмический 60
средний 60
сжатия объемного 224
осевого 210
скорости (скорость деформации) 15
- Гауа
закон 18
модель 19
- Давление
боковое 16, 18
гидростатическое 16
предварительного контакта 241, 244
прилипания 20
распределения по длине трубки 18
сопротивлению движения
в дозаторах 319
лопасти 313
в насадках 316
— трубах 298
- Датчики для измерения
давления 277
перемещения 119

усилия 240
Дерягина закон 20
Детского питания продукты
плотность 239
угол естественного откоса
272
Дефометр — см. компрессион-
ные приборы
Деформаций эпюры 292, 294
Деформационные характери-
стики 216
Деформация абсолютная 15
Деформация относительная
кинетическое уравнение 17
объемная 16
общая 17
одномерная 15
сдвига 76
удлинения 17
упругая 133, 134
эластическая 304
Диаметр трубопровода
оптимальный 311
эквивалентный 320
Дилатентные системы 29, 31
Дисперсионная среда 9
Дисперсная фаза 9
Дисперсные системы 9
Длительность
куттерования 159
оптимальная 161, 163
Дозаторы
классификация 317
конструкции 318
расчет 319
Долговечность структуры 11
Жесткость динамометра 240
Животных кормов сухих ко-
эффициенты трения 271
Жидкообразные системы 33
Жир
вязкость 188
плотность 236
электрофизические свойства
189, 191
Загрузочные устройства
к насосам 324, 325, 326, 330
пневмогидроцилиндрам
354, 355
Зона всасывания насоса 323,
330
нагнетания насоса 330, 331

Измельчения
длительность 169
оптимальная 167
периоды 161
степень 164
Индекс течения 32, 94, 96, 299
Кисломолочных продуктов вяз-
кость 199
Классификация
дисперсных систем 9
реальных тел 8
реологических тел 19, 29, 30,
31
реологических приборов и
методов измерения 52
структур дисперсных систем
9
форм связи влаги 13
Консистометр
Табачникова 104, 108
Шарнера 104, 108
Комплексная характеристика
куттерования 167, 174
Компрессионные приборы
классификация 112
конструкции 113, 118
Коэффициент
бокового давления 16
объемного сжатия 20
— поверхностного натяжения
42
полезного действия
гидравлический 332
индикаторный 333
механический 333
объемный 332
общий 332, 347
Пуассона 16
температурного расширения
47
трения 20, 21
Кривые течения 29, 33, 37, 134
Крови
вязкость и предельное на-
пряжение сдвига 206
плотность 208, 235
Кровяной муки компрессион-
ные характеристики 231
Липкость 20
Максвелла
модель 19

- тело 22
 Маргарина вязкость 204
 Масла сливочного
 вязкость 201
 предельное напряжение сдвига 203, 204
 липкость и когезия 203, 204
 Массовый расход 276
 Материальные балансы термообработки фарша 166
 Меланжа
 вязкость 208
 плотность 208
 поверхностное натяжение 208
 Методы исследования гидротранспортных установок 352
 насосов 331
 рабочих органов машины (см. также Стенды) 275, 276, 281
 реологические общие 5
 Модели реологических тел 5, 19
 Модельный материал 168, 284
 Модули
 объемной упругости 19
 равновесный 20
 релаксационный 24, 215
 сдвига 18, 76
 упругого последействия 35, 133
 упругости при растяжении — сжатии 18
 Молока
 вязкость 193, 194, 195
 плотность 235, 239
 электропроводность 196
 Молока сгущенного
 вязкость 197
 при различной длительности старения 197, 198
 плотность 235
 Мороженого смесей вязкость 198
 Мощность
 куттерования 170, 171
 насоса полезная 332
 привода 331, 332
 течения по реограммам 39
 Мыла коэффициент трения 268, 269
 Мяса целых тканей
 компрессионные характеристики 215
 липкость 253, 254
 прочностные характеристики 219
 фрикционные характеристики 263, 264
 Напряжения
 нормальные 18
 сдвиговые 15, 18
 Напряжения предельного давления 182
 сдвига 25, 26, 30
 Насосы для перекачки пластично-вязких продуктов
 исследование насосов 331
 исследование реологических свойств
 фарша в трубе 348, 349
 фарша при обратном перепуске через зазоры 336
 конструктивные особенности 323
 конструкция
 ВАКОЛ 324
 двухвинтовой 325, 340
 мембранный 329
 одновинтовой 323
 однозубчатый 327
 поршневой 329
 ротационно-шиберный 327
 роторно-поршневой (кулачковый) 327
 шестеренный 328
 шланговый 328
 эксцентриково-лопастной 329
 коэффициент заполнения 345
 оптимальные режимы эксплуатации 349
 основные требования 330
 пульсация давлений 350, 351
 Ньютона
 гипотеза 21
 модель 19
 Объемное сжатие 16, 17
 Объемный расход 93, 276
 Окружная скорость ротора вискозиметра 59
 Оптимальный диаметр трубопровода 311
 Осевое
 растяжение 15

- сжатие 17
 Относительная деформация — см. деформация относительная
 Ошибки экспериментов 7, 51
- Пенетromетры 104
 Период релаксации 23
 деформаций 25
 напряжений 25
- Пластично-вязкие системы 31
- Пластометр
 конический 104, 107
 с пластиной 104, 108
- Плотность 47, 235
- Пневмогидротранспорт 352
- Поверхностная энергия 250
- Поверхностное натяжение 42
- Ползучесть 23
- Предел
 текучести 134, 210
 упругости 133
- Прибор
 классификация 49
 основные требования 50
- Приведенная длина
 трубы 312
 ротора вискозиметра 65, 86
- Прилипание — см. липкость
- Пристенное скольжение 302
- Производительность (подача)
 насоса
 двухвинтового 337
 кулачкового 345
 эксцентриково-лопастного 333
- Псевдопластичные тела 31
- Размер частиц фарша 164, 165
- Расчет реологических характеристик для степенной жидкости 142, 143, 144
- Релаксационный спектр 23, 135, 213
- Релаксация 23
- Рейнольдса число
 в капиллярной вискозиметрии 54, 97
 в ротационной вискозиметрии 55
 обобщенное 300, 304, 305, 307
- Реологические расчеты
 оптимального диаметра 311
 процесса
 дозирования 319
 истечения 314
 неизотермического движения 320
 перемешивания 313
 трубопроводного транспорта 308
- Реологические уравнения
 линейных тел 22, 23, 24
 нелинейных тел 28
- Реологич. задачи 3
- Реопексия 37
- Сан-Венана модель 19, 21
- Скорость
 волны сжатия 351
 деформации — см. градиент скорости
 оптимальная 308
 среднеобъемная 276
- Сливки вязкость 205
- Стенды для реологических исследований
 следований
 вязкости капиллярными вискозиметрами 96
 общие требования 281
 процесса
 истечения 283
 обтекания лопасти 284
 объемного дозирования 283
 трубопроводов 281
 элюр деформаций 281
- Степенные жидкости 30, 31
- Степень разрушения структуры 35
- Сыра
 предельное давление 182
 предельное напряжение сдвига 181
- Сырки плавленных
 вязкость 183
 компрессионные характеристики 231
 липкость 260
- Сырково-творожных масс
 компрессионные характеристики 232
 липкость 259
 плотность 239
 сдвиговые свойства 178, 179
- Твердообразные системы 33
- Творожные массы см. сырки

