

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКА ДЕРЖАВНА ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ

С.Є. Чижов

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ АПАРАТІВ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

для студентів денної і заочної форми навчання
спеціальності 6.050601 «Теплоенергетика»

Запоріжжя
2012

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКА ДЕРЖАВНА ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ

С.Є. Чижов

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ АПАРАТІВ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

для студентів денної і заочної форми навчання
спеціальності 6.050601 «Теплоенергетика»

ЗАТВЕРДЖЕНО:
на засіданні кафедри ТЕ
протокол №14 від 08.05.2012 р.

Запоріжжя
2012

Навчальний посібник з курсу «Дослідження та випробування апаратів теплотехнології» складений відповідно до робочої програми навчальної дисципліни «Дослідження та випробування апаратів теплотехнології» і призначений для доповнення теоретичних знань, придбаних при прослуховуванні дисципліни «Дослідження та випробування апаратів теплотехнології» студентами денної і заочної форми навчання за фахом 6.050601 «Теплоенергетика».

Склав: С.Є. Чижов, ст. викладач

Відповідальний за випуск: завідувач кафедри Теплоенергетики
Яковлева І.Г. - д.т.н., професор

Рецензенти:

Завідувач кафедри технології авіаційних двигунів Запорізького національного технічного університету д.т.н., професор Качан Олексій Яковлевич

Завідувач кафедри охорони навколишнього середовища Запорізької Державної інженерної академії к.т.н., доцент Кожем'якин Геннадій Борисович

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ОСНОВНІ ПИТАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ РОБОТИ	6
1.1 Методи обґрунтування тем досліджень.....	11
1.2 Аналіз інформації по темі дослідження.....	12
1.3 Методологія дослідження.....	12
1.4 Методи теоретичних досліджень.....	15
1.5 Аналітичні методи дослідження.....	18
1.6 Аналітичні методи досліджень з використанням експериментів.....	19
1.7 Ймовірно-статистичні методи досліджень.....	21
1.8 Методи системного аналізу.....	23
1.9 Методологія експерименту.....	23
1.10 Розробка плану-програми експерименту	23
1.11 Фізичний експеримент в теплоенергетиці.....	24
1.12 Моделювання фізичних явищ і технічного устаткування.....	25
1.13 Вживання теорії подібності для узагальнення результатів експерименту.....	25
1.14 Статистичні методи оцінки вимірів в експериментальних дослідженнях.....	28
1.15 Способи виміру, їх характеристики.....	28
1.16 Основні поняття і визначення теорії погрішності.....	29
1.17 Характеристики випадкових величин.....	30
1.18 Інтервальна оцінка за допомогою довірчої вірогідності.....	30
1.19 Встановлення мінімальної кількості вимірів.....	31
1.20 Виключення грубих помилок ряду.....	32
1.21 Статистичні критерії і їх вживання.....	33
1.22 Методи підбору емпіричних формул.....	34
1.23 Регресійний аналіз. Визначення законів розподілу і їх адекватності експериментальних даних.....	42
1.24 Математичне моделювання теплових процесів апаратів теплотехнології.....	43
2 ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ВІДШУКАННЯ ОПТИМУМУ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ	59
2.1 Функція однієї змінної. Умови екстремуму.....	59
2.2 Чисельні методи відшукування безумовного оптимуму.....	60
2.3 Одновимірний оптимізаційний пошук. Методи виключення інтервалів: правило виключення інтервалів; етап встановлення кордонів інтервалу; етап зменшення інтервалу.....	61
2.4 Методи зменшення інтервалів.....	61
2.5 Методи оцінювання з використанням квадратичної апроксимації.....	64
2.6 Методи з використанням похідних.....	66
2.7 Метод пошуку з використанням кубічної апроксимації.....	70
2.8 Порівняння методів.....	72
2.9 Функції декількох змінних. Пошук оптимуму.....	72
2.10 Методи прямого пошуку.....	73
2.11 Градієнтні методи.....	79
3 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИПРОБУВАНЬ	84
3.1 Випробування. Основні терміни і визначення.....	87
3.2 Види випробувань.....	92
3.3 Атестація випробувального устаткування.....	98
3.4 Періодична атестація випробувального устаткування.....	100
3.5 Зовнішні впливаючі чинники.....	102
3.5.1 Класифікація зовнішніх впливаючих чинників.....	102
3.5.2 Клас механічних зовнішніх впливаючих чинників.....	103

3.5.3 Клас кліматичних і інших природних ЗВЧ.....	104
3.5.4 Клас біологічних зовнішніх впливаючих чинників.....	106
3.5.5 Клас радіаційних зовнішніх впливаючих чинників.....	106
3.5.6 Клас ЗВЧ електромагнітних полів.....	107
3.5.7 Клас ЗВЧ спеціальних середовищ.....	108
3.5.8 Клас термічних зовнішніх впливаючих чинників.....	109
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	121

ВСТУП

При вивченні курсу «Дослідження і випробування апаратів теплотехнології» ставляться наступні основні задачі:

- ознайомлення студентів з методами постановки і організації дослідження;
- розвинути у студентів навиків пошуку і обробки науково-технічної інформації;
- освоєння студентами сучасних методів експериментального дослідження і обробки результатів експерименту;
- розвиток у студентів навиків самостійної роботи - уміння самостійно формулювати задачі дослідження і розробляти методика проведення експерименту;
- розвиток у студентів навиків ухвалення інженерних рішень.

Ефективне функціонування сучасного виробництва неможливе без його систематичного технічного переозброєння. Останнє у свою чергу базується на досягненнях науки і техніки. При цьому елементи дослідження всі більшою мірою входять в інженерну діяльність, оскільки розробка нових технологічних процесів, проектування апаратів і механізмів для їх реалізації і, нарешті, впровадження досягнень науки у виробництво вимагає постійного пошуку нових ідей, проведення досліджень роботи механізмів і технологічних апаратів, вибору оптимальних параметрів і режимів процесів. Тому, інженерів-теплоенергетику необхідно володіти методикою пошуку необхідної інформації, вміти ставити задачі дослідження, знати методи і засоби виміру параметрів роботи апаратів, володіти навиками проведення експерименту, обробки, аналізу і узагальнення результатів дослідження, а також теорією ухвалення інженерних рішень. В зв'язку з цим, метою викладання даної дисципліни є вивчення питань практичної організації науково-технічного пошуку, аналізу і узагальнення результатів дослідження, опанування теорії ухвалення інженерних рішень.

З елементами досліджень і випробувань студенти зустрічаються в процесі навчання у вузі, в різних формах учбового процесу: при читанні лекцій, на практичних і лабораторних заняттях, учбовій і виробничій практиці, при виконанні курсових робіт і т.д.

У цьому посібнику передбачається знайомство з базовими питаннями методики науко-технічних досліджень, з сучасними методами моделювання властивостей матеріальних об'єктів, методами планування і проведення експериментів, математичною обробкою їх результатів, пошуком оптимальних рішень, впровадженням дослідницьких робіт у виробництво, що дозволить майбутнім фахівцям творчо вирішувати складні питання технічного переозброєння галузі.

Для цього треба поетапно розібрати всі необхідні складові порушених питань.

1 ОСНОВНІ ПИТАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ РОБОТИ

Одна з головних функцій науки і її цілей - пізнання об'єктивного світу. Впровадження науки у виробництво виражається в зростанні продуктивності праці, створенні нових машин і матеріалів, поліпшенні експлуатаційних показників, надійності і довговічності продукції, зниженні її собівартості.

Розкриваючи закономірні зв'язки дійсності, наука виражає їх в абстрактних поняттях і схемах, строго їй відповідних.

Розвиток науки йде від збору фактів, їх вивчення і систематизації, узагальнення і розкриття окремих закономірностей до зв'язаної, логічно стрункої системи наукових знань, яка дозволяє пояснити вже відомі чинники і передбачити нові.

Процес пізнання включає накопичення фактів. Без систематизації і узагальнення, без логічного осмислення фактів не може існувати жодна наука. З іншого боку, факти стають складовою частиною наукових знань, лише якщо вони виступають в систематизованому, узагальненому виді.

Найбільш високою формою узагальнення і систематизації знань є теорія. Під теорією розуміють вчення про узагальнений досвід, практику, що формулює наукові принципи і методи, які дозволяють узагальнити, пізнати існуючі процеси і явища, проаналізувати дію на них різних чинників і запропонувати рекомендації по використанню їх в практичній діяльності людей.

Коли фактичного матеріалу недостатньо, як засіб досягнення наукових результатів використовуються *гіпотези* - науково обгрунтовані припущення, що висуваються для пояснення якого-небудь процесу, які після перевірки можуть виявитися достеменними або помилковими. Гіпотеза виступає часто як первинне формулювання, чорновий варіант законів, що висуваються.

Формою здійснення і розвитку науки є *дослідження*, тобто вивчення процесів і явищ, аналіз впливу на них різних чинників, а також вивчення взаємодії між явищами з метою отримати переконливо доведені і корисні для науки і практики рішення з максимальним ефектом.

Дослідження має об'єкт, предмет, на пізнання якого воно направлене.

Об'єкт дослідження - це та частина матеріального світу, яка привернула увагу дослідника, їм може бути предмет матеріального світу.

Предмет дослідження - це дана сторона об'єкту дослідження, а також його досліджувані властивості і область використання.

Мета дослідження - визначення конкретного об'єкту і всебічне, достовірне вивчення його структури, характеристик, зв'язків на основі розроблених в науці принципів і методів пізнання, а також здобуття корисних для діяльності людини результатів, впровадження у виробництво і здобуття ефекту.

Метод - це сукупність прийомів або операцій практичного або теоретичного освоєння дійсності, підлеглих рішення конкретної задачі. Фактична різниця між методом і теорією має функціональний характер: формуючись як теоретичний результат попереднього дослідження, метод виступає як вихідний пункт і умова майбутніх досліджень.

Виконання дослідження нерозривно пов'язане з його *методологією*, під якою розуміють сукупність методів, способів, прийомів, їх певна послідовність, схема, прийнята при розробці дослідження.

Всі задачі можна розділити на емпіричних і теоретичних.

Емпіричні задачі направлені на виявлення, точний опис і ретельне вивчення різних чинників явищ, що вивчаються, і процесів.

Теоретичні задачі направлені на вивчення і виявлення причин, зв'язків залежностей, що дозволяють встановити поведінку об'єкту, визначити і вивчити його структуру,

характеристику на основі розроблених в науці принципів і методів пізнання. В результаті отриманих знань формують закони, розробляють теорію, перевіряють факти. Теоретичні пізнавальні задачі формують так, щоб їх можна було перевірити емпірично.

Відповідно до цього в кожному науковому дослідженні можна виділити два рівні:

емпіричний - на якому відбувається процес накопичення фактів;

теоретичний - досягнення синтезу знань (у формі наукової теорії).

Згідно цим рівням, загальні методи пізнання можна розділити на три групи, грані між якими визначені приблизно:

- методи емпіричного дослідження;
- методи, використовувані на емпіричному і теоретичному рівнях;
- методи теоретичного дослідження.

Результати досліджень оцінюються тим вище, чим вище науковість зроблених висновків і узагальнень, чим достовірніше вони і ефективніше. Вони повинні створювати основу для нових розробок.

Фундаментальні дослідження направлені на створення нових принципів. Мета їх - розширити знання суспільства, більш глибоко зрозуміти закони природи, розробити нові теорії.

Прикладні дослідження базуються на результатах фундаментальних досліджень і направлені на створення нових методів, на основі яких розробляють нове устаткування, нові машини і матеріали, способи виробництва і організації робіт і ін. Вони задовольняють потребу суспільства в розвитку конкретної галузі виробництва.

Мета розробок - перетворювати прикладні (або теоретичні) дослідження в технічні застосування. Вони не вимагають здобуття нових наукових досліджень. Кінцева мета розробок, які проводяться в дослідно-конструкторських бюро, проектних, дослідних виробництвах - підготувати матеріал для впровадження.

Дослідницьку роботу проводять в певній послідовності (рисунки 1.1):

1) *Формулювання і обґрунтування актуальності вибраної теми.*

Загальне ознайомлення з проблемою, по якій належить виконувати дослідження. Попереднє ознайомлення з літературою і класифікація найважливіших напрямів. Формулювання теми дослідження. Складання анотації (короткого плану) дослідження. Складання загального календарного плану дослідницької роботи. Попереднє визначення очікуваного економічного ефекту.

2) *Постановка мети і задач дослідження.*

Постановка задачі досліджень є важливим етапом вивчення роботи теплових процесів і установок. Правильно сформульована задача досліджень значною мірою полегшує її рішення. При вивченні теплових процесів і установок можна виділити два типи задач: 1) встановлення залежності зміни окремих показників процесу від вихідних параметрів матеріалу або технологічного процесу; 2) оптимізація окремих параметрів при заданих ресурсних обмеженнях.

До задач першого виду відноситься, наприклад, знаходження впливу швидкості руху і температури теплоносія на зміну вологовмісту матеріалу при сушці, зміна температури матеріалу на поверхні і в центрі при тепловологій обробці матеріалу і т.д.

До задач другого виду при тепловій обробці матеріалів відносяться задачі оптимізації, які, у свою чергу, можуть бути розділені на дві групи: 1) досягнення заданої мети при мінімальній витраті ресурсів або мінімальному рівні чинників (t° , t_r ,...); 2) досягнення максимальних значень показників при обмеженій витраті ресурсів або величини параметрів ($R_{сж}$, $R_{из}$,...).

3) *Визначення об'єкту і предмету дослідження.*

Об'єкт - це процес або явище, які продовжують проблемну ситуацію і вибрані для вивчення. Предмет - це те, що поміщається в межах об'єкту, це дана сторона об'єкту дослідження і його досліджувані властивості і сфера застосування. Об'єкт і предмет дослідження як категорії наукового процесу співвідносяться між собою як загальне і

приватне в об'єкті виділяється та його частина, яка є предметом дослідження. Саме на нього і направлена основна увага дослідника.