- во-творожные массы
- Текучести предел 210
- Темп
 - разрушения структуры 32
 - убывания площади контакта 43
- Температурно-инвариантные характеристики 46
- Температурные изменения
 - вязкости 45
 - плотности 47
- Температурный режим куттерования 169, 170
- Температуропроводность мясного фарша 229
- Теплоемкость мясного фарша 170
- Теплообмен 321
- Термодинамики уравнения 17
- Теста пельменного липкость 258
- Течение
 - вязкое 21
 - ламинарное 21
 - неизотермическое 320
 - пластическое 21
 - реологические кривые 29, 33, 37
 - эпюры 290, 291
- Течение ньютоновских жидкостей
 - в капиллярах 92, 93
 - между поверхностями
 - двух дисков 64, 65
 - двух конусов 64, 65, 68
 - двух сфер 66, 68
 - двух цилиндров 66, 68
 - комбинированной формы 69
- Течение неньютоновских систем
 - в капиллярах 93, 94
 - между поверхностями
 - двух конусов 67
 - двух сфер 66
 - двух цилиндров 62, 67, 77
 - комбинированной формы 69, 82, 83, 84, 85
- Тиксотропия 37
- Тиксотропные структуры 37
- Торсиона калибровка 74
- Тренне
 - внешнее 20
 - внутреннее 21
- динамическое 129, 130
- коэффициент
 - истинный 20
 - эффективный 21
- статическое 129, 130
- удельная сила 20
- Трибометры
 - классификация 128, 129
 - конструкции 129, 130, 131
 - основные требования 129
- Трубопроводный транспорт
 - классификация 274
 - расчет 308
- Ультразвука скорость в сырах 235
- Универсальная газовая постоянная 12, 189
- Упругость 18, 19
- Уравнения движения
 - Букингама 302
 - Дарси-Вейсбаха 303
 - Кессона 304
 - критериальное 306
 - при наличии пристенного эффекта 305
 - степенной жидкости 298, 301
 - Фойгта — Кельвина 304
 - эмпирические 297
 - расчетные коэффициенты 298, 299
- Фарша мясного колбасного компрессионные характеристики
 - при объемном сжатии 223
 - при термообработке в форме 227
 - при осевом сжатии 209
 - липкость (адгезионные характеристики)
 - влияние на нее
 - давления и продолжительности контакта 243
 - длительности контакта 249
 - куттерования 256
 - материала пластин 245
 - материала и площади пластин 250
 - площади пластин 247
 - скорости отрыва пластин 247
 - температуры 257
 - ферментирования 256

шероховатости поверхности 251
материальные балансы при термообработке 166
плотность 237, 238
сдвиговые свойства
 влияние на них
 влажности и температуры 152
 влажности, температуры и давления 155
 концентрации водородных ионов 149
 механической обработки (куттерования) 159
 процесса старения 149
 температуры 147
 температуры и выдержки 150
в области лавинного разрушения структуры 136, 137, 138, 140
 в области практически неразрушенной структуры 133, 134, 135
теплофизические характеристики 170, 229

фрикционные характеристики 266, 268
 эталонные характеристики 165, 173, 229, 257
 электрофизические характеристики 175, 176
Фарша рыбного колбасного реологические характеристики 177
Физико-химическая механика 3
 задачи 3, 4
Френкеля — Эйринга формула 45
Фрикционные характеристики 263, 266, 268, 272
Энергия активации 11, 18, 19
Энергии расход при куттеровании 170
Эпюры
 деформаций 292, 294
 скоростей 290, 291
Эффективная вязкость см. вязкость
Шведова модель 26
Шоколадных масс вязкость 199

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдурагимова Л. А., Ребиндер П. А., Серб-Сербина Н. Н.* Упруго-вязкостные свойства тиксотропных структур водных суспензий бентонитовых глин.—Коллоидный журнал, 1955, т. 17, № 3, с. 184—195.
2. *Абрамов Н. Д., Горбатов А. В., Гурвиц В. Г.* Исследование адгезии пельменного теста.—Мясная промышленность.—Экспрессинформация. 1976, № 8, с. 22—24.
3. *Адгезия фарша докторской колбасы при различных условиях измерения* [В. И. Башмаков, А. В. Горбатов, П. Л. Пахомов, Е. Т. Спирии].—Изв. вузов СССР. Пищевая технология, 1971, № 1, с. 107—110.
4. *Альтшуль А. Д.* Гидравлические сопротивления.—М.: Недра, 1970.—216 с.
5. *Антонов С. Ф.* Мясная и молочная промышленность СССР.—М.: Пищевая промышленность, 1976.—112 с.
6. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного трения.—М.: Физматгиз, 1963.—472 с.
7. *Ашкеров Ю. В.* Исследование кинетической адгезии. Автореферат кандидатской диссертации. Московский станкоинструментальный институт. 1969.—14 с.
8. *Багаутдинов И. И., Крылов В. В., Пелеев А. И.* Об определении коэффициента внутреннего трения сыпучих продуктов на коническом пластометре.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1973, № 6, с. 130—133.
9. *Багров А. А.* Исследование величины удельной мощности предельного разрушения структуры в глинистых суспензиях.—Коллоидный журнал, 1965, т. 27, № 5, с. 639—642.
10. *Бакунц Г. В.* Прибор для измерения физико-механических свойств фарша при куттеровании.—Мясная индустрия СССР, 1968, № 6, с. 6—11.
11. *Барр Г.* Вискозиметрия.—М.; Л.: ГОНТИ—НКТП—СССР. Главная редакция химической литературы. 1938—274 с.
12. *Бартенев Г. М., Ермилова Н. В.* К теории реологических свойств твердообразных дисперсных структур.—Коллоидный журнал, 1967, т. 29, № 6, с. 771—778; 1968, т. 30, № 5, с. 662—668; 1969, т. 31, № 2, с. 169—175.
13. *Белкин И. М., Виноградов Г. В., Леонов А. И.* Ротационные приборы.—М.: Машиностроение, 1968.—272 с.
14. *Белый В. А., Егоренков Н. И., Плескачевский Ю. М.* Адгезия полнмеров к металлам.—Минск: Наука и техника, 1971.—286 с.
15. *Бем Р., Плева В.* Микроскопия мяса и сырья животного происхождения.—М.: Пищевая промышленность, 1964.—335 с.