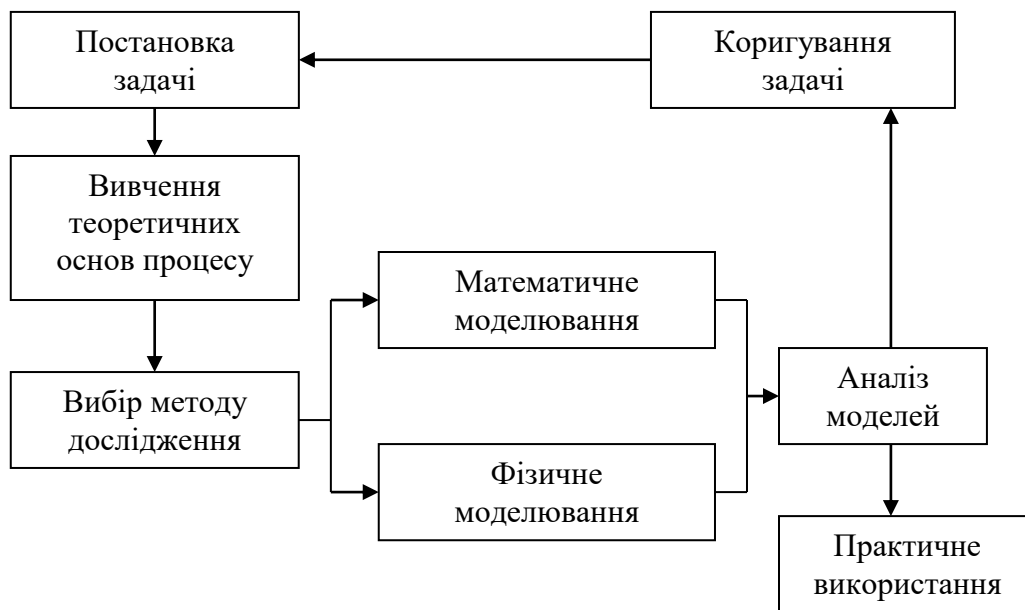


Рисунок 1.1 - Схема послідовності проведення досліджень

4) Вибір методів (методики) дослідження.

Вибір методу досліджень визначається формулюванням задачі, глибиною вивчення тих або інших теплових процесів, необхідністю обхвату окремих або груп параметрів, а також кінцевою метою роботи (встановлення впливу і взаємозв'язку при створенні промислових установок).

У практиці експериментальних досліджень найбільш відомі традиційні нестатистичні методи досліджень, методи, засновані на математичному або фізичному моделюванні (рисунок 1.2). Всі вони тісно зв'язані між собою. Наприклад, здобуття експериментальних даних у всіх випадках може бути виконане на одній і тій же установці. Проте вони характеризуються і значними відмінностями при постановці експерименту, можливістю обхвату незалежних змінних, об'ємом використання обчислювальної техніки.

Нестатистичний метод дослідження зводиться до постановки дослідів в такій послідовності, аби при переході від одного досвіду до іншого змінювалося значення лише одній незалежній змінної, а всі останні змінні залишалися на деякому фіксованому рівні. Якщо між незалежними змінними існує просте математичне співвідношення, то воно може бути виражене аналітичною залежністю $y=f(x)$, де $f(x)$ - лінійне або статичне вираження. Для знаходження невідомих застосовується один із способів - графічний, метод середніх, метод найменших квадратів.

Нестатистичний метод дослідження має ряд недоліків: відрізняється значними витратами часу на виконання великої кількості випробувань, обмеженим обхватом параметрів, неможливістю перенесення отриманих закономірностей на інші аналогічні системи.

5) Теоретичні дослідження.

Вивчення фізичної суті, часто виконання пошукових (попередніх) експериментів. Формулювання гіпотези і вибір, обґрунтування фізичної моделі. Математизація аналітичних виразів. Теоретичний аналіз отриманих виразів.

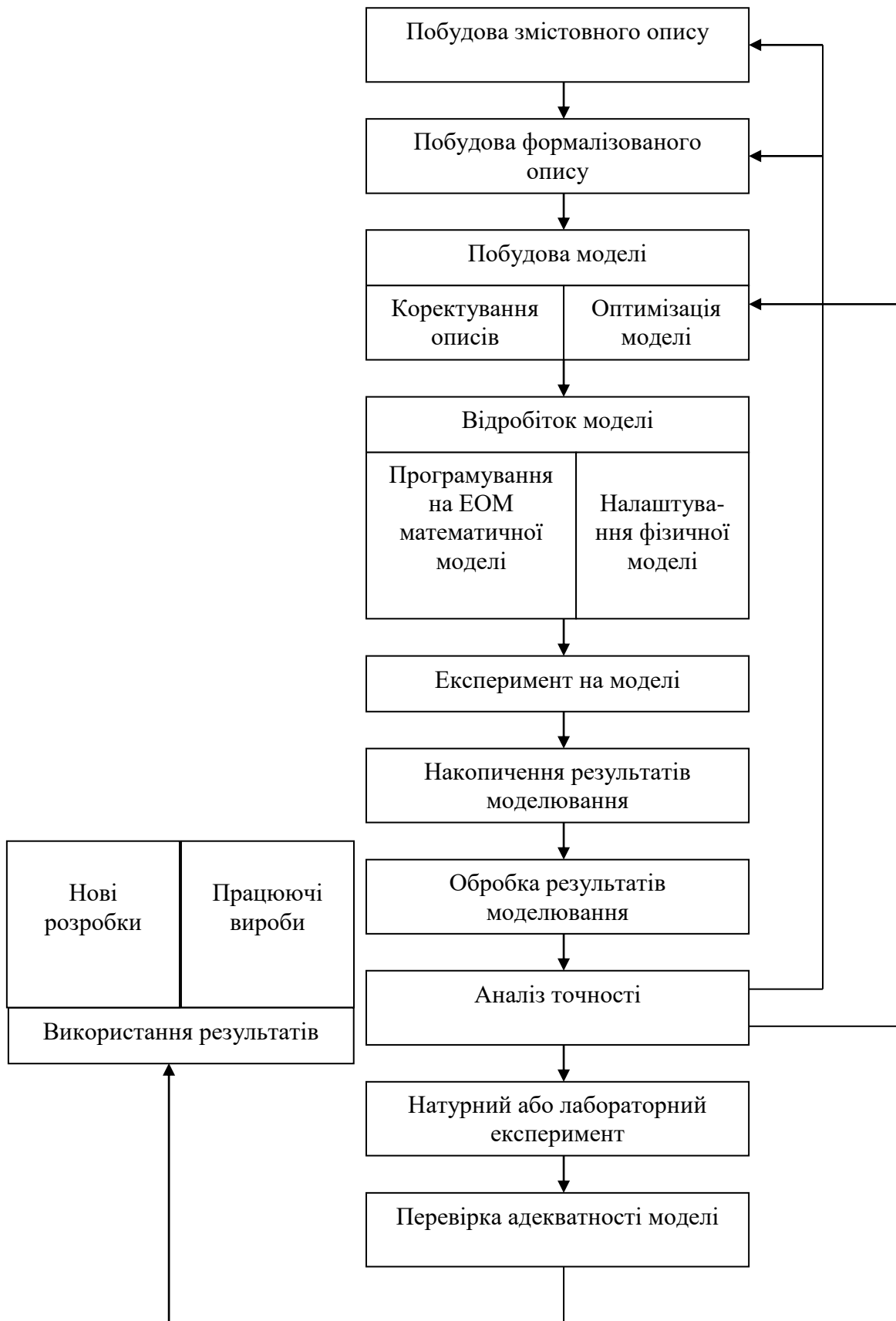


Рисунок 1.2 - Схема процесу моделювання

6) *Теоретичні дослідження.*

Вивчення фізичної суті, часто виконання пошукових (попередніх) експериментів. Формулювання гіпотези і вибір, обґрунтування фізичної моделі. Математизація аналітичних виразів. Теоретичний аналіз отриманих виразів.

7) *Експериментальні дослідження.*

Розробка мети і задачі експерименту. Планування експерименту. Розробка методики проведення експериментів. Вибирання засобів вимірів. Конструювання приладів, макетів, апаратів, моделей, стендів, установок і інших засобів експерименту. Обґрунтування засобів вимірів. Проведення експерименту. Обробка результатів вимірів.

8) *Формулювання висновків і оцінка отриманих результатів. Оформлення наукових досліджень.*

Загальний аналіз теоретично-експериментальних досліджень. Зіставлення експериментів з теорією. Аналіз. Уточнення теоретичних моделей, досліджень і висновків. Додаткові експерименти у разі потреби. Перетворення гіпотези на теорію. Формулювання наукових і виробничих висновків, складання науково-технічного звіту.

9) *Впровадження і визначення економічної ефективності.*

Сучасна теплоенергетика є крупною високорозвинутою галуззю народного господарства. Будучи основою розвитку всіх базових галузей промисловості, вона в значній мірі визначає науково-технічний прогрес.

Перед енергетикою поставлена задача стійкого і безперебійного постачання промисловості країни енергією, в першу чергу - електричною. У зв'язку з цим великі задачі стоять і перед теплоенергетикою, тепловою енергією, яка займається перетворенням в інші види енергії, головним чином в електричну і механічну.

Розвиток енергетики в даний час йде по шляху підвищення одиничної потужності устаткування. Подальше нарощування потужності пов'язане з проблемами створення потужніших турбін і котлів з підвищеними значеннями ККД, що вимагає вирішення ряду існуючих проблем.

Важливим напрямом є захист довкілля від шкідливої дії підприємств енергетики. Для зменшення викидів необхідно удосконалити процеси спалювання органічних палив, розробляти методи попередньої обробки палив в цілях зниження вмісту сірки в продуктах викидів. Важливим є також рішення питання зниження теплового забруднення середовища за рахунок зменшення температури води, що скидається в прилеглі басейни, і відхідних газів.

Економія паливно-енергетичних ресурсів є важливим напрямом в енергетичній політиці країни, що досягається за рахунок вдосконалення енергоємних виробничих процесів, розробки нових енергозберігаючих технологій в різних галузях народного господарства.

Дуже важливим є напрям, пов'язаний з економією витрачання матеріалів і збільшенням терміну роботи устаткування.

У зв'язку з безперервним дорожчанням енергії у всіх країнах ведуться інтенсивні дослідження по використанню поновлюваних джерел енергії - сонця, вітру, морів і океанів, теплоти Землі - в цілях створення технічних пристроїв для концентрації і акумуляції енергії, в збільшенні коефіцієнта використання енергії вітру за рахунок вдосконалення аеродинаміки профілів і конструкції вітроустановки, зниження її вартості. Використання енергії морів і океанів може здійснюватися створенням приливних і хвилевих електростанцій, а також електростанцій морських течій. При відповідному розвитку геотермальних теплових електростанцій енергія, що виробляється ними, буде найбільш дешевою.

Одним з важливіших є дослідження апаратів теплотехнології. Робота теплових установок пов'язана з одночасним протіканням теплових, масообмінних, гідромеханічних та інших процесів. При цьому на них впливають (та ще й не однаково) багато параметрів.

Великі труднощі представляє створення нових видів теплових установок і реконструкція існуючих потребує знання величин основних параметрів теплових процесів. Саме при вивченні теплових, масообмінних і гідромеханічних процесів знайшли розвиток методи фізичного і математичного моделювання, теорія подібності і інші прийоми, що дозволяють досить надійно перейти від лабораторних установок до промислових, отримати необхідну інформацію при вивченні процесів на моделях і розповсюдити отримані залежності на групи подібних процесів. Особливо широкі можливості вивчення теплових процесів відкриваються у зв'язку з вживанням обчислювальної техніки, розробкою методів математичного планування експериментів і статистичної обробки результатів.

1.1 Методи обґрунтування тем досліджень

Тема - це задача, яке охоплює певну область дослідження. Вона базується на багаточисельних дослідницьких питаннях.

При розробці теми висувається конкретна задача в дослідженні - розробити новий матеріал, машину, конструкцію, прогресивну технологію.

До теми пред'являють ряд вимог.

Вона має бути *актуальною*, тобто важливою, що вимагає швидкого рішення в даний час. Це вимога одна з основних. Чіткого критерію для встановлення актуальності доки немає. Так, при порівнянні двох тем теоретичних досліджень міру актуальності може оцінити крупний учений галузі або науковий колектив. При оцінці актуальності прикладних наукових розробок помилки не виникне, якщо актуальнішою виявиться та тема, яка забезпечить більший економічний ефект.

Тема повинна мати *наукову новизну*, вносити вклад до науки. Це означає, що тема в такій постановці ніколи не розроблялася і в даний час не розробляється, тобто дублювання виключається.

Тема має бути *економічно ефективною* і мати *значущість*. Будь-яка тема прикладних досліджень повинна давати економічний ефект в народному господарстві. При розробці теоретичних досліджень інколи вимога економічності може поступатися вимозі значущості.

Важливою характеристикою теми є можливість швидкого впровадження у виробництво. Обґрунтував тему, виконавець повинен добре знати виробництво і його запити на даному етапі.

У ряді випадків при плануванні тем виникає необхідність у виборі найбільш перспективних, економічно обґрунтованих тем. В цьому випадку оцінку народногосподарської необхідності розробки тем необхідно визначати чисельними критеріями.

Найпростішим є критерій економічної ефективності

$$\hat{E}_y = \dot{Y}_r / C_e,$$

де E_n - передбачуваний економічний ефект від впровадження;

Z_u - витрати на дослідження.

Чим вище K_e , тим ефективніше тема і вище її народногосподарська ефективність.

Проте критерій K_e не враховує об'єм впроваджуваної продукції, період впровадження. Об'єктивнішим є критерій, що обчислюється за формулою

$$\hat{E}_y = \frac{C_a \cdot \sqrt{\bar{D}}}{C_i},$$

де C_2 - вартість продукції за рік після освоєння дослідження і впровадження у виробництво;

T - тривалість виробничого впровадження в роках;

3_o - загальні витрати на виконання дослідження, дослідне і промислове освоєння продукції і річні витрати на її виготовлення за новою технологією.

Висока ефективність теми може бути досягнута за умови, що ще до її розробки виконано *техніко-економічне обґрунтування* (ТЕО).

Мета складання ТЕО - встановити дані про новітні досягнення науки і техніку по даній темі в нашій країні і за кордоном. У ньому обґрунтовується народногосподарська потреба, передбачувані об'єми впровадження, очікувані техніко-економічні і соціальні результати.

До складу ТЕО входять наступні розділи: вихідні положення, результати заздалегідь виконаних патентних пошуків на новизну і перспективність, народногосподарська необхідність, об'єм і місце впровадження, техніко-економічні і соціальні результати.

В результаті складання ТЕО робиться вивід про доцільність і необхідність виконання дослідження.

1.2 Аналіз інформації по темі дослідження

Після вибору і обґрунтуванню теми роблять інформаційний пошук (сукупність операцій, направлених на відшукування літератури по темі, що розробляється). Мета пошуку - всебічний аналіз інформації по темі, освітлення стану питання (складання аналітичного огляду), уточнення при необхідності теми, обґрунтування (уточнення після ТЕО) мети і завдань дослідження.

Всю знайдену інформацію необхідно класифікувати і систематизувати. Літературні джерела потрібно піддавати ретельному критичному аналізу. В процесі активного аналізу ураховують власні міркування і думки, виявляються найбільш актуальні питання, що підлягають дослідженню в першу чергу.

Іншим варіантом аналізу є *тематичний*. Весь об'єм інформації систематизують по питаннях даної теми. Цей варіант огляду інформаційних джерел простіший, він вимагає менших витрат часу. Проте він менш повно дозволяє проаналізувати інформацію, що є по темі.

Керівною ідеєю всього аналізу інформації має бути обґрунтування актуальності і перспективності передбачуваної мети дослідження.

На підставі результатів опрацювання інформації роблять методологічні висновки, в яких підводять підсумок критичного аналізу. У висновках мають бути освітлені наступні питання: актуальність теми; останні досягнення в області теоретичних і експериментальних досліджень по темі; найважливіші, найбільш актуальні теоретичні і експериментальні задачі, а також виробничі рекомендації, що підлягають розробці в даний момент; технічна доцільність і ефективність цих розробок.

На основі вказаних висновків формулюють в загальному виді мету і конкретні задачі дослідження.

1.3 Методологія дослідження

Метод дослідження - це сукупність прийомів, сприяючих вивченню або практичному здійсненню якого-небудь процесу. Вживаний в дослідженнях метод залежить від характеру досліджуваного об'єкту: наприклад, метод спектрального аналізу використовується для вивчення випромінюючих тіл, метод виміру твердості - для вивчення твердих тіл і т.д.

Метод дослідження визначається засобами дослідження, що є на даний період, які є матеріальною системою, що заміщає об'єкт дослідження (моделювання процесів). Методи і засоби дослідження тісно зв'язані між собою, стимулюють розвиток один одного.

У кожному дослідженні можна виділити два основні рівні:

- 1) емпіричний, на якому відбувається процес сприйняття, встановлення і накопичення фактів;
- 2) теоретичний, на якому досягається синтез знання, що виявляється перш за все у виді створення теорії.

Наукові знання є системою понять, що відображають процес розвитку довколишньої дійсності. Прикладом наукових понять в області термодинаміки можуть бути температура і ідеальний газ, а в області теорії теплообміну - теплопровідність, конвекція і тепловий потік.

Емпіричний рівень дослідження пов'язаний з виконанням експериментів, спостережень і тому тут велика роль фізичних форм віддзеркалення навколишнього світу.

Методи емпіричного дослідження.

Спостереження - це систематичне цілеспрямоване вивчення об'єкту дослідження. В процесі спостереження безпосередньої дії спостерігача на об'єкт дослідження не відбувається. Для того, щоб бути плідним, спостереження повинне відповідати таким вимогам:

- а) спостереження проводиться для конкретного, чітко поставленої задачі;
- б) планованості (виконується за планом, складеному відповідно до задачі спостереження);
- в) цілеспрямованості (спостерігаються лише певні сторони явища, які викликають інтерес в ході дослідження);
- г) активності (спостерігач активно шукає необхідні об'єкти, сторони явища);
- д) систематичності (спостереження ведеться безперервно або по певній системі).

Спостереження як метод пізнання дає можливість отримати первинну інформацію у виді сукупності емпіричних тверджень. Емпірична сукупність створює первинну схематизацію об'єктів реальності - вихідних об'єктів дослідження.

Порівняння - це процес встановлення подібності або відмінності предметів і явищ дійсності, а також знаходження загального, властивого двом або декільком об'єктам.

Метод порівняння повинен відповідати наступним умовам:

- а) можуть порівнюватися лише такі явища, між якими можлива деяка об'єктивна спільність;
- б) порівняння необхідно виконувати по найбільш важливих, засадничих (у плані конкретної задачі) властивостях.

Різні об'єкти можуть порівнюватися безпосередньо або через їх порівняння з яким-небудь іншим об'єктом (еталоном). При цьому в першому випадку отримують якісні результати (більше-менше, вище-нижче). Порівняння з еталоном дозволяє отримувати кількісні характеристики. Такі порівняння називають вимірами.

Вимір - це визначення чисельного значення деякої величини за допомогою одиниць виміру. Вимір передбачає наявність наступних основних елементів: об'єкту виміру, еталону, вимірювальних пристроїв, методу виміру.

Вимір розвинувся з операції порівняння, проте воно більш потужніший і універсальний пізнавальний спосіб.

Виміри дають досить точні, кількісно визначені описи властивостей тіл, суттєво розширюючи пізнання. В результаті високоякісних вимірів можуть бути встановлені факти і зроблені емпіричні відкриття, що ведуть до корінної зміни поглядів в певній області. Оскільки виміри за допомогою приладів і інструментів не можуть бути абсолютно точними, то в ході їх велике значення приділяється оцінці погрішності вимірів.

Для точних наук характерним є органічний зв'язок спостережень і експериментів із знаходженням числових значень характеристик досліджуваних об'єктів.

У теплоенергетичних дослідженнях питання виміру займають первинне місце.

Експеримент - система операцій, дій і спостережень, направлених на здобуття інформації про об'єкт при дослідницьких випробуваннях. Це такий метод дослідження

об'єкту, за допомогою якого дослідник активно і цілеспрямовано впливає на нього за допомогою створення штучних умов або використання природних умов, необхідних для виявлення відповідної властивості.

Експеримент використовується на завершальній стадії дослідження і є критерієм істинності теорій і гіпотез. З іншого боку, експеримент у багатьох випадках є джерелом нових теоретичних вистав, що розвиваються на основі даних проведеного досвіду або законів, наступних з експерименту.

Експеримент включає виділення об'єкту дослідження, створення необхідних умов для його виконання, активну дію на об'єкт дослідження, процеси спостереження і виміру.

Переваги експериментального дослідження об'єкту в порівнянні із спостереженням наступні:

а) в процесі експерименту можна вивчати явище «в чистому виді», звільнившись від побічних чинників, які затінують основний процес;

б) у експериментальних умовах можна досліджувати властивості об'єкту;

в) повторюваність експерименту: можна проводити досліди стільки раз, скільки необхідно.

Експеримент проводять в наступних випадках:

- при спробі виявлення раніше невідомих властивостей об'єкту;

- при перевірці правильності теоретичних побудов;

- при демонстрації явища.

У дослідженні експеримент і теорія тісно взаємозв'язані. Всілякі ігнорування експерименту обов'язково приводять до помилок, тому всебічний розвиток експериментальних досліджень є одним з найбільш важливих доріг розвитку сучасної науки.

Експерименти можуть бути натуральними і модельними. Натуральний експеримент вивчає явище і об'єкти в їх природному стані, модельний - моделює ці процеси дозволяє вивчати ширший діапазон зміни визначальних чинників.

Методи теоретичного рівня дослідження.

Ідеалізація - це уявне створення об'єктів і умов, які не існують насправді і не можуть бути створені практично. Вона дає можливість позбавити реальні об'єкти деяких властивих ним властивостей або в думках наділити їх нереальними, гіпотетичними властивостями, дозволяючи отримати рішення задачі в кінцевому виді (ідеальний газ, абсолютно чорне тіло).

Ідеалізація досягається уявним переходом до граничного випадку в розвитку якої-небудь властивості. Будь-яка ідеалізація правомірна лише в певних межах.

Формалізація - це метод вивчення різних об'єктів, при якому основні закономірності процесів відображаються в знаковій формі, за допомогою формул або спеціальних символів. Формалізація забезпечує узагальненість підходу до рішення різних завдань, дозволяє формувати знакові моделі предметів, встановлювати закономірності між фактами, що вивчаються.

Гіпотеза - науково обґрунтована система висновків, за допомогою якої на основі ряду фактів робиться вивід про існування об'єкту, зв'язку або причини явища. Гіпотеза є формою переходу від фактів до законів.

Найбільш високою формою узагальнення і систематизації знань є *теорія*. Під теорією розуміють вчення про узагальнений досвід, практику, що формулює наукові принципи і методи, які дозволяють узагальнити, пізнати існуючі процеси і явища, проаналізувати дію на них різних чинників і запропонувати рекомендації по використанню їх в практичній діяльності людей.

До нових теорій пред'являється декілька основних вимог. Теорія має бути адекватною описуваному об'єкту або явищу, тобто повинна правильно їх відтворювати, що дозволяє в певних межах замінити експериментальні дослідження теоретичними.

Законом називається теорія, що володіє великою надійністю і підтверджена багаточисельними експериментами. Закон виражає загальні стосунки і зв'язки, які характерні для всіх явищ даного роду, класу.

Методи, які використовуються на емпіричному і теоретичному дослідженнях.

Абстрагування - це уявний відхід від незначних властивостей, зв'язків, стосунків предметів і виділення деяких властивостей, які цікавлять дослідника.

Процес абстрагування має два ступені. Перша - виділення найбільш важливого в явищах і встановлення факту незалежності або дуже незначної залежності досліджуваних явищ, яку можна не враховувати, від деяких чинників. Друга ступінь - реалізація можливостей абстрагування. Єство його полягає в тому, що один об'єкт замінюється іншим, простішим, який виступає як модель першого. Абстрагування дає можливість замінити в пізнанні складне простим, проте таким простим, яке відображає основне в цьому складному.

Аналіз - метод пізнання, який дає можливість розділяти предмети дослідження на складові частини (природні елементи об'єкту або його властивості і відношення) і виділяти його окремі властивості і зв'язки.

Синтез - навпаки, передбачає об'єднання окремих частин або властивостей предмету в єдине ціле.

Аналіз і синтез взаємозв'язані, вони є єдністю протилежностей.

Дедукція - метод переходу від загальних положень до приватних, здобуття з відомих істин нових істин з використанням законів і правил логіки. *Дедуктивною* називають таку конструкцію, в якій висновок по якому-небудь елементу безлічі робиться на підставі знання загальних властивостей всієї безлічі. Вмістом дедукції як методу пізнання є використання загальних наукових положень при дослідженні конкретних явищ.

Як приклад дедукції розглянемо диференціальне рівняння теплопровідності, яке за відсутності внутрішніх джерел теплоти і постійних теплофізичних властивостях середовища має наступний вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

З цього рівняння можуть бути отримані приватні, наприклад, для стаціонарного режиму і одновимірної задачі рівняння теплопровідності набирає виду

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$$

Під *індукцією* розуміють перехід від приватного до загального, коли на підставі знань, що стосуються частини предметів класу робиться вивід відносно класу в цілому. Дедукція і індукція є взаємно протилежними методами пізнання.

Вибір методу дослідження - один з важливих етапів дослідження. У дослідженнях, характерних для теплоенергетики, використовуються математичне (теоретичний метод) і фізичне (експеримент) моделювання, а також поєднання теоретичного і експериментального методів дослідження.

1.4 Методи теоретичних досліджень

Моделювання - метод, який базується на використанні моделі, як способу дослідження. Існує безліч методів, моделювання (предметне, аналогове, знакове та ін.).

Під моделями розуміють системи, які замінюють об'єкт пізнання і служать джерелом інформації відносно його, а також відтворюють головні особливості оригінала.

Найбільший інтерес при вивченні теплових процесів і установок представляють фізичні і математичні моделі.

Стандартних рекомендацій по вибору і побудові моделей не існує. Модель повинна відображувати істотні явища процесу. Дрібні чинники, зайва деталізація, другорядні явища лише ускладнюють модель, утрудняють теоретичні дослідження, роблять їх громіздкими, нецілеспрямованими. Тому модель має бути оптимальною по складності, бажано наочній, але головне - досить адекватною, тобто враховувати закономірності явища, що вивчається, з необхідною точністю.

При *фізичному моделюванні* модель і оригінал мають однакову фізичну природу; будь-яка експериментальна установка є фізичною моделлю якого-небудь процесу.

Фізичне моделювання відноситься до наочного моделювання, вживання якого засноване на використанні моделей, відтворюючих основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні характеристики оригінала. У основі фізичного моделювання лежать теорія подібності і метод аналізу розмірності. Необхідними умовами фізичного моделювання є геометрична і фізична подібність моделі і оригінала. У подібні моменти часу і в подібних точках простору значення змінних величин, що характеризують оригінала, мають бути пропорційні значенням тих же величин для моделі. Наявність такої пропорційності дозволяє виробляти перерахунок експериментальних результатів, що отримуються для моделі, на оригінала шляхом множення кожній з певних величин даної розмірності на коефіцієнт подібності.

Виходячи із законів і рівнянь фізики відомо, що ряд основних показників, що характеризують той або інший процес або явище, зв'язані строго певним чином. Якщо на їх основі можливо отримати комбінації безрозмірних величин, то вони повинні мати одне і те ж значення і для моделі, і для оригінала. Ці безрозмірні комбінації фізичних величин називаються критеріями подібності. Рівність всіх критеріїв подібності для моделі і оригінала є необхідною умовою фізичного моделювання.