16. Берлин А. А., Басин В. Е. Основы адгезии полимеров.—М.: Химия, 1969.—319 с.
17. Бернхардт Э. С. Переработка термопластичных материалов.—М.: Химия, 1965—747 с.
18. Боровикова О. П. Исследование структурно-механических свойств плавленных сыров. Кандидатская диссертация.—М.: МТИММП, 1972.—117 с.
19. Брусиловский Л. П., Вайнберг А. Я. Автоматизация процессов циркуляционной мойки молочного оборудования и трубопроводов.—М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1977.—53 с.
20. Брусиловский Л. П., Вайнберг А. Я. Клапаны и краны для автоматического управления потоками молока и молочных продуктов в трубопроводах.—М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1971.—36 с.
21. Вайткус В. Изучение методов определения вязкости молока и сливок.—Известия вузов. Пищевая технология, 1963, № 2, с. 159—162.
22. Виноградов Я. И. Исследование реологических свойств колбасного фарша при кондуктивной термообработке в форме под давлением. Кандидатская диссертация. — М.: МТИММП, 1975. — 163 с.
23. Винокуров Ф. П., Скворцов Б. П., Тетеркин А. Е. Определение сцепления и несущей способности торфяных оснований сферическим штампом.—Инженерио-физический журнал, 1960, т. 3, № 4, с. 49.
24. Влияние добавок сывороточных белков на упруго-прочностные и вязкостные свойства сыра.—В кн.: Физико-химическая механика сыродельного производства [В. П. Табачников, Е. В. Конева, В. С. Илюшкин, П. Ф. Крашенинин]. Труды ВНИИМСА, 1973, вып. 12, с. 41—51.
25. Влияние плазмы крови на качество вареных колбас из конины [Е. Тулеуов, С. Ульянов, С. Исебаев и др.].—Мясная индустрия СССР, 1976, № 1, с. 14—16.
26. Воларович М. П. Вязкость и пластичность печатных красок.—Труды Московского полиграф. ин-та, 1937, ОГИЗ № 5, с. 261—270.
27. Воларович М. П. Вязкость смазочных масел при низких температурах. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1944.—111 с.
28. Волчков И. И., Грейль Л. М. Ротационный насос ОНРС для сметаны.—Труды ВНИМИ, 1975, вып. 39, с. 31—35.
29. Гинзбург А. С. Технология сушки пищевых продуктов.—М.: Пищевая промышленность, 1976.—248 с.
30. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов.—М.: Изд-во литературы по строительству, 1971.—367 с.
31. Гольцын А. А. Определение величины градиента скорости сдвига на ротационных приборах по различным формулам.—Мясная индустрия СССР, 1974, № 7, с. 39—42.
32. Горбань М. В., Груздев И. Э., Корнилов И. Б. Исследование работы двухшпикового шприца.—Мясная индустрия СССР, 1977, № 7, с. 32—34.
33. Горбатов А. В. Исследование структурно-механических свойств некоторых мясopодуKтов с целью расчета и совершенствования отдельных процессов и рабочих органов машины. Докторская диссертация.—М.: МТИММП, 1970.—270 с.

34. Горбатов А. В. Реология в мясной промышленности.—М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1968.—68 с.
35. Горбатов А. В. Структурно-механические свойства мяса и мясопродуктов. Справочник: Физико-химические и биохимические основы технологии мяса и мясопродуктов.—М.: Пищевая промышленность, 1973, с. 115—167.
36. Горбатов А. В., Антонов Л. В. Пневмогидротранспортировка продуктов первичной переработки скота. Мясная индустрия СССР, 1976, № 8, с. 22—24.
37. Горбатов А. В., Бражников А. М. Механизация и автоматизация производственных процессов в пищевой промышленности.—М.: Общество «Знание» (РСФСР), 1974.—48 с.
38. Горбатов А. В., Виноградов Я. И., Косой В. Д. Влияние некоторых технологических факторов на реологические свойства колбасного фарша при термообработке в форме под давлением.—М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, Мясная промышленность, 1975, № 2, с. 18—26.
39. Горбатов А. В., Генералов Н. Ф. Трубопроводный транспорт. Справочник: Оборудование для убоя скота, птицы, производства колбасных изделий и птицепродуктов.—М.: Пищевая промышленность, 1975, с. 231—262.
40. Горбатов А. В., Горбатова В. А. Физические свойства бульона, жира и студия.—Мясная индустрия СССР, 1958, № 1, с. 53—55.
41. Горбатов А. В., Казаков С. П. Исследование некоторых физико-механических свойств мясного фарша.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1959, № 5, с. 117—125.
42. Горбатов А. В., Косой В. Д. Влияние давления, влажности и температуры на структурно-механические свойства фарша.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1970, № 2, с. 146—151.
43. Горбатов А. В., Косой В. Д. О сдвиговых свойствах мясного фарша при различной влажности и температуре.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1968, № 3, с. 149—151.
44. Горбатов А. В., Косой В. Д. Реологические исследования модельного материала.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1966, № 4, с. 147—150.
45. Горбатов А. В., Косой В. Д., Виноградов Я. И. Гидравлика и гидравлические машины (методические указания к лабораторным работам).—М.: МТИММП, 1977.—60 с.
46. Горбатов А. В., Косой В. Д., Виноградов Я. И. Гидравлика и гидравлические машины для вязко-пластичных масс.—М.: МТИММП МВ и ССО РСФСР, 1977.—86 с.
47. Горбатов А. В., Косой В. Д., Виноградов Я. И. Реологические свойства колбасного фарша при сжатии в замкнутом объеме.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1977, № 2, с. 157—159.
48. Горбатов А. В., Косой В. Д., Елкин В. В. Влияние некоторых технологических факторов на реологические свойства колбасного фарша и готовых изделий.—Мясная индустрия СССР, 1976, № 1, с. 23—26.
49. Горбатов А. В., Косой В. Д., Елкин В. В. Влияние продолжительности куттерования и влагосодержания фарша на выход

вареных бесшпиковых колбас.—Мясная индустрия СССР, 1975, № 2, с. 37—40.

50. Горбатов А. В., Косой В. Д., Полякова Л. К. Влияние времени старения и температуры на сдвиговые свойства фарша.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1967, № 5, с. 177—179.
51. Горбатов А. В., Лимонов Г. Е. Истечение фарша через прямые круглые отверстия и трубки.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1966, № 5, с. 123—126; 1968, № 2, с. 124—125.
52. Горбатов А. В., Лимонов Г. Е. О распределении давлений в фарше по длине канала.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1972, № 4, с. 184—185.
53. Горбатов А. В., Небурчилов В. В., Богдановский В. Б. Пульсации давлений у ротационных фаршенасосов.—Мясная индустрия СССР, 1973, № 7, с. 33—35.
54. Горбатов А. В., Познышев А. Н., Наими Е. К. Деформационно-релаксационные характеристики говяжьего мяса при осевом сжатии. XIX Европейский конгресс работников НИИ мясной промышленности.—Париж, 1973, с. 599—614.
55. Горбатов А. В., Спириг Е. Т., Башмаков В. И. Исследование релаксационных характеристик мясного фарша.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1971, № 5, с. 171—172.
56. Горбатов В. М., Горбатов А. В. Теплофизические свойства мяса и мясопродуктов. Справочник: Физико-химические и биохимические основы технологии мяса и мясопродуктов.—М.: Пищевая промышленность, 1973, с. 167—188.
57. Горбунов А. В. Цельномолочная промышленность.—Экспресс-информация, М. ЦНИИТЭИмясомолпром. 1975, № 10, 28 с.
58. Графический метод определения гидравлических характеристик потока крови в трубах [В. И. Ходос, Н. Н. Мизерецкий, В. Д. Косой, Т. В. Чижикова.]—Мясная индустрия СССР, 1977, № 6, с. 39—41.
59. Громковский А. И. Оценка пристенного скольжения при течении утфелей.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1968, № 5, с. 139—142.
60. Гуляев-Зайцев С. С. Физико-химические основы производства масла из высокожирных сливок.—М.: Пищевая промышленность, 1974.—136 с.
61. Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. Структура и механические свойства полимеров.—М.: Высшая школа, 1966.—314 с.
62. Гуськов К. П., Берман Г. К. Течение пищевых масс в каналах различной формы.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1968, № 6, с. 138—142.
63. Дерягин Б. В. Что такое трение? — М.: Изд-во АН СССР, 1963.—231 с.
64. Ересько Г. А. Расчет маслообразователей. Исследование физико-химических свойств сливок и масла.—Труды ВНИИМСа, 1973, вып. 13, с. 90—99.
65. Ермакова Т. П., Клешко Г. М., Горячева Г. Н. Точность измерения вязкости шоколадных масс на ротационных вискозиметрах.—Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1975, № 10, с. 19—21.

6. Жуковский С. С., Гуткин А. М. О методе определения предельного напряжения сдвига.—Коллоидный журнал, 1966, т. 28, № 1, с. 151—152.
7. Жуховицкий С. Ю. О механизме течения глинистых суспензий.—Коллоидный журнал, 1962, т. 24, № 2, с. 168—173.
8. Зависимость адгезии творожно-сырковой массы от условий измерения [Н. А. Мусабаев, А. В. Горбатов, В. И. Башмаков, П. Л. Пахомов].—Молочная промышленность, 1970, № 6, с. 22—25.
9. Зависимость растворимости белка и реологических свойств фарша от длительности куттерования [В. Хлебников, В. Махонина, Н. Мелихова, А. Симоненко, В. Косой].—Мясная индустрия СССР, 1975, № 3, с. 33—35.
10. Зимон А. Д., Волкова Т. С. Влияние шероховатости на адгезию пыли.—Коллоидный журнал, 1965, т. 27, № 3, с. 365—367.
11. Золотин Ю. П. Циркуляционная мойка молочного оборудования.—М.: Пищепромиздат, 1963.—91 с.
12. Измайлова В. Н., Жолболсинова А. С. Исследование структурообразования в водных растворах яичного альбумина.—Коллоидный журнал, 1967, т. 29, № 5, с. 677—681.
13. Измайлова В. Н., Ребиндер П. А. Структурообразование в белковых системах.—М.: Наука, 1974.—268 с.
14. Изучение влияния ферментирования на липкость мясного фарша [А. В. Горбатов, В. И. Соловьев, Е. Т. Спириин, А. Г. Поклад].—Труды МИНХа им. Г. В. Плеханова, 1968, вып. 58, с. 18—22.
15. Использование индукционных расходомеров в колбасном производстве [В. М. Горбатов, П. С. Гноевой, Г. Е. Лимонов, А. В. Горбатов].—Мясная индустрия СССР, 1970, № 9, с. 13—16.
16. Исследование движения сырковой массы в трубопроводах [В. Д. Сурков, Н. Е. Федоров, С. П. Казаков, А. В. Горбатов].—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1958, № 6, с. 88—94.
17. Исследование механических характеристик мяса методом проволочной тензометрии [А. В. Горбатов, Г. Е. Лимонов, Е. Т. Спириин, В. В. Небурчилов].—Мясная индустрия СССР, 1968, № 3, с. 28—29.
18. Исследование процесса прессования кровяной муки в брикеты [В. Ф. Некрашевич, С. М. Немтинов, Е. В. Гаевой, А. И. Сницарь].—Мясная индустрия СССР, 1977, № 7, с. 26—28.
19. Исследование структурно-механических свойств искусственных мясopодуков на основе казеината и альгината натрия [В. В. Толстогузов, А. И. Мжельский, В. Т. Дианова, Ю. Н. Жванко].—Труды МИНХа им. Г. В. Плеханова, 1976, вып. 5, с. 128—133.
20. Исследование структурно-механических свойств плавленых сыров [А. В. Горбатов, В. Д. Косой, Г. Н. Крусь, О. П. Боровикова].—Молочная промышленность, 1976, № 12, с. 9—12.
21. Ишлинский А. Ю. О некоторых проблемах техники.—В кн.: Наука и человечество.—М., «Знание», 1968, с. 303—325
22. Калугин В. В., Медузов В. С., Короткова В. С. Структурно-механические свойства сухих молочных смесей. Молочно-консерв-