Фізичне моделювання, розроблене на основі теорії подібності, дозволяє не лише встановити вплив груп параметрів на протікання теплових процесів, але і переносити закономірності, отримані на моделях, на промислові установки.

Математична модель - це сукупність рівнянь - диференціальних, інтегральних, алгебраїчних. Математичне моделювання набуває особливої цінності, коли виникає необхідність вивчити особливо складні процеси.

При *математичному моделюванні* модель і оригінал можуть мати однакову і різну фізичну природу. У першому випадку який-небудь процес досліджуються на основі його математичної моделі, що є системою рівнянь з їх відповідними умовами однозначності; у другому - використовують факт однакового по зовнішній формі математичного опису явищ різної фізичної природи.

Математичні моделі дозволяють кількісно досліджувати явища, що важко піддаються вивченню на фізичних моделях.

Математичне моделювання - один з видів знакового моделювання, яке забезпечує наближений опис явищ (процесів) за допомогою математичної символіки. Математичне моделювання - один із способів вивчення, прогнозування і управління вивчаємих процесів або явищ.

Математичне моделювання включає чотири етапи: 1) формулювання законів, що зв'язують основні об'єкти моделі; 2) дослідження математичних завдань, до яких наводить математичне моделювання; 3) перевірку узгодженості результатів спостережень з даними, отриманими на моделях; 4) аналіз моделі у зв'язку з накопиченням нових даних і модернізацією моделі.

Метод математичного моделювання, що зводить дослідження явищ зовнішнього світу до математичних завдань, займає провідне місце серед інших методів дослідження, особливо у зв'язку з вживанням ЕОМ. Математичні моделі є важливим елементом автоматизованих систем управління.

Математична модель для ЕОМ є програмою, тобто закодовану на машинній мові систему правил, слідуючи яким машина може відтворити хід модельованого процесу.

Вживання математичних моделей можна розглядати як деякі розумові експерименти, виконання яких особливо зручно із застосуванням ЕОМ.

Програючи програму, отримують цифрову інформацію про поведінку оригінала в певних умовах, про його функціональні зв'язки з довкіллям.

Математичне моделювання дозволяє охопити ряд параметрів, що впливають на хід процесу, встановити їх вплив, виконати оптимізацію окремих параметрів. Математичні моделі у виді рівнянь регресії дозволяють оперативно визначати кінцеві показники процесу (наприклад, тривалість теплової обробки) або властивості матеріалу, що піддається обробці з врахуванням проміжних технологічних параметрів, що входять в модель (t , v , W і т.д.).

Математичне моделювання дозволяє широко використовувати обчислювальну техніку, що, у свою чергу, забезпечує оперативне здобуття інформації, скорочує час виконання експериментів.

Аналіз як математичних моделей, так і критерійних рівнянь, отриманих в результаті фізичного моделювання, дозволяє отримати додаткові дані, не встановлені в явному виді при проведенні експерименту, оптимізувати значення окремих параметрів, провести імітацію процесу без виконання експерименту. Наприклад, через диференціювання отриманої залежності знайти екстремальне її значення - максимум або мінімум шуканого параметра.

Відповідність отриманій залежності реальному процесу дозволяє її рекомендувати при вирішенні завдань, зв'язаних розробкою промислових установок і оцінці ефективності організації виробничих процесів. Неадекватне віддзеркалення отриманими залежностями реальних процесів вимагає коректування спочатку поставленої задачі і повторення експерименту.

Натуральні моделі є масштабно змінними об'єктами, що дозволяють якнайповніше досліджувати процеси, що протікають в натуральних умовах.

Вивчити і проаналізувати об'єкт якнайповніше можна за умови, що його модель представлена описом фізичного єства і має математичний вид.

Аналіз багатобразних фізичних моделей процесів, що вивчаються, досліджується математичними методами, які можуть бути розділені на наступні основні групи:

Аналітичні методи дослідження (елементарна математика, диференціальні і інтегральні рівняння, варіаційне числення і інші розділи вищої математики), використовувані для вивчення безперервних, детермінованих процесів.

Методи математичного аналізу з використанням експерименту (метод аналогій, теорія подібності, метод розмірності).

Ймовірно-статистичні методи (математична статистика, дисперсійний і кореляційні аналізи, теорія надійності), використовувані для вивчення випадкових процесів, - дискретних і безперервних.

Методи системного аналізу (дослідження операцій, теорія управління, теорія безлічі). Вони застосовуються для дослідження складних моделей - систем з багатобразними і складними взаємозв'язками елементів, що характеризуються безперервністю і детермінованою, також дискретністю і випадковістю.

У технічних науках широко застосують прикладну математику, яка використовує так звані раціональні методи, що допускають наявність формулювань і тверджень, справедливі лише в даних реальних умовах. При цьому вони можуть уточнюватися в ході дослідження, базуватися на аргументах, заснованих на наближених рішеннях, аналогіях або експериментах.

1.5 Аналітичні методи дослідження

За допомогою аналітичних методів встановлюють математичну залежність між параметрами об'єкту, що вивчається. Ці методи дозволяють глибоко і всесторонньо вивчити досліджувані процеси, встановити точні кількісні зв'язки між аргументами і функціями, глибоко проаналізувати досліджувані явища.

Залежно від особливостей процесу, застосовують той або інший вид рівнянь для його опису:

1. При описі простих процесів або прагненні спростити досліджувану модель використовують елементарні функції і рівняння:

- лінійні (наприклад, при дослідженні шаруватих матеріалів);
- при дослідженні процесів, що протікають за принципом ланцюгового механізму (наприклад, розчинення, перемішування, охолодження і так далі) використовують експоненціальні, параболічні, показові функції;
- при вивченні коливальних процесів застосовують тригонометричні функції.

2. При аналізі форм і розмірів інженерних конструкцій користуються методами елементарної, аналітичної або накреслювальної геометрії.

3. Звичайні диференціальні рівняння використовують для теоретичного аналізу різних моделей простих і середніх по складності процесів.

Рівняння 1-го порядку мають вид

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

Рівняння вищих порядків

$$\frac{d^n y}{dx^n} = f(x, y)$$

Загальні вирішення таких рівнянь представляє сімейство кривих на площині. Для знаходження приватного рішення вказують початкові умови - значення функції f в деяких відомих точках x і y .

4. Великого поширення при вирішенні прикладних завдань набули диференціальні рівняння в приватних похідних. У них шукані рішення є функціями декількох незалежних змінних.

Наприклад, для аналізу теплового балансу тіла при його нагріванні або охолодженні використовують наступне рівняння

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

Будь-які диференціальні рівняння є моделлю цілого класу явищ, тобто сукупності явищ, що характеризуються однаковими процесами. При інтеграції рівнянь отримують безліч рішень, що задовольняють вихідному диференціальному рівнянню. Аби отримати з безлічі рішень одне, що задовольняє лише даному процесу, необхідно задати додаткові умови. Вони повинні чітко виділяти явище зі всього класу явищ.

Умови, які характеризують всі особливості даного процесу, називаються умовами однозначності і характеризуються наступними ознаками:

- 1) геометрією системи (форма і розміри тіла);
- 2) фізичними властивостями тіла;
- 3) початковими умовами, тобто станом системи в початковий момент;
- 4) граничними умовами, тобто взаємодією системи на кордонах з довкіллям.

Початкові і граничні умови називаються крайовими.

Задачі математичної фізики, у тому числі задачі тепломасообміну, ефективно вирішуються методами операційного перетворення Лапласа, Фур'є, Бесселя. Суть

операційного перетворення полягає в перекладі функції $f(t)$ змінної t , званою початковою або оригіналом, у функцію іншої змінної p , звану зображенням. При цьому вивчають не саму функцію (оригінал), а її змінене значення (зображення).

Перетворення здійснюється шляхом множення початкової функції на іншу і її інтегрування.

Використання функції зображення $f^*(p)$ дозволяє складні операції диференціювання і інтегрування $f(t)$ замінити простими операціями алгебри з $f^*(p)$, після чого виробляють зворотний перехід до $f(t)$.

Вживання таких перетворень має ряд переваг - простота, можливість вирішення завдань з різними крайовими умовами. Проте спроби вирішення нелінійних завдань із складними крайовими умовами за допомогою точних аналітичних методів зустрічають значні труднощі.

Одним з методів вирішення інтегральних рівнянь є метод послідовних наближень. Вживання знайшов також варіаційний метод.

Проте перераховані вище аналітичні методи дозволяють успішно вирішувати лише відносно прості задачі.

При необхідності вирішення складних диференціальних рівнянь або їх систем з нелінійними початковими і граничними умовами удаються до тих або інших наближених обчислень за допомогою чисельних методів.

Ідея чисельних методів (методи кінцевих різниць або сіток) полягає в наступному:

1. У плоскій області G , в якій розшукують рішення, будують сіткову область G_h , що складається з однакових вічок і наближається до G .

2. Задане диференціальне рівняння замінюють у вузлах побудованої сітки відповідним кінцево-різницевою рівнянням.

3. На підставі граничних умов встановлюють значення шуканого рішення в граничних вузлах області G_h .

Аби вирішити отриману систему кінцево-різницевою рівнянь, необхідно отримати рішення алгебраїчної системи з великим числом невідомих. В результаті знаходиться значення шуканої функції у вузлах сітки, тобто чисельне значення поставленої задачі. Вибір сіткової області виробляється залежно від конкретної задачі, але у всіх випадках контур сіткової області G_h слід вибирати так, щоб він можливо краще апроксимував контур заданої області G .

1.6 Аналітичні методи досліджень з використанням експериментів

Фізичні процеси можна досліджувати за допомогою *аналітичних і експериментальних* методів.

Аналітичні методи дозволяють вивчати процеси на основі математичних моделей, які містять велику кількість інформації і, як система рівнянь, дозволяють описувати елементарні фізичні процеси, з яких складається явище. Проте, використання математичних моделей супроводиться рядом складнощів. Для того, щоб зі всього класу знайти приватне рішення, властиве даному процесу, необхідно задати умови однозначності. Встановлення крайових умов вимагає проведення достовірних дослідів і ретельного аналізу експериментальних даних. Неправильне прийняття крайових умов наводить до того, що піддається теоретичному аналізу не той процес, який планується, а видозмінений. Крім того, в деяких випадках відшукати аналітичне вираження з врахуванням умов однозначності, що найреальніше відображують фізичне єство процесу, що вивчається, або взагалі неможливо, або надзвичайно скрутно. З іншого боку, спрощення вихідних диференціальних рівнянь може привести до спотворення фізичного єства процесу.

Експериментальні методи дозволяють глибоко вивчити процеси в межах точності техніки експерименту і сконцентрувати увагу на тих параметрах процесу, які представляють найбільший інтерес. Проте результати конкретного експерименту не можуть бути поширені на інший процес, навіть близький по фізичній суті, оскільки результати будь-якого експерименту відображають індивідуальні особливості лише досліджуваного процесу. З досвіду неможливо остаточно встановити, які з параметрів роблять вирішальний вплив на хід процесу, і як протікатиме процес, якщо змінювати різні параметри одночасно. Оскільки кожен конкретний процес досліджується в даному випадку самостійно, то, кінець кінцем, експериментальні методи дозволяють встановити приватні залежності між окремими змінними в строго певних інтервалах їх зміни. Аналіз змінних характеристик за межами цих інтервалів може привести до спотворення залежності, грубих помилок.

Таким чином, і аналітичні і експериментальні методи мають свої переваги і недоліки, які часто утрудняють ефективне вирішення практичних завдань. Виходом з ситуації, що склалася, є об'єднання позитивних сторін аналітичних і експериментальних методів.

Явища, процеси вивчаються не ізольовано один від одного, а комплексно. Різні об'єкти з їх специфічними змінними величинами об'єднуються в комплекси, що характеризуються загальними законами. Це дозволяє розповсюдити аналіз одного явища на інших або цілий клас аналогічних явищ. При такому принципі досліджень зменшується кількість змінних величин, вони замінюються узагальненими критеріями. В результаті спрощується шукане математичне вираження. На цьому принципі засновані методи поєднання аналітичних і експериментальних досліджень з методами аналогій, подібності, розмірності, методів моделювання, що є різновидом.

Метод аналогій можна використовувати, якщо існують процеси з різною фізичною природою, які мають ідентичне математичне вираження. Залежно від того, що береться за оригінала, а що за модель, можуть бути різні види моделювання. Так, якщо тепловий потік вивчають на моделі з рухом рідини, то моделювання називають гідравлічним, якщо тепловий потік досліджують на електричній моделі, моделювання називають електричним. Моделювання може бути акустичним, механічним і ін. Доцільність вибору виду моделювання залежить від складності процесу, що вивчається, і моделі, її вартості і експлуатації, можливості постановки експериментів, точності результатів.

Ідентичність математичних виразів процесів оригінала і моделі не означає, що процеси абсолютно аналогічні. Для того, щоб на моделі максимально моделювати процес оригінала, що вивчається, необхідно дотримувати критерій аналогій. Для порівнянності рівнянь, що описують різні фізичні процеси, їх необхідно представити в безрозмірних величинах: кожен змінну величину P_n представити у виді добутку постійної розмірності на змінну безрозмірну P_0

$$P = P_n \cdot P_0$$

За допомогою критерію аналогій встановлюють параметри моделі по вихідному рівнянню об'єкту. Кількість критеріїв аналогій на одиницю менше числа членів вихідного вираження, що вивчається. Оскільки число невідомих більше числа рівнянь, то деякими параметрами моделі задаються. Звичайно це час спостереження або протікання процесу на моделі, яке має бути зручним для спостереження.