- ная промышленность.—Экспресс информация. М. ЦНИИТЭИмясомолпром. 1977, вып. 5, с. 23—26.
83. *Кобылинский В. А., Гуляев-Зайцев С. С.* Исследование адгезионных и прочностных свойств сливочного масла в связи разработкой технологических параметров мелкой фасовки. В кн.: Тезисы докладов на Всесоюзной научной конференции «Электрофизические методы обработки пищевых продуктов» Воронеж, 1977, с. 49.
 84. *Коваленко Л. М., Маслов А. М.* Гидравлическое сопротивление пластинчатых теплообменников неньютоновским жидкостям. Известия вузов СССР. Пищевая технология. 1973, № с. 110—113.
 85. *Конаныхин А. В., Маслов А. М.* Влияние температуры и градиента скорости на вязкость сливочного масла.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1973, № 3, с. 89—91.
 86. *Конаныхин А. В., Табачников В. П., Маслов А. М.* Вязкостные свойства белковых масс из подсырной сыворотки.—Физико-химическая механика сыродельного производства.—Труды ВНИИМСА, 1973, вып. 12, с. 15—19.
 87. *Консидайн Д. М., Росс С. Д.* Справочник по прикладной и мерительной технике.—М.: Энергия, 1968.—624 с.
 88. *Консистентные смазки* / [Д. С. Великовский, В. Н. Поддубны В. В. Вайншток, Б. Д. Готовкин].—М.: Химия, 1966.—256 с.
 89. *Коровкина Л. Н., Паткуль Г. М., Маслов А. М.* Влияние способа охлаждения и химического состава на вязкость кефира.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1976, № с. 30—32.
 90. *Корячкин В. П.* Исследование течения вязко-пластичных кофетных масс с целью совершенствования производства изделий. Автореферат кандидатской диссертации.—М.: МТИП, 1975.—28 с.
 91. *Критериальные уравнения движения пластично-вязких мясных продуктов по трубопроводам* / [Н. Е. Федоров, А. В. Горбатов, И. А. Рогов, С. П. Казаков].—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1960, № 1, с. 117—121.
 92. *Круглицкий Н. Н.* Основы физико-химической механики. Часть 1.—Киев: Вища школа, 1975.—268 с.
 93. *Круглицкий Н. Н.* Основы физико-химической механики. Часть 2.—Киев: Вища школа, 1976.—208 с.
 94. *Кузьменко Н. П.* Из опыта работы Свердловского мясокомбината.—Экспресс-информация. Мясная промышленность, М. ЦНИИТЭИмясомолпром. 1977, вып. 3, с. 3—6.
 95. *Кулаков Н. Н.* Сравнение трех методов определения пластично-вязких свойств торфомассы.—Коллоидный журнал, 1964, т. 3, № 3, с. 217—225.
 96. *Кусаков М. М.* Применение двухмерных методов в реологии. Инженерно-физический журнал, 1960, т. 3, № 4, с. 132—141.
 97. *Леви С. М.* О законе течения вязко-пластичной среды Шведва.—Коллоидный журнал, 1955, т. 17, № 2, с. 158—159.
 98. *Леонов А. И., Малкин А. Я., Виноградов Г. В.* О влиянии жесткости динамометрических устройств на результаты реологических измерений.—Коллоидный журнал, 1964, т. 26, № с. 335—340.
 99. *Лимонов Г. Е.* Исследование объемного сжатия мяса и мясных

- продуктов и истечения их через отверстия и насадки. Кандидатская диссертация.—М.: МТИММП, 1967.—167 с.
100. *Липатов С. М.* Физико-химия коллоидов. М.; Л.: Госхимиздат, 1948.—372 с.
101. *Лыков А. В.* Тепломассообмен.—М.: Энергия, 1972—560 с.
102. *Максимов А. М., Лившиц С. З., Горбатов А. В.* Механизированная мойка спусков. Мясная индустрия СССР, 1958, № 4, с. 11—13.
103. *Максимов А. С.* Исследование влияния колебаний на реологические свойства конфетных масс и их течение по каналам формирующих машин. Кандидатская диссертация.—М.: МТИИИ, 1977.—223 с.
104. *Малыгина Е. П.* О коэффициенте трения мыла.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1972, № 3, с. 117—119.
105. *Маслов А. М.* Ламинарное течение сред Кессона внутри круглой трубы и в зазоре между параллельными плоскостями.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1968, № 2, с. 175—177.
106. *Маслов А. М., Грищенко А. Д.* Кривые течения сливочного масла.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1970, № 5, с. 163—164.
107. *Маслова Г. В., Маслов А. М.* Температурно-инвариантная характеристика вязкости рыбных фаршей.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1973, № 5, с. 61—63.
108. *Материалы XXV съезда КПСС.*—М.: Политиздат, 1976.—256 с.
109. *Материалы 5 Всесоюзной конференции по физико-химической механике.*—Уфа: АН СССР, 1971.—251 с.
110. *Матц С. А.* Структура и консистенция пищевых продуктов.—М.: Пищевая промышленность, 1972.—239 с.
111. *Мачихин Ю. А.* Формование и транспортирование высоковязких конфетных масс. Докторская диссертация.—М.: МТИП, 1971.—541 с.
112. *Мачихин Ю. А., Бирфельд А. А.* Механизация перекачки пралиновых масс.—М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1970.—45 с.
113. *Медведева А. М.* Исследование адгезионных явлений при креплении резин к металлам клеем на основе изоцианата. Автореферат кандидатской диссертации.—М.: МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 1967.—20 с.
114. *Медведева Т., Косой В. Д., Медведев А.* Влияние белковых добавок на выход и структурно-механические свойства мясного хлеба.—Мясная индустрия СССР, 1976, № 2, с. 42—44.
115. *Метод определения кинематической вязкости растворов желатина*/[И. П. Хорев, Д. П. Радкевич, Г. Ф. Афанасьева, И. А. Стутьчинская].—Мясная индустрия СССР, 1977, № 2, с. 35—38.
116. *Методы контроля консистенции и структурно-механических свойств сыра*/[В. П. Табачников, Л. И. Тетерева, З. Х. Диланян, Г. Г. Хачатрян].—М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1975.—39 с.
117. *Механизм липкости творожно-сырковой массы*/[Н. А. Мусабаяев, А. В. Горбатов, В. И. Башмаков, П. Л. Пахомов].—Молочная промышленность, 1969, № 12, с. 18—20.
118. *Михайлов Н. В., Ребиндер П. А.* О структурно-механических

- свойствах дисперсных и высокомолекулярных систем.—Коллоидный журнал, 1955, т. 17, № 2, с. 107—119.
119. *Моор В.* Мойка и дезинфекция в молочном деле.—М.: Пищепромиздат, 1957.—164 с.
 120. *Мусабаяев Н. А.* Исследование структурно-механических свойств творога и творожных масс. Кандидатская диссертация.—М.: МТИММП, 1970.—135 с.
 121. *Небурчилов В. В., Горбатов А. В., Косой В. Д.* Перекачивание колбасного фарша эксцентриково-лопастными вытеснителями.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1967, № 4, с. 102—105.
 122. *Небурчилов В. В., Горбатов А. В., Никифоров П. П.* Определение основных параметров работы роторно-поршневого фарше-насоса.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1969, № 3, с. 115—118.
 123. *Никифоров А. Ф., Уваров В. Б.* Основы теории специальных функций.—М.: Наука, 1974.—303 с.
 124. *Николаев Б. А.* Измерение структурно-механических свойств пищевых продуктов.—М.: Экономпка, 1964.—223 с.
 125. *Николаев Б. А., Баранов А. Ф.* Исследование структурно-механических свойств мяса методом растяжения.—Мясная индустрия СССР, 1971, № 12, с. 29—30.
 126. *Николаев Б. А., Баранов А. Ф., Заяс Ю. Ф.* Определение констант системы говядины методом растяжения.—Мясная индустрия СССР, 1976, № 6, с. 35—37.
 127. *Николаев Б. А., Заяс Ю. Ф., Баранов А. Ф.* Исследование структурно-механических свойств мышечной ткани говядины методами растяжения.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1974, № 2, с. 180—183.
 128. *Николаев Л. К.* Исследование реологических характеристик пищевого свиного жира в застывшем состоянии и в области его фазовых изменений.—Труды XXIII Европейского конгресса научных работников мясной промышленности. Сессия «О», М., 1977, с. 1—4.
 129. *Николаев Л. К.* Насосы пищевой промышленности.—М.: Пищевая промышленность, 1972—137 с.
 130. *Николаев Л. К.* Обобщенные реологические характеристики смесей мороженого.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1975, № 3, с. 135—137.
 131. *Николаев Л. К.* Реологические характеристики маргаринов.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1976, № 3, с. 134—136.
 132. *Новые приборы для контроля реологических свойств мясных продуктов* / [А. Горбатов, Г. Лимонов, С. Суханова, В. Брайникова, О. Боровикова].—Мясная индустрия СССР, 1972, № 10, с. 35—37.
 133. *Объективная оценка качества мяса и мясных продуктов реологическими методами* / [Г. Е. Лимонов, С. И. Суханова, О. П. Боровикова, А. В. Горбатов].—М.: ЦНИИТЭИмясопром, 1975, Обзорная информация. Серия: Мясная промышленность, № 14,—27 с.
 134. *Определение основных параметров работы двухвинтового фаршенасоса* / [В. В. Небурчилов, А. В. Горбатов, В. Д. Косой].—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1976, № 3, с. 137—140.

- В. Б. Богдановский, Ю. В. Кицман].—Мясная индустрия СССР, 1969, № 4, с. 33—36.
135. *Определение «эталонных» технологических параметров приготовления колбасного фарша и готовой продукции с использованием жирной говядины* / [В. Богдановский, Л. Чудля, А. Горбатов, В. Косой, В. Елкин].—Мясная индустрия СССР, 1975, № 7, с. 30—31.
 136. *Панченков Г. М.* Теория вязкости жидкостей.—М., Л.: Гостоптехиздат, 1947.—147 с.
 137. *Пелеев А. И.* Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности.—М.: Пищевая промышленность, 1971.—519 с.
 138. *Пелеев А. И., Бакунц Г. В., Вартамян Г. Г.* К теории обработки мяса в куттере. Динамика структурообразования фарша.—Мясная индустрия СССР, 1971, № 10, с. 26—29.
 139. *Пелеев А. И., Клименко М. И.* К теории машинной обработки мяса. Исследование процесса трения скольжения мяса по стали.—Мясная индустрия СССР, 1966, № 5, с. 45—47.
 140. *Познышев А. Н.* Исследование способов и режимов резания мяса с учетом его структуры. Кандидатская диссертация.—М.: МТИММП, 1973.—143 с.
 141. *Политехнический словарь.* Под ред. И. И. Артоболевского.—М.: Советская энциклопедия, 1976.—608 с.
 142. *Полякова Л. К.* Исследование влияния некоторых технологических факторов на качество рыбной вареной колбасы. Автореферат кандидатской диссертации.—М.: ВНИРО, 1978.—26 с.
 143. *Прибор для объективной оценки консистенции колбасных изделий* / [Е. Гольдман, О. Холоднова, А. Большаков, А. Фомин].—Мясная индустрия СССР, 1969, № 1, с. 29—31.
 144. *Производство рыбных колбасных изделий* / [Н. И. Рехина, В. Г. Будина, Л. К. Полякова, Ф. И. Верхотурова].—М.: Пищевая промышленность, 1976.—65 с.
 145. *Пчелин В. А.* Поверхностные свойства белковых веществ.—М.: Гизлегпром, 1951.—146 с.
 146. *Ратнер С. Б.* О внешнем трении резины.—Коллоидный журнал, 1956, т. 17, № 3, с. 373—378.
 147. *Ребиндер П. А.* Конспект общего курса коллоидной химии.—М.: Изд-во Московского университета, 1950.—112 с.
 148. *Ребиндер П. А.* Физико-химическая механика дисперсных структур.—В кн.: Физико-химическая механика дисперсных структур, М.: Наука, 1966, с. 3—16.
 149. *Ребиндер П. А., Влодавец И. Н.* Проблемы физической химии молока.—Молочная промышленность, 1967, № 12, с. 1—5.
 150. *Реология пищевых масс* / [К. П. Гуськов, Ю. А. Маичкин, С. А. Мачихин, Л. Н. Лунина].—М.: Пищевая промышленность, 1970.—208 с.
 151. *Реология, теория и приложения.* Под редакцией Ф. Р. Эйриха.—М.: Изд-во И. Л., 1962.—824 с.
 152. *Рогов И. А., Горбатов А. В.* Новые физические методы обработки мясopодуlктов.—М.: Пищевая промышленность, 1966.—302 с.