Теорія подібності - це вчення про подібність явищ. Вона найбільш ефективна у тому випадку, коли на основі вирішення диференціальних рівнянь залежності між змінними відшукати неможливо. Тоді необхідно виробити попередній експеримент і, скориставшись його даними, скласти із застосуванням методу подібності рівняння (або систему рівнянь), вирішення якого можна розповсюдити за межі кордонів експерименту. Цей метод

теоретичного дослідження явищ і процесів можливий лише на основі комбінування з експериментальними даними.

Критерії подібності створюють усередині даного класу явищ групи шляхом перетворень умов однозначності в подібні системи. Всі явища, що входять до однієї групи, подібні і відрізняються лише масштабами. Таким чином, будь-яке диференціальне рівняння характерне для класу подібних явищ. Це ж рівняння з граничними умовами і критеріями подібності характерний лише для групи подібних явищ. Якщо граничні умови представлені без критерію подібності, то диференціальне рівняння можна застосувати для аналізу лише окремого випадку.

Теорія подібності базується на трьох теоремах.

Теорема 1. (М.В. Кирпічева і А.А. Гухмана). Два фізичні явища подібні, якщо вони описуються однією і тією ж системою диференціальних рівнянь і мають подібні (граничні) умови однозначності, і їх визначальні критерії подібності - чисельно рівні.

Теорема 2. Якщо фізичні процеси подібні, то критерії подібності цих процесів рівні між собою.

Теорема 3. Рівняння, що описують фізичні процеси, можуть бути виражені диференціальним зв'язком між критеріями подібності.

У групі подібних між собою явищ, що відрізняються лише масштабом, можна поширювати результати одиничного експерименту. Найчастіше критерії подібності позначають двома латинськими буквами прізвищ учених.

При дослідженні явищ і процесів експериментальні дані обробляються у виді узагальнених безрозмірних змінних і складають рівняння в критерійній формі, тобто в диференціальні рівняння замість розмірних величин ставлять критерії подібності. Далі приступають до вирішення теоретичного рівняння в критерійній формі. Отримане аналітичне рішення дозволяє розповсюдити результати одиничного досвіду на групу подібних явищ і аналізувати змінні величини за межами експерименту. Вирішення рівняння в безрозмірному виді менш трудомістко, оскільки число змінних зменшується, аналіз аналітичних виразів спрощується, а об'єм розрахунків істотно знижується. Тому уміння складати диференціальні рівняння в критерійній формі представляє великий інтерес.

1.7 Ймовірно-статистичні методи досліджень

Ймовірно-статистичні методи досліджень застосовують, коли необхідно досліджувати не детерміновані, а випадкові імовірнісні (стохастичні) процеси, в яких кожному аргументу відповідає безліч значень функції.

Не дивлячись на випадковий характер подій, вони підкоряються певним закономірностям, що розглядаються в теорії вірогідності. *Теорія вірогідності* є математичним віддзеркаленням законів, вивчає випадкові події і базується на наступних основних показниках:

Під *сукупністю* розуміють безліч однорідних подій. Сукупність випадкової величини x складає первинний статистичний матеріал. Розрізняють генеральну і вибірку сукупність.

Вірогідністю $P(x)$ події x називають відношення числа випадків $N(x)$, які наводять до настання події x до загального числа можливих випадків N

$$P(x) = N(x)/N$$

Вірогідність випадкової величини (події) - це кількісна оцінка можливості її появи. Достовірна подія має вірогідність $P=1$, неможлива подія - $P=0$. Для випадкової події $0 < P(x) < 1$, а сума вірогідності всіх можливих значень $\sum_0^n P_i = 1$.

Теорія вірогідності розглядає теоретичні розподіли випадкових величин і їх характеристики. Математична статистика займається способами обробки і аналізу експериментальних подій.

Частота подій - відношення числа випадків, при яких мала місце подія, до загального числа подій

$$\bar{y}(x) = n(x) / n$$

Основною характеристикою емпіричного розподілу є середньоарифметичне значення

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n x_i$$

Розмах можна використовувати для орієнтовної оцінки варіації ряду подій

$$R = x_{\max} - x_{\min},$$

де x_{\max} , x_{\min} - відповідно максимальне і мінімальне значення вимірної величини або погрішності.

Математичне чекання

$$m(x) = \sum_1^n x_i \cdot P_i$$

Для безперервних випадкових величин математичне чекання рівне $m(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot P(x) dx$, тобто воно дорівнює дійсному значенню x_D спостережуваних подій.

Таким чином, якщо систематичні погрішності вимірів повністю виключені, то дійсне значення вимірюваної величини дорівнює математичному чеканню.

Дисперсія характеризує розсіювання випадкової величини по відношенню до математичного чекання і обчислюється

$$D = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2 \text{ або } S^2$$

Середньоквадратичне відхилення або стандарт

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)} \text{ або } S$$

Коефіцієнт варіації $K_g = \sigma / m(x)$ застосовується для порівняння інтенсивності розсіювання в різних сукупностях, визначається у відносних одиницях: $K_g < 1$.

Вище були розглянуті основні характеристики теоретичної кривої розподілу, які аналізує теорія вірогідності.

У статистиці оперують з емпіричними розподілами. Основною задачею статистики є підбір теоретичних кривих по наявному емпіричному закону розподілу.

Хай в результаті n вимірів випадкової величини отриманий варіаційний ряд $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Середньоквадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{D}$$

1.8 Методи системного аналізу

Під *системним аналізом* розуміють сукупність прийомів і методів для вивчення складних об'єктів - систем, що є складною сукупністю елементів, що взаємодіють між собою. Взаємодія елементів системи характеризується прямими і зворотними зв'язками. Єство системного аналізу полягає в тому, аби виявити ці зв'язки і встановити їх вплив на поведінку всієї системи в цілому.

Системний аналіз складається з чотирьох етапів:

1 етап полягає в постановці завдань: визначають об'єкт, цілі і задачі дослідження, а також критерії для вивчення об'єкту і управління ним.

2 етап визначає кордони системи, що вивчається, і її структуру.

3 етап (найважливіший) полягає в складанні математичної моделі досліджуваної системи. Залежно від особливостей процесів використовують ті або інші методи дослідження.

4 етап, в якому аналізують отриману математичну модель, знаходять її екстремальні умови в цілях оптимізації процесу і управління системою і формулюють висновки.

1.9 Методологія експерименту

Експериментальні дослідження - один з основних способів отримати нові наукові знання. У його основі лежить експеримент або спостереження явища в умовах, що точно враховуються, дозволяючи стежити за його ходом, управляти їм, відтворювати його кожного разу при повторенні цих умов.

Основна мета експерименту - перевірка теоретичних положень (підтвердження робочої гіпотези), а також ширше вивчення теми дослідження.

Розрізняють експерименти *природні* і *штучні*. *Природні* експерименти проводять у виробничих умовах. *Штучний* експеримент широко застосовується в багатьох галузях і в першу чергу в технічних науках. В цьому випадку вивчають явище, ізольоване до необхідної міри, аби оцінити його в кількісному і якісному відношенні.

Експериментальні дослідження діляться на *лабораторні* і *виробничі*.

Лабораторні дослідження проводять із застосуванням типових приладів, спеціальних моделюючих установок, стендів, устаткування і т.д.

Виробничі експериментальні дослідження мають на меті вивчити процес в реальних умовах з врахуванням дії різних випадкових чинників виробничого середовища.

Методологія експерименту - це загальні принципи, структура експерименту, його постановка і послідовність виконання експериментальних досліджень.

Основні етапи методології експерименту: розробка плану-програми експерименту; оцінка вимірів і вибирання засобів для проведення експерименту; проведення експерименту; обробка і аналіз експериментальних даних, встановлення адекватності.

1.10 Розробка плану-програми експерименту

План-програма включає найменування теми дослідження, робочу гіпотезу, методику експерименту, перелік необхідних матеріалів, приладів, установок, список виконавців експерименту, календарний план робіт і змету на виконання експерименту.

Методика є системою прийомів або способів для послідовного найбільш ефективного експериментального дослідження і включає: мета і задачі експерименту,

вибір варіюючих чинників, обґрунтування засобів і необхідної кількості вимірів, опис проведення експерименту, обґрунтування способів обробки і аналізу результатів експерименту.

Вибір варіюючих чинників - це встановлення основних і другорядних характеристик, що впливають на досліджуваний процес. Основним принципом встановлення міри важливості характеристики є її роль в досліджуваному процесі.

Обґрунтування засобів виміру - це вибір необхідних для спостережень і вимірів приладів, устаткування, апаратів і т.д. Відповідальною частиною є встановлення точності вимірів і погрешностей.

У зв'язку з тим, що існує велика кількість чинників, що впливають на точність вимірів (наприклад, неоднорідність властивостей тіла, що вивчається, недосконалість приладів, суб'єктивні особливості експериментатора), необхідним є повторення вимірів, що вимагає визначення мінімальної необхідної кількості вимірів.

Під *мінімальною необхідною кількістю* розуміють таку кількість вимірів, яка в даному досвіді забезпечує стійке середнє значення вимірюваної величини, що задовольняє заданій мірі точності.

У методиці детально проектують процес проведення експерименту:

- складають послідовність проведення операцій спостережень і вимірів;

- описують кожну операцію окремо з врахуванням вибраних засобів для проведення експерименту.

Особлива увага в методиці має бути приділена математичним методам обробки і аналізу дослідних даних - встановленню емпіричних залежностей, апроксимації зв'язків між варіюваними характеристиками, знаходженню критеріїв. Далі визначають об'єм і трудомісткість експериментальних досліджень, які залежать від глибини теоретичних розробок таким чином, - чим чітко сформульована теоретична частина дослідження - тим менше об'єм експериментів.

Можливі три випадки проведення експерименту:

1. Теоретично отримана аналітична залежність, яка однозначно визначає досліджуваний процес. Об'єм експерименту для підтвердження даної залежності мінімальний.

2. Теоретичною дорогою встановлений лише характер залежності у виді сімейства кривих. В цьому випадку об'єм експериментальних робіт зростає і направлений на здобуття констант, що виділяють даний процес з класу.

3. Теоретично не удалося отримати яких-небудь залежностей. Розроблені лише припущення про якісні закономірності процесу. Об'єм експериментальних робіт зростає. Доцільний пошуковий експеримент.

1.11 Фізичний експеримент в теплоенергетиці

Фізичне моделювання є вивченням фізичних явищ (процесів) в натуральних умовах або на модельних установках в цілях оцінки їх в кількісних і якісних стосунках.

Фізична модель, що визначає основні закономірності, керівники даним процесом, дозволяє перейти до формування математичної моделі явища, не є абсолютною і безперервно удосконалюється.

Фізичний експеримент може бути натурним і модельним. Модельний експеримент здійснюється на модельних пристроях, виконаних в збільшених або зменшених в порівнянні з розмірами об'єкту масштабах. Він дозволяє якнайповніше вивчити фізичне явище, створити його в чистому виді за відсутності впливу сторонніх чинників. У теплоенергетиці і, особливо в теплофізиці модельний експеримент часто використовується для вивчення тепломасообмінних і гідродинамічних процесів в елементах енергетичних машин і установок, теплотехнічного устаткування.

Натурний експеримент дає можливість вивчати фізичні процеси в умовах їх протікання в конкретних технічних пристроях з врахуванням спільної дії декількох чинників. У теплоенергетиці він використовується при монтажі і експлуатації теплових електростанцій, при вивченні режимів роботи парових і газових турбін, котельних агрегатів, при випробуваннях тепловикористовуючого і теплогенеруючого устаткування промислових підприємств.

1.12 Моделювання фізичних явищ і технічного устаткування

Модельний експеримент здійснюється на експериментальних пристроях з певним робочим тілом і конкретними геометричними розмірами. Для того, щоб отримані результати були загальними і придатними для опису таких же явищ в геометрично подібних системах, з робочим тілом іншої фізичної природи, вони мають бути представлені на основі теорії подібності фізичних явищ.

Технічне моделювання - різновид експериментального дослідження, направлено на вивчення гідродинамічних, теплових і інших важливих характеристик окремого пристрою або його елементів на установці, виконаній у відповідному масштабі. Теоретичною основою технічного моделювання також служить теорія подібності.

Подібність фізичних явищ може бути *повною* і *частковою*. У першому випадку подібність зберігається в усіх точках моделі і природи. У другому випадку подібність виконується лише відносно деяких властивостей середовища і здійснюється по одному з критеріїв, найбільш істотному для даного явища.

В окремих випадках використовується *місцеве моделювання*, при якому подібність зберігається лише для окремих, найбільш важливих для дослідження ділянок або елементах об'єкту.

Строге дотримання всіх умов подібності, особливо в неізотермічних умовах, представляє великі труднощі. Тому широкого поширення набули методи наближеного моделювання при середній температурі процесу.

Приклад.

У ізотермічному потоці з переважанням вимушеного руху для виконання кінематичної подібності мають бути однакові числа Рейнольдса для моделі і природи:

$$\frac{\omega_m \cdot l_m}{\nu_m} = \frac{\omega_n \cdot l_n}{\nu_n},$$

де індекси «м» і «н» відносяться до моделі і природи.

В цьому випадку є можливість варіювати три параметри - швидкість лінійний розмір і коефіцієнт кінематичної в'язкості. Наприклад, при використанні в моделі і природі однакового робочого тіла ($\nu_m = \nu_n$), виготовлення моделі меншого масштабу ($l_m < l_n$) наводить до необхідності вживання вищих швидкостей ($\omega_m > \omega_n$). При однакових геометричних розмірах моделі і природи ($l_m = l_n$) і використанні в модельній установці менш в'язкої рідини ($\nu_m < \nu_n$), чим в природі, швидкість потоку на моделі має бути нижче, ніж в натуральних умовах.

1.13 Вживання теорії подібності для узагальнення результатів експерименту

При узагальненні результатів фізичного експерименту по тепловіддачі і гідродинаміці в каналах і при зовнішньому обтіканні тіл для виконання умов моделювання фізичних явищ результати експерименту представляються у виді рівнянь подібності.