153. *Рогов И. А., Горбатов А. В.* Связь электропроводности и вязкости молока.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1967, № 3, с. 114—117.
154. *Рогов И. А., Горбатов А. В.* Физические методы обработки пищевых продуктов.—М.: Пищевая промышленность, 1974.—583 с.
155. *Савченко И. В.* Сравнение реологических уравнений состояния найденных при помощи капиллярного и ротационного вискозиметров.—Коллоидный журнал, 1967, т. 29, № 6, с. 887—890.
156. *Санина Э.* Добавление плазмы крови в фарш сарделек улучшает их качество и выход.—Мясная индустрия СССР, 1971, № 1, с. 29.
157. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды. Т. 1.—М.: Наука, 1970,—492 с.
158. *Смолдырев А. Е., Сафонов Ю. К.* Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей.—М.: Машиностроение, 1973.—208 с.
159. *Смольский Б. М., Шульман З. П., Гориславец В. М.* Реодинамика и теплообмен нелинейно вязко-пластичных материалов.—Минск: Наука и техника, 1970.—446 с.
160. *Соколов А. А.* Физико-химические и биохимические основы технологии мясопродуктов.—М.: Пищевая промышленность, 1965.—490 с.
161. *Соколов А. А., Заяс Ю. Ф.* Получение жировых эмульсий с помощью ультразвука и их применение.—Мясная индустрия СССР, 1962, № 1, с. 46—49.
162. *Спирин Е. Т., Горбатов А. В.* Исследование липкости колбасного фарша.—Труды ВНИИМПа, 1970, вып. 22, с. 113—131.
163. *Спирин Е. Т.* Исследование физико-механических свойств мясопродуктов при адгезии и трении. Кандидатская диссертация.—М.: ВНИИМП, 1970,—160 с.
164. *Спирин Е. Т., Горбатов А. В.* Исследование внешнего трения в условиях контакта мясопродуктов с твердыми поверхностями.—Труды ВНИИМПа, 1970, вып. 22, с. 132—142.
165. *Стабилизация концентрированных эмульсий типа М/В водными растворами белков и поверхностно-активных полимеров.* [В. Н. Измайлова, З. Д. Туловская, Г. М. Письменная, П. А. Ребиндер].—Коллоидный журнал, 1972, т. 34, № 3, с. 340—345.
166. *Табачников В. П.* Реологические методы зондирования сыра.—В кн.: Физико-химические и физико-механические процессы в сыроделии.—Труды ВНИИМСа, М.: Пищевая промышленность, 1974, вып. 17, с. 84—94.
167. *Твердохлеб Г. В., Авакумов А. К.* О структурно-механических свойствах сливочного масла поточного способа производства.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1967, № 2, с. 61—65.
168. *Теория трения и износа.* Сб. статей.—М.: Наука, 1965.—365 с.
169. *Титов А. И., Влодавец И. Н., Ребиндер П. А.* Процессы структурообразования в молочном жире и их значение для производства сливочного масла.—Коллоидный журнал, 1958, т. 20, № 1, с. 92—101.
170. *Трайнис В. В.* О структурно-механических свойствах угольных суспензий.—Коллоидный журнал, 1967, т. 29, № 3, с. 424—429.

171. Третьякова Н. И., Крюкови П. П., Шидловская В. П. Новый метод определения плотности диетических продуктов.—Сб. студенческих работ МТИМПа, 1958, вып. 5, с. 44—46.
172. Удельные электропроводности и структурно-механические свойства мяса и субпродуктов/[И. А. Рогов, А. В. Горбатов, В. И. Волчков, В. Д. Косой, В. В. Елкин].—Мясная индустрия СССР, 1973, № 12, с. 25—31.
173. Уманцев А. З. О структурно-механических свойствах рыбы.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1975, № 3, с. 178—180.
174. Урьев, Н. Б., Талейник М. А. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс.—М.: Пищевая промышленность, 1976.—240 с.
175. Федоров Н. Е., Горбатов А. В. Исследование режима движения мясного фарша в трубопроводах с помощью рентгеноскопии.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1960, № 3, с. 127—129.
176. Федоров Н. Е., Горбатов А. В., Косой В. Д. Кинематика и динамика заполнения форм объемных дозаторов пластично-вязкими продуктами.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1970, № 6, с. 103—106.
177. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М., Изд-во И. Л., 1963.—535 с.
178. Физико-механические свойства сухих животных кормов/[В. Ф. Некрашевич, С. М. Немтинов, Е. В. Гаевой, А. И. Сницарь].—Мясная индустрия СССР, 1976, № 6, с. 25—27.
179. Физические основы метода определения адгезии мясопродуктов/[А. В. Горбатов, В. И. Башмаков, П. Л. Пахомов, Е. Т. Спирин].—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1970, № 6, с. 129—133.
180. Френкель Я. И. На заре новой физики.—М.: Наука, 1970.—382 с.
181. Харин С. Е. Движение жидкости по капиллярам малого радиуса.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1965, № 6, с. 111—116.
182. Шевелев А. Ф., Медведовский И. М., Цукерман Д. А. Рекомендации по гидравлическому расчету стеклянных трубопроводов.—М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1976.—28 с.
183. Шищенко Р. И., Есьмин Б. И. Практическая гидравлика в бурении.—М.: Недра, 1966.—319 с.
184. Шубин Е. М. Некоторые структурно-механические свойства плавленого сыра в зависимости от применяемых солей-плавнителей.—Известия вузов СССР. Пищевая технология, 1961, № 2, с. 70—74.
185. Щеголев Г. Г., Топоров Ю. П., Трапезников А. А. Влияние микроструктуры загустителя в литиевых смазках на граничное трение.—Коллоидный журнал, 1967, т. 29, № 5, с. 739—744.
186. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции.—М.: Наука, 1968.—344 с.
187. A mechanical model for post-mortem striated muscle. Stopper D. L., Naugh C. G., Forrest J. C., Sweat V. E.—J. of texture studies, 1974, v. 4, N 4, p. 483—493.
188. Bourne M. C. A classification of objective methods for measuring