Система чисел подібності, що визначає процес тепловіддачі в найбільш простій формі:

1. Число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda};$$

2. Число Фур'є:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2};$$

3. Число Пекле:

$$Pe = \frac{\omega \cdot l}{a};$$

4. Число гомохронності:

$$Ho = \frac{\omega \cdot \tau}{l};$$

5. Число Ейлера:

$$Eu = \frac{P}{(\rho \cdot \omega^2)};$$

6. Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu};$$

7. Число Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t;$$

8. Число Прандтля:

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}.$$

Порядок отримання рівняння подібності.

При розрахунку чисел подібності фізичні параметри потоку (λ, ν, c_p, μ і т.д.) мають бути віднесені до певної температури. Таку температуру називають визначаючою; у якості її використовується одна з трьох середніх температур:

- потоку T_f ;
- поверхні T_ω ;
- пограничного шару $T_m = 0,5 \cdot (T_f + T_\omega)$.

Відповідно до цього числа подібності мають індекси, вказуючи на певну температуру.

Числа подібності включають також деякий лінійний розмір l , який називається визначальним розміром тіла або системи. Як визначальний розмір приймається той розмір, який найбільшою мірою визначає закономірності явища.

Числа подібності, підраховані по визначальній температурі, не враховують впливи всього різноманіття значень температур, які можуть бути в конкретній системі. При великих температурних натисках між потоком і стінкою і різному напрямі теплового потоку в рівнянні подібності вводиться член, яким враховуються весь діапазон і характер зміни фізичних параметрів потоку.

Для обліку температурного чинника в рівнянні подібності, де визначає ϵ середня температура потоку, вводиться параметр $(Pr_f/Pr_m)^{0,25}$, використання якого найефективніше в разі неметалічних рідин. Для більшості краплинних рідин істотну роль грає залежність від температури лише динамічного коефіцієнта в'язкості, у зв'язку з чим при розрахунку ламінарних і турбулентних потоків краплинної рідини вводяться

множники $(\mu_f / \mu_\omega)^{0,14}$ і $(\mu_f / \mu_\omega)^{0,11}$. При перебігу розплавлених металів дана поправка близька до одиниці.

Для обліку зміни фізичних параметрів і напряму теплового потоку для газів вводить температурний чинник і використовується множник:

$$\text{а) при } T_\omega < T_f, \varepsilon_t = 1,27 - 0,27 \cdot T_\omega / T_f;$$

$$\text{б) при } T_\omega > T_f, \varepsilon_t = (T_\omega / T_f)^{0,55}.$$

Кількісний зв'язок між числами подібності зазвичай виражається статечним рівнянням. Наприклад, при вимушеному русі теплоносія рівняння подібності має вид

$$Nu_f = C \cdot Re_f^m \cdot Pr_f^n,$$

де у якості визначаючої вибрана середня температура потоку. Постійні C , визначаються в результаті математичної обробки експериментальних даних.

Спочатку знаходиться показник міри m , для чого експериментальні дані представляються в графічній формі з використанням логарифмічних координат ($\lg Nu_f, \lg Re_f$) при постійних значеннях числа Pr_f

$$\lg Nu_f = \lg C + m \cdot \lg Re_f + n \cdot \lg Pr_f$$

З графічних залежностей встановлюється середнє значення $m = \operatorname{tg} \varphi$, де φ - середній кут нахилу прямих.

Далі ці ж дані представляються в логарифмічних координатах $\lg Nu_f, \lg Pr_f$ при $Re_f = \operatorname{const}$ і знаходять середнє значення n аналогічним чином.

Для остаточної перевірки отриманих результатів і визначення постійною C будується графік експериментальних даних в координатах $\lg(Nu_f / Pr_f^n) = f(Re_f)$

$$\lg \left(\frac{Nu_f}{Pr_f^n} \right) = C + m \cdot \lg Re_f$$

При необхідності обліку фізичних властивостей середовища (краплинна рідина) рівняння подібності матиме вид

$$Nu_f = C \cdot Re_f^m \cdot Pr_f^n \cdot (Pr_f / Pr_\omega)^{0,25}$$

В цьому випадку коефіцієнти m і n визначається в координатах $\lg \left[Nu_f / \left(\frac{Pr_f}{Pr_\omega} \right)^{0,25} \right] = f(\lg Re_f)$ і $\lg \left[Nu_f / \left(\frac{Pr_f}{Pr_\omega} \right)^{0,25} \right] = f(\lg Pr_f)$ відповідно при $Pr_f = \operatorname{const}$ і

$Re_f = \operatorname{const}$. При цьому необхідно орієнтування знати значення цих коефіцієнтів, знайдених наближеними або точними аналітичними методами. Остаточна перевірка отриманих результатів і визначення постійною C виробляється в логарифмічних

координатах $\lg \left[\frac{Nu_f}{\left(\frac{Pr_f}{Pr_\omega} \right)^{0,25} \cdot Pr_f^n} \right] = f(\lg Re_f)$.

Отримані рівняння можуть використовуватися лише в тому інтервалі зміни чисел подібності, який мав місце в експерименті. Екстраполяція рівняння подібності може привести до серйозних помилок в розрахунках.

Даний метод здобуття рівнянь подібності може використовуватися як у фізичному, так і в обчислювальному експерименті. У останньому випадку числа подібності визначаються на основі розрахунків досліджуваного явища.

1.14 Статистичні методи оцінки вимірів в експериментальних дослідженнях

Вимір є основною складовою частиною будь-якого експерименту. Від ретельності вимірів і подальших обчислень залежать результати експерименту.

Вимір - це процес знаходження якої-небудь фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів, це пізнавальний процес порівняння величини чого-небудь з відомою величиною, прийнятою за еталон.

Виміри бувають *статичними*, коли вимірювана величина не змінюється і *динамічними*, коли вимірювана величина міняється (наприклад, вимір пульсуючих процесів).

Виміри підрозділяють на прямі і непрямі. При *прямих* вимірах шукану величину встановлюють безпосередньо з досвіду, при *непрямих* - функціонально від інших величин, визначених прямими вимірами.

Розрізняють три класи вимірів:

Особливо точні - еталонні виміри з максимально можливою точністю.

Високоточні - виміри, погрішність яких не повинна перевищувати заданих значень.

Технічні - виміри, в яких погрішність визначається особливостями засобів виміру.

Точність виміру - це міра наближення виміру до дійсного значення величини.

Достовірність виміру показує міру довіри до результатів виміру, тобто вірогідність відхилень виміру від дійсних значень.

Погрішність виміру - це алгебраїчна різниця між дійсним значенням вимірюваної величини і отриманим при вимірі.

1.15 Способи виміру, їх характеристики

До *засобів вимірів* відносять вимірювальний інструмент, вимірювальні прилади і установки. Вимірювальні засоби діляться на зразкові і технічні.

Зразкові засоби є еталонами. Вони призначені для перевірки технічних, тобто робочих засобів.

Вимірювальні прилади підрозділяють на показуючі і реєструючі.

Вимірювальна установка є системою, що складається з основних і допоміжних засобів виміру.

Вихідний сигнал вимірювальних засобів фіксується відліковими пристроями, які бувають шкальні, цифрові і реєструючі.

Відстань в міліметрах між двома суміжними відмітками на шкалі називають *довжиною ділення шкали*.

Різниця між значеннями вимірюваної величини, відповідну початку і кінцю шкали, називають *діапазоном показань приладу*.

Погрішність приладу:

$$\text{- абсолютна } b = \pm(x_u - x_d),$$

де x_d - свідчення приладу (номінальне значення вимірюваної величини);

x_a - дійсне значення вимірюваної величини точнішим методом.

$$\text{- відносна } b_{om} = \pm \frac{(x_u - x_d)}{x_d} \cdot 100, \%$$

$$\text{- приведена } b_{om} = \pm \frac{(x_u - x_d)}{x_{np}},$$

де x_{np} - яке-небудь значення шкали вимірювального пристрою (діапазон вимірів), довжина шкали.

Діапазоном вимірів називають ту частину діапазону приладу, для якої встановлені погрішності приладу.

Різниця між максимальним і мінімальним показаннями приладу називається *розмахом*.

Чутливість - це здатність відлічуючого пристрою реагувати на зміну вимірюваної величини.

Під *порогом чутливості* приладу розуміють найменше значення вимірюваної величини, що викликає зміну свідчення приладу, яке можна зафіксувати.

Точність приладу характеризується сумарною погрішністю. Засоби виміру діляться на класи точності залежно від похибок, що припускаються.

Клас точності приладу (1-й - найвищий, 4-й - найнижчий) позначає додаткову, сумарну, відносну погрішність від верхньої межі вимірів. Так, якщо клас точності дорівнює 1, то відносної похибки, що припускається, рівна $\pm 1\%$.

Стабільність або відтворюваність приладу - це властивість відлікового пристрою забезпечувати постійність свідчень однієї і тієї ж величини.

Під *градуюванням* розуміють мічення на шкалу відлічуючого пристрою по задалегідь відомій вимірюваній величині.

Важливим моментом в організації експерименту є вибирання засобів виміру. Засоби виміру повинні: максимально відповідати тематиці, меті і задачі дослідницької роботи, виконання експерименту в можливо найкоротший термін, забезпечувати необхідну якість експериментальних робіт, тобто задану міру точності при мінімальній кількості вимірів, високу відтворюваність, вимоги техніки безпеки і пожежної профілактики.

1.16 Основні поняття і визначення теорії погрішності

Погрішність виміру - це відхилення результату виміру від дійсного значення вимірюваної величини.

Точність вимірів характеризує їх якість і відображає близькість отриманих результатів до дійсного значення вимірюваної величини.

Абсолютною погрішністю називають різницю між виміряним x значенням вимірюваної величини і достеменним X значенням вимірюваної величини

$$\Delta = x - X$$

Використання абсолютної погрішності зручне при внесенні поправок до результатів експерименту, проте її значення не характеризує точність експерименту.

Відотною погрішністю називають відношення абсолютної погрішності виміру до дійсного значення вимірюваної величини

$$\delta = \frac{\Delta}{X}$$

Відносна погрішність найчастіше виражається у відсотках і дає найбільш ясне уявлення про погрішність вимірів.

Розрізняють погрішності вимірів трьох типів: систематичну, випадкову і грубу.

Систематична погрішність виміру - складова погрішності виміру, що залишається постійною або що закономірно змінюється при повторних вимірах однієї і тієї ж величини.

Випадковою називають складову погрішності вимірів, обумовлену дією декількох чинників, змінних випадковим чином при повторних вимірах однієї і тієї ж величини. Випадкові погрішності викликані суб'єктивними і об'єктивними причинами, підвищення точності визначення параметра, що містить випадкову складову погрішності можна збільшенням кількості експериментів.

Груба погрішність виміру - це погрішність, що суттєво перевищує очікувану за даних умов. Причиною грубої погрішності можуть бути короткочасна зміна живлючої напруги, неправильний відлік показань приладу і т.д.

1.17 Характеристики випадкових величин

Аналіз випадкових погрішностей ґрунтується на *теорії випадкових помилок*. Ця теорія дає можливість з певною гарантією обчислити дійсне значення і оцінити можливі помилки, по яких судять про дійсне значення шуканої величини.

В основі теорії випадкових помилок лежить припущення про те, що при великому числі вимірів випадкові погрішності однакової величини, але різного знаку, зустрічаються однаково часто; великі погрішності зустрічаються рідше, ніж малі, або вірогідність появи погрішності зменшується із зростанням її величини; при нескінченно великому числі вимірів дійсне значення вимірюваної величини дорівнює середньоарифметичному значенню всіх результатів вимірів: поява того або іншого результату виміру як випадкової події описується нормальним законом розподілу.

Розрізняють генеральну і вибіркочну сукупність вимірів. Під *генеральною сукупністю* розуміють всю безліч можливих значень вимірів x_i або можливих значень погрішностей Δx_i . Для вибіркової сукупності кількість вимірів n обмежена і у кожному конкретному випадку строго визначається. Зазвичай вважають, що якщо $n > 30$, то середнє значення даної сукупності вимірів \bar{x} досить наближається до його дійсного значення.

Теорія випадкових помилок дозволяє вирішити дві основні задачі: оцінити точність і надійність виміру при даній кількості вимірів; визначити мінімальну кількість вимірів, що гарантує необхідну (задану) точність і надійність виміру. Разом з цим виникає необхідність виключити грубі помилки ряду, визначити достовірність отриманих даних.

1.18 Інтервальна оцінка за допомогою довірчої вірогідності

Для великої вибірки і нормального закону розподілу загальною оцінною характеристикою виміру є дисперсія D і коефіцієнт варіації

$$D = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2; K_e = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

У теорії вірогідності і математичній статистиці користуються декількома законами розподілу випадкової величини. Найчастіше використовується *нормальний закон розподілу Гауса*, щільність розподілу вірогідності при якому визначається рівнянням

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - X)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right],$$

де X - дійсне значення вимірюваної величини.

Дисперсія характеризує однорідність виміру. Чим вище D , тим більше розкид вимірів. Коефіцієнт варіації характеризує мінливість. Чим він вищий, тим більше мінливість вимірів відносно середніх значень.

Довірчим називається інтервал значень x_i , в який потрапляє дійсне значення x_0 вимірюваної величини із заданою вірогідністю. Довірчою вірогідністю виміру називається вірогідність P_0 того, що дійсне значення x_0 вимірюваної величини потрапляє в даний довірчий інтервал.

Довірча вірогідність описується наступним вираженням

$$P_0 = P(a < m(x) < b) = \frac{1}{2} \cdot \left[\Phi \left(\frac{b - \bar{x}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma} \right) \right],$$

де $\Phi(t)$ - функція Лапласа, аргументом якої є відношення відхилення μ до середньоквадратичному σ , тобто $t = \mu/\sigma$, де $\mu = b - \bar{x} = -(a - \bar{x})$, t - гарантійний коефіцієнт. Чисельне значення $\Phi(t)$ наводяться в таблицях.