- texture and consistency of foods.—*J. Food Sci.* 1966, v. 31, N 6, pp. 1011—1015.
189. *Bourne M. C.* Method for obtaining compression and shear coefficients of food using cylindrical punches.—*J. Texture Studies*, 1975, v. 5, p. 459—469.
190. *Bouton, P. E., Harris P. V., Shorthose W. R.* Effect of ultimate pH upon the water—holding capacity and tenderness of mutton.—*J. of Food Sci.*, 1971, v. 36, N 3, p. 435—439.
191. *Brodkey R. S., Lee J., Chase R. C.* A generalized velocity distribution for non—newtonian fluids.—*American Institute of Chemical Engineers Journal*, 1961, v. 7, N 3, p. 392.
192. *Cristiansen E. B., Craig S. E., Jr* Heat Transfer to pseudoplastic fluids in laminar flow.—*American Institute of Chemical Engineers Journal*, 1962, v. 8, N 2, p. 154—160.
193. *Design* applications of mechanical properties of solid food materials. The Pennsylvania State University, 1975, 198 p.
194. *Dodge D. W.* Fluid systems.—*Industrial Engineering Chemistry*, 1959, v. 51, N 7, p. 839—844.
195. *Dolezalek J., Hylmar B., Tesarkova H.* The effect of some technological factors on rheological properties of soured milk products.—*Sb. VŠCHT Praze*, 1972, E33, p. 47—65.
196. *Drake B. K.* Automatic recording properties of foodstuffs.—*J. of Food Sci.*, 1962, v. 27, N 2, p. 182—188.
197. *Drake B. K.* Food crushing sounds: comparisons of objective and subjective data.—*J. of Food Sci.*, 1965, v. 30, N 3, p. 556—559.
198. *Eirich F. R.* Rheology. New York—London. Academic press, 1960, v. 3, 631 p.
199. *Food texture measurements in Canada.* Cumming D. B., de Man M. J., Lynch A. G., Mertens W. G., Tanaka M.—*J. of Texture Studies*, 1971, v. 2, N 4, p. 441—450.
200. *Gorbatov A. V., Gorbatov V. M.* Advances in sausage meat rheology.—*J. of Texture Studies*, 1974, v. 4, N 4, p. 406—437.
201. *Gorbatow A. W., Gorbatow W. M.* Die Fleissegenschaften des rehen Fleischbrätes.—*Die Fleischwirtschaft*, 1970, Jr. 50, N 3, s. 297—311.
202. *Gorbatow W. M., Spirin E. T., Gorbatow A. W.* Einige Aspekte über die Theorie der Adhäsion von serkleinertem Fleisch.—*Die Fleischwirtschaft*, 1971, Jg. 51, N 3, s. 309—312.
203. *Gorbatov V. M., Spirin E. T., Gorbatov A. V.* Some aspects of the theory of comminuted meat adhesion.—*J. of Food Technol.*, 1972, v. 7, N 1, p. 1—11.
204. *Grau R.* Fleisch und Fleischwaren. Verlag P. Parey in Berlin und Hamburg, 1969, 312 s.
205. *Haighton A. J.* Die Konsistenz von Margarine und Fetten.—*Fette, Seifen, Anstrichmittel*, 1963, N 6, s. 479—482.
206. *Hamm R., Rede R.* Zur Rheologie des Fleisches. VII. Einfluss des Fetgehaltes und der Temperature auf das Fleisshverhalten von Bräten.—*Die Fleischwirtschaft*, 1975, Jg. 55, N 1, s. 199—202.
207. *Hamm R., Riesner K.* Zur Rheologie des Fleisches—*Die Fleischwirtschaft*, 1967, Jg. 47, N 10, 1122—1128; 1968, Jg. 48, N 2, s. 192—201.
208. *Hammerle J. R., Mohsenin N. N.* Determination and analysis of failure stresses in egg shells.—*J. Agric Engng. Res.*, 1967, v. 12, N 1, p. 13—21.

209. *Metzner A. B., Gluck D. F.* Heat Transfer to non—newtonian fluids under laminar—flow conditions.—*Chem. Engng Sci.*, 1960, v. 12, N 3, p. 185—190.
210. *Mohsenin N. N.* Application of engineering techniques to evaluation of texture of solid food materials.—*J. of Texture Studies*, 1970, N 1, p. 133—154.
211. *Puolanne E.* Verfahren für die Bestimmung der Konsistenz von Brühwurst.—*Die Fleischwirtschaft*, 1975, Jg. 55, N 9, s. 1267—1270.
212. *Rede R., Hamm R.* Zur Rheologie des Fleisches. VI. Dass thixotrope Verhalten von Modellbräten.—*Die Fleischwirtschaft*, 1973, Jg. 53, N 9, s. 1279—1282, 1285.
213. *Samel R., Muers M. M.* The age—thickening of sweetened condensed milk (Rheological properties).—*J. Dairy Research*, 1962, v. 29, N 3, p. 249—258.
214. *Scott—Blair G. W.* Le propriétés rhéologiques des denrées alimentaires. *Annales de la Nutrition en de l'Alimentation.*—*Revue bimestrielle*, 1969, v. 23, N 5, p. 80—93.
215. *Scott—Blair G. W.* Rheology of foodstuffs.—*Period. Polytechn. Chem. Eng.*, 1972, v. 16, N 1, p. 81—84.
216. *Sherman P.* General introduction to rheological properties of foods.—*Dachema—Monogr.*, 1974, v. 77, N 1505—1536, p. 9—27.
217. *Steiner E. H.* Eine Studie über die Gültigkeit der Casson—Fließgleichung für geschmolzene Schokolade bei niedrigen Schergefällen und verschiedenen Temperaturen.—*Rev. internat. chocolat.*, 1962, Jg. 17, N 5, s. 198, 200—204.
218. *Stevenson J. S.* Mixture density apparatus. Pat. USA. cl. 73—433, N 3330160, Appl. 30,10.64, Publ. 11.07.67.
219. *Tuomy J. M.* Definition and measurement of meat texture in military development and procurement.—*J. of Texture Studies*, 1976, v. 7, N 1, p. 5—9.
220. *Voisey P. W.* Engineering assessment and critique of instruments used for meat tenderness evaluation.—*J. of Texture Studies*, 1976, v. 7, N 1, p. 11—48.
221. *Voisey P. W.* Modernization of texture instrumentation.—*J. of Texture Studies*, 1971, v. 2, N 2, p. 129—195.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава I

Основы реологии мясных и молочных продуктов 8

Общие положения 8

Основные уравнения напряжений и деформаций 14

Классификация реологических тел и их основные структурно-механические свойства 29

Влияние температуры и влажности на структурно-механические свойства 44

Глава II

Методы и приборы для измерения структурно-механических свойств мясных и молочных продуктов 49

Общие положения 49

Методы и приборы для измерения сдвиговых свойств 53

Ротационные вискозиметры 55

Капиллярные вискозиметры 88

Пенетрометры, коисистометры и другие вискозиметры 102

Методы и приборы для измерения компрессионных характеристик 111

Методы и приборы для измерения характеристик продуктов на границе раздела с твердыми телами 121

Глава III

Сдвиговые свойства мясных и молочных продуктов 133

Сдвиговые свойства твердообразных продуктов 133

Влияние различных технологических факторов на структурно-механические свойства 147

Сдвиговые свойства жидкообразных продуктов и влияние на них различных технологических факторов 186

Глава IV

Компрессионные характеристики и плотность мясных и молочных продуктов 209

Компрессионные характеристики мясных продуктов 209

Компрессионные характеристики молочных продуктов 231

Плотность мясных и молочных продуктов 235

Глава V

Поверхностные характеристики мясных и молочных продуктов 240

Адгезионные характеристики (липкость) мясных и молочных продуктов 240

Фрикционные характеристики мясных и молочных продуктов 262

Глава VI

Реологические исследования и расчеты некоторых рабочих органов машин 273

Общие положения 273

Приборы, стенды и методы исследования рабочих органов машин 276

Уравнения движения пластично-вязких продуктов 289

Реологические расчеты 308

Глава VII

Устройства для перемещения пластично-вязких мясных и молочных продуктов 323

Насосы 323

Устройства для пневмогидротранспортировки продуктов 352

Приложения 361

Предметный указатель 363

Список использованной литературы 369

ПРИВЯЗЬ ДОЛЖНА БЫТЬ ПРОЧНОЙ!