Значення $1 - \Phi(t)$ називають рівнем значущості. З нього виходить, що при нормальному законі розподілу погрішність, що перевищує довірчий інтервал, зустрічатиметься один раз з n_u вимірів

$$n_u = \frac{P_0}{1 - P_0}$$

або інакше доводиться бракувати один з n_u вимірів.

1.19 Встановлення мінімальної кількості вимірів

Для проведення дослідів з необхідною точністю і достовірністю необхідно знати ту кількість вимірів, при якій досягається позитивні результат. Оскільки надмірно велика кількість вимірів вимагає значних витрат часу і ресурсів, одним з першочергових завдань є встановлення мінімального, але достатнього для даних умов числа вимірів.

Задача зводиться до встановлення мінімального об'єму вибірки (числа вимірів) N_{min} при заданих значеннях довірчого інтервалу 2μ і довірчої вірогідності. При виконанні вимірів необхідно знати їх точність Δ , яку зазвичай характеризують σ_0 - середньоарифметичне значення середньоквадратичного відхилення

$$\sigma_0 = \sigma / \sqrt{n}; \Delta = \sigma_0 \cdot \sqrt{x}$$

Значення σ_0 часто називають середньою помилкою. Довірчий інтервал помилки виміру Δ визначається аналогічно, як і для вимірів $\mu = t \cdot \sigma_0$.

У дослідженнях часто по заданій точності Δ і довірчій вірогідності виміру визначають мінімальну кількість вимірів, що гарантує необхідні значення Δ і $\Phi(t)$.

Мінімальну кількість вимірів можна визначити по наступній формулі

$$N_{min} = \frac{\sigma^2 \cdot t^2}{\sigma_0^2} = \frac{K_s^2 \cdot t^2}{\Delta^2},$$

тут K_s - коефіцієнт варіації, %;

Δ - точність вимірів, %.

Для обчислення N_{min} може бути прийнята наступна послідовність:

1. Проводять попередній експеримент з кількістю вимірів n , яке складає залежно від трудомісткості досліду від 20 до 50.

2. Обчислюють середньоквадратичне відхилення σ .

3. Відповідно до поставлених задач експерименту встановлюють необхідну точність вимірів μ , Δ , яка має бути не менше точності приладу.

4. Встановлюють нормоване відхилення t , значення якого зазвичай задають; воно залежить також від точності методу. Наприклад, при великій точності вимірів можна прийняти $t=1,0$, при малій - $t=2,0$.

5. Визначають N_{min} . Надалі число вимірів не має бути менше розрахованого значення.

Оцінки вимірів з допомогою σ і σ_0 по приведених методах справедливі при $n > 30$.

Для знаходження кордонів довірчого інтервалу при малих значеннях застосовують метод, запропонований Стьюдентом. Для малої вибірки довірчий інтервал $\mu_{cm} = \sigma_0 \cdot \alpha_{cm}$, де α_{cm} - коефіцієнт Стьюдента, який можна прийняти з таблиць залежно від значень довірчої вірогідності Φ_{cm} .

Знаючи μ_{cm} , можна обчислити дійсне значення величини, що вивчається, для малої вибірки

$$x_0 = \bar{x} \pm \mu_{cm}$$

Можлива інша постановка задачі. По n відомих вимірів малої вибірки необхідно визначити довірчу вірогідність P_d за умови, що погрішність середнього значення не вийде за межі $\pm \mu_{cm}$.

Задачу вирішують в наступній послідовності. Обчислюють середнє значення $\bar{x}, \sigma_0, \alpha_{cm} = \frac{\mu_{cm}}{\sigma_0}$. За допомогою величини α_{cm} , відомого n і таблиці $\alpha_{cm} = f(P_d)$ при різних n визначають довірчу вірогідність за допомогою зворотної інтерполяції.

1.20 Виключення грубих помилок ряду

Поява цих помилок цілком імовірно, а наявність їх відчутно впливає на результати вимірів. Так, вже одна груба помилка в 25-ти вимірах і менш спотворює результати вимірів. При аналізі експерименту необхідно, перш за все, виключити грубі помилки, проте перш ніж виключити те або інше значення необхідно переконатися, що це дійсно груба помилка, а не відхилення унаслідок статистичного розкиду.

Найбільш простим способом виключення з ряду виміру, що різко виділяється, є правило трьох сигм. Розкид випадкових величин від середнього значення не перевищує $x_{\max, \min} = \bar{x} \pm 3 \cdot \sigma$.

Достовірнішими є методи, що базуються на використанні довірчого інтервалу.

Хай є статистичний ряд малої вибірки, що підкоряється нормальному закону розподілу. За наявності грубих помилок критерії їх появи

$$\beta_1 = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{\sigma \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}}; \beta_2 = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{\sigma \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}},$$

де x_{\max}, x_{\min} - відповідно найбільше і найменше значення з n вимірів.

Після визначення β_1 і β_2 необхідно порівняти їх з табличним значенням β_{\max} - максимального значення, в результаті якого може виникати статистичний розкид. У таблиці β_{\max} приведені для різних значень довірчої вірогідності і кількості вимірів n . Якщо $\beta_1 > \beta_{\max}$, то значення x_{\max} необхідно виключити із статистичного ряду як грубу погрішність. При $\beta_2 < \beta_{\max}$ - виключається величина x_{\min} . Після виключення грубих помилок визначають нові значення \bar{x} і σ з $n-1$ або $n-2$ вимірів.

Другий метод встановлення грубих помилок заснований на використанні критерію Романовського і також застосовний для малої вибірки. Задаються довірчою вірогідністю P_0 , і по таблиці залежно від n знаходять коефіцієнт q . Обчислюють гранично допустиму абсолютну помилку окремого виміру $\varepsilon_{np} = \sigma \cdot q$.

Якщо $\bar{x} - x_{\max} > \varepsilon_{np}$, то вимір x_{\max} виключають з ряду спостережень.

В разі глибокого аналізу експериментальних даних рекомендується наступна методика.

1. Після здобуття експериментальних даних у виді статистичного ряду задалегідь виключають систематичні помилки.

2. Аналізують ряд в цілях виявлення грубих помилок і промахів:

- встановлюють підозрілі значення x_{\max} і x_{\min} ;

- визначають середньоквадратичне відхилення σ ;

- обчислюють критерії β_1 і β_2 і зіставляють з β_{\min} , β_{\max} або ε_{np} ;

- виключають при необхідності із статистичного ряду x_{\max} або x_{\min} і отримують новий ряд з нових членів;

3. Обчислюють середньоарифметичне \bar{x} , погрішності окремих вимірів $\bar{x} - x_i$ і середньоквадратичне очищеного ряду σ .

4. Знаходять середньоквадратичне σ_0 серії вимірів, коефіцієнт варіації K_σ .

5. При великій вибірці задаються довірчою вірогідністю $P_0 = \Phi(t)$ або рівнянням значущості I і по таблиці визначають t . При малій вибірці ($n \leq 20$) залежно від прийнятої довірчої вірогідності P_d і числа членів ряду n приймають коефіцієнт Стьюдента α_{cm} ; для

великої вибірки по формулі $D = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2$; $K_\sigma = \frac{\sigma}{\bar{x}}$, а для малої вибірки по формулі

$\mu_{cm} = \sigma_0 \cdot \alpha_{cm}$ визначають довірчий інтервал.

6. Встановлюють дійсне значення досліджуваної величини.

7. Оцінюють відносну погрішність результатів серії вимірів при заданій довірчій вірогідності P_0

$$\delta = \frac{\sigma_0 \cdot \alpha_{cm}}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

1.21 Статистичні критерії і їх вживання

Статистична гіпотеза - це деяке припущення відносно властивостей генеральної сукупності випадкової величини.

Перевірка статистичної гіпотези полягає в порівнянні статистичних показників, визначуваних по вибірці, із значеннями цих же показників, визначених теоретично для якої-небудь гіпотези.

При перевірці статистичних гіпотез задаються рівнем значущості $q = 1 - p$, де p - довірна вірогідність виконання гіпотези. Найчастіше на практиці використовують значення q , рівні 0,05 і 0,02, причому менше значення q відповідає результатам вимірів, отриманим з вищою вірогідністю. Порівнюючи деяке значення випадкової величини (статистичного критерію), обчислене з вибірки, з табличним значенням цього ж параметра, можна зробити вивід про те, чи може бути прийнята дана гіпотеза або вона має бути

знехтувана. Вірогідність прийняття гіпотези відповідатиме заданому рівню значущості. Наприклад, при $q=0,02$ вірогідність того, що запропонована гіпотеза є вірною, складає 98%.

В результаті експерименту отримують статистичний ряд зазвичай парних, однофакторних (x_i, y_i) або багатофакторних (a_i, b_i, c_i, \dots) вимірів. Статистичні виміри піддають обробці і аналізу, підбирають емпіричні формули і встановлюють їх достовірність.

Критерій Фішера (F -критерій) використовується при перевірці однорідності двох вибірових дисперсій (відтворюваності результатів вимірів). Він є відношенням більшої вибіркової дисперсії до меншої

$$F = S_1^2 / S_2^2$$

Якщо $F < F_m$ (F_m - табличне значення критерію Фішера), дисперсії S_1^2 і S_2^2 можуть бути віднесені до однієї генеральної сукупності і розбіжність між ними можна прийняти випадковим. При $F > F_m$ дисперсії S_1^2 і S_2^2 значимо відрізняються одна від одної і гіпотеза про їх однорідність відкидається.

1.22 Методи підбору емпіричних формул

В процесі експериментальних вимірів отримують статистичний ряд вимірів двох значень, об'єднаних функцією $y=f(x)$. Кожному значенню функції y_1, y_2, \dots, y_n відповідає певне значення аргументу x_1, x_2, \dots, x_n . Отримані результати вимірів мають бути достовірні. На основі експериментальних даних можна підібрати вирази алгебри, які називають емпіричними формулами. Такі формули підбирають лише в межах вимірних значень аргументу x_1, \dots, x_n . Емпіричні формули мають тим більшу цінність, чим точніше вони відповідають результатам експерименту.

Необхідність в підборі емпіричних виникає у багатьох випадках. Так, якщо аналітичне вираження $y=f(x)$ складне, вимагає громіздких обчислень, складання програм на ЕОМ, то часто ефективніше користуватися спрощеною наближеною емпіричною формулою. Емпіричні формули часто незамінні для аналізу вимірних величин.

До емпіричних формул пред'являють дві основні вимоги: вони мають бути найбільш простими і максимально точно відповідати експериментальним даним в межах виміру аргументу.

Емпіричні формули є наближеними виразами аналітичних формул. Заміну точних аналітичних виразів наближеними, простішими називають апроксимацією, а функції - апроксимуючими.

Процес підбору емпіричних формул складається з двох етапів. На першому етапі дані вимірів наносять на сітку прямокутних координат, сполучають експериментальні точки плавної кривою і вибирають орієнтовний вид формули.

Найпоширеніші види формул:

- 1) Лінійний - $y=kx+b$;
- 2) Статечна - $y=x^n$;
- 3) Логарифмічний - $y=k \ln(x)+b$;
- 4) Експоненціальний - $y=a e^{bx}$;
- 5) Поліноміальний - $y=a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x$.

На другому етапі обчислюють параметри формул, які щонайкраще відповідали б прийнятій формулі. Підбір емпіричних формул необхідно починати з найпростіших виразів.

- 1) Лінійний - $y=kx+b$;

Застосовують метод вирівнювання, який полягає в тому, що криву, побудовану по експериментальних точках, представляють як лінійну функцію. Для перетворення деякої кривої $y=f(x)$ в пряму лінію вводять нові змінні X і Y

$$X=f_1(x, \epsilon), Y=f_2(x, \epsilon)$$

У цьому рівнянні X і Y мають бути зв'язані лінійною залежністю

$$Y=kX+B$$

Значення X і Y можна обчислити на основі

$$k=tg(=(Y_i-a)/X_i)$$

При графічному визначенні параметрів k і B обов'язково, аби пряма будувалася на координатній сітці, в якій початком є точки $X=0$ і $Y=0$.

Апроксимація експериментальних даних прямолінійними функціями дозволяє просто і швидко визначити вид емпіричної формули.

Графічний метод вирівнювання може бути застосований в різних випадках, коли експериментальна крива на сітці прямокутних координат має вид плавної кривої.

Основні випадки:

- Якщо експериментальний графік має вид (рисунок 1.3), то необхідно застосувати формулу $y=ax^b$.

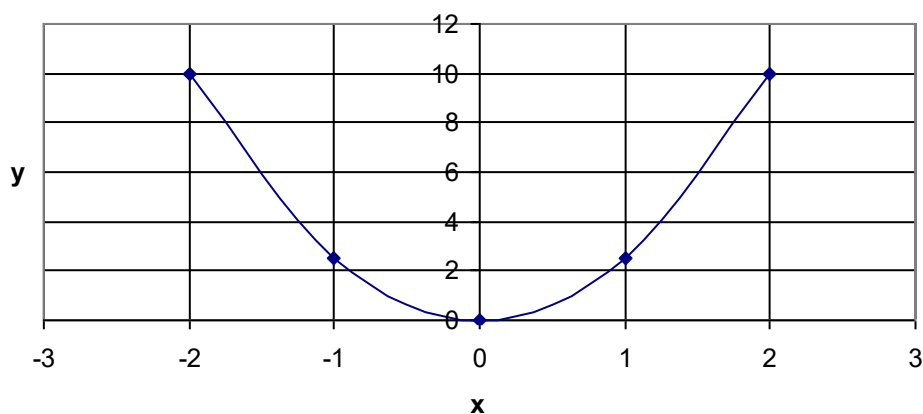


Рисунок 1.3 - Експериментальний графік $y=ax^b$

Використовуючи метод вирівнювання, перетворимо дане вираження таким чином:

1. Прологарифмуємо по підставі e

$$\ln(y)=\ln(a)+b \ln(x)$$

Якщо замінити $Y=\ln(y)$, $X=\ln(x)$, $B=\ln(a)$, $k=b$, отримаємо графік прямої лінії

$$Y=kX+B$$

2. Побудувавши графічну залежність в нових координатах $Y=F(X)$, знаходимо $k=(Y_i-a)/X_i$ і B , де B - відрізок, що відсікається графіком на осі ординат від точки 0.

3. Використовуючи зворотню підстановку, знаходимо невідомі коефіцієнти $a=e^B$; $b=k$.

- Якщо експериментальний графік має вид (рисунок 1.4), то необхідно використовувати формулу $y=a e^{bx}$.

Перетворимо:

1. Прологарифмуємо по підставі e

$$\ln(y)=\ln(a)+bx$$

Замінюваний $Y=\ln(y)$, $B=\ln(a)$, $k=b$.

Отримуємо графік прямої лінії

$$Y=B+kx$$

2. Побудувавши графічну залежність в нових координатах $Y=F(X)$, знаходимо $k=(Y_i-a)/X_i$ і B , де B - відрізок, що відсікається графіком на осі ординат від точки 0.

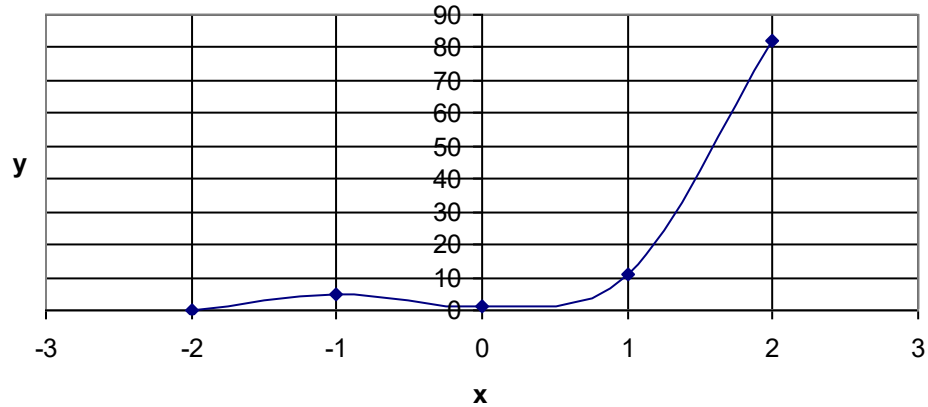


Рисунок 1.4 - Експериментальний графік $y = a e^{bx}$

3. Використовуючи зворотну підстановку, знаходимо невідомі коефіцієнти $a = e^B$; $b = k$.

- Якщо експериментальний графік має вид (рисунок 1.5), то необхідно застосувати формулу $y = ax^b + c$.

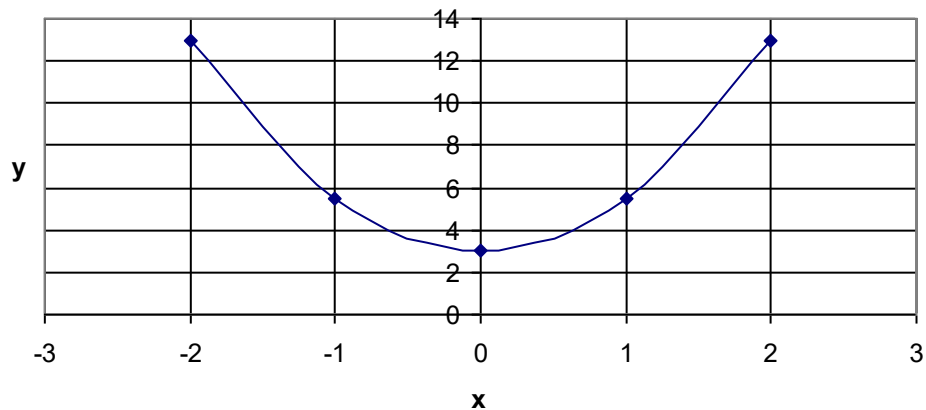


Рисунок 1.5 - Експериментальний графік $y = ax^b + c$

В цьому випадку можливі два варіанти:

а) b - задано.

Приймаючи $X = x^b$, $k = a$, $B = c$, маємо пряму лінію на сітці прямокутних координат: $Y = kX + B$.

2. Побудувавши графічну залежність в нових координатах $Y = F(X)$, знаходимо $k = (Y_i - a)/X_i$ і B , де B - відрізок, що відсікається графіком на осі ординат від точки 0.

3. Використовуючи зворотну підстановку, знаходимо невідомі коефіцієнти $a = k$; $c = B$.

б) b - невідомо.

Виробимо перетворення

$$y - c = ax^b$$

Прологарифмуємо по підставі e

$$\ln(y - c) = \ln(a) + b \ln(x)$$

Приймаючи $Y = \ln(y - c)$, $X = \ln(x)$, $B = \ln(a)$, $k = b$, маємо пряму лінію на логарифмічній сітці $Y = kX + B$.

В цьому випадку необхідно заздалегідь обчислити c . Для цього по експериментальній кривій приймають три довільні точки так, щоб $x_1, y_1; x_2, y_2; x_3 = \sqrt{x_1 \cdot x_2}, y_3$.

Потім обчислюють c

$$c = \frac{y_1 \cdot y_2 - y_3^2}{y_1 + y_2 - 2 \cdot y_3}.$$

2. Побудувавши графічну залежність в нових координатах $Y=F(X)$, знаходимо $k=(Y_i - a)/X_i$ і B , де B - відрізок, що відсікається графіком на осі ординат від точки 0.

3. Використовуючи зворотну підстановку, знаходимо невідомі коефіцієнти $b=k$; $a=e^B$.

- Якщо експериментальний графік має вид (рисунок 1.6), то необхідно користуватися формулою $y=ae^{bx}+c$.

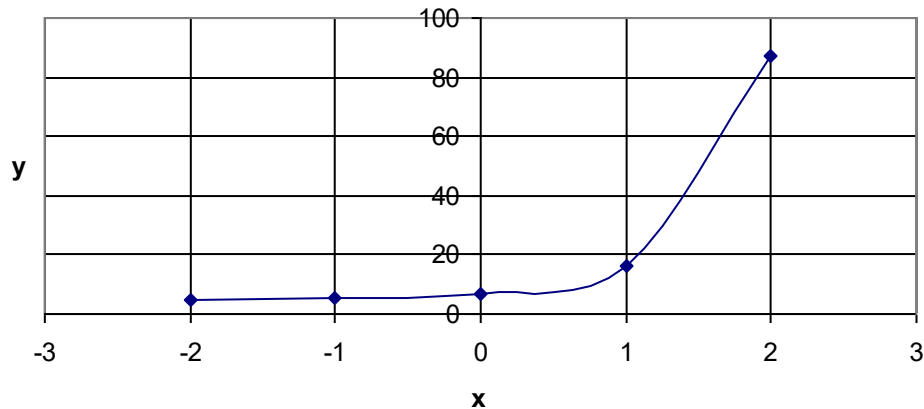


Рисунок 1.6 - Експериментальний графік $y=ae^{bx}+c$

1. Здійснимо перетворення

$$y-c=ae^{bx}$$

Заміняючи $Y=\ln(y-c)$, $B=\ln(a)$, $k=b$, маємо пряму на напівлогарифмічній сітці $Y=kx+B$.

Заздалегідь визначити c за допомогою формули $c = \frac{y_1 \cdot y_2 - y_3^2}{y_1 + y_2 - 2 \cdot y_3}$. Для цього по експериментальній кривій приймають три довільні точки так, щоб $x_1, y_1; x_2, y_2; x_3=0,5(x_1+x_2), y_3$.

2. Побудувавши графічну залежність в нових координатах $Y=F(X)$, знаходимо $k=(Y_i - a)/X_i$ і B , де B - відрізок, що відсікається графіком на осі ординат від точки 0.

3. Використовуючи зворотну підстановку, знаходимо невідомі коефіцієнти $b=k$; $a=e^B$.

- Якщо експериментальний графік має наступний вид (рисунок 1.7), то приймаємо вираження $y=a+b/x$.

1. Здійснимо перетворення.

Заміняючи $X=1/x$, $B=a$, $k=b$, отримаємо пряму лінію на сітці прямокутних координат $Y=kX+B$.

2. Побудувавши графічну залежність в нових координатах $Y=F(X)$, знаходимо $k=(Y_i - a)/X_i$ і B , де B - відрізок, що відсікається графіком на осі ординат від точки 0.

3. Використовуючи зворотну підстановку, знаходимо невідомі коефіцієнти $b=k$; $a=B$.

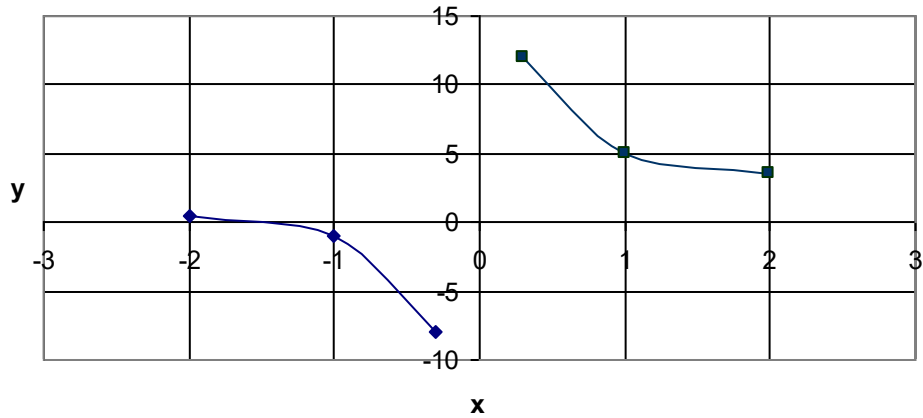


Рисунок 1.7 - Експериментальний графік $y = a + b/x$

- Якщо експериментальний графік має вид (рисунок 1.8), необхідно використовувати наступну формулу $y = 1/(a + bx)$.

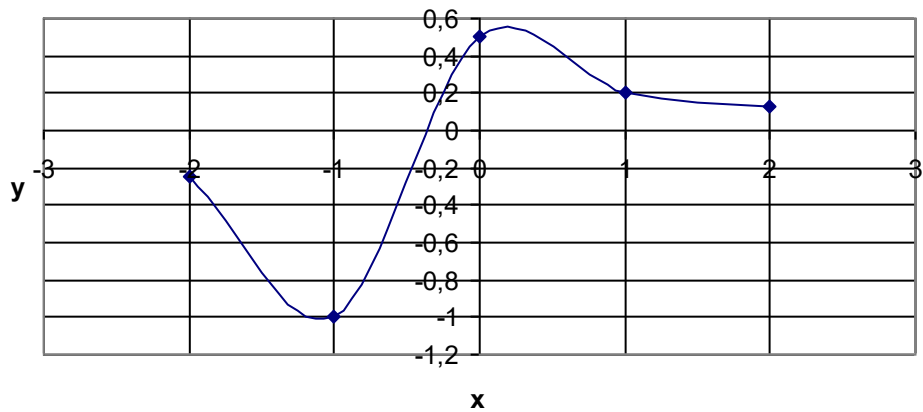


Рисунок 1.8 - Експериментальний графік $y = 1/(a + bx)$

1. Здійснимо перетворення.

Заміняючи $Y = 1/y$, $B = a$, $k = b$, маємо пряму на сітці прямокутних координат $y = kX + B$

2. Побудувавши графічну залежність в нових координатах $Y = F(X)$, знаходимо $k = (Y_i - a)/X_i$ і B , де B - відрізок, що відсікається графіком на осі ординат від точки 0.

3. Використовуючи зворотну підстановку, знаходимо невідомі коефіцієнти $b = k$; $a = B$.

- Якщо експериментальний графік має наступний вид (рисунок 1.9), то приймаємо вираження $y = 1/(a + bx + cx^2)$.

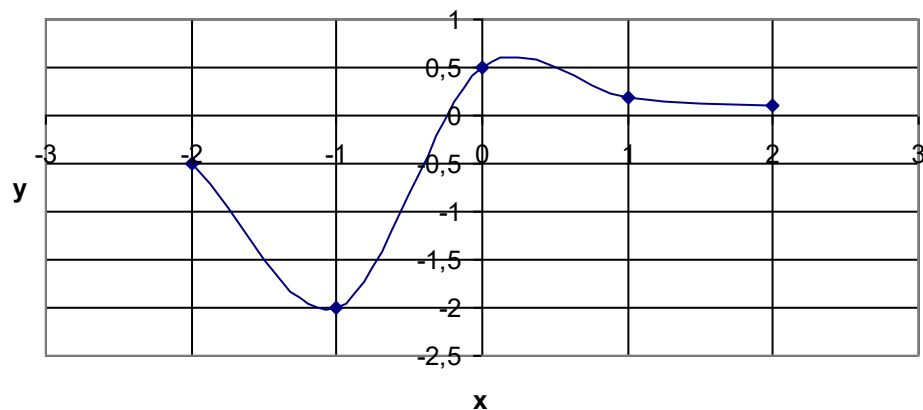


Рисунок 1.9 - Експериментальний графік $y = 1/(a + bx + cx^2)$

1. Здійснимо перетворення.

Заміняючи $Y=1/y$, маємо пряму на сітці прямокутних координат

$$Y=kX+B$$

Вирішуємо методом найменших квадратів.

- Якщо необхідно отримати емпіричну формулу виду $y = a \cdot e^{nx+mx^2}$, то складна

статична функція $y = a \cdot e^{nx+mx^2}$ перетвориться таким чином.

Прологарифмуємо по підставі e

$$\ln(y) = \ln(a) + nx + mx^2,$$

заміняємо $Y = \ln(y)$, $d = \ln(a)$, і отримуємо $Y = d + nx + mx^2$.

Вирішуємо методом найменших квадратів.

При підборі емпіричних формул широко використовують поліноми

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n,$$

де $a_0 \dots a_n$ - постійні коефіцієнти.

Поліномами можна апроксимувати будь-які результати вимірів, якщо вони графічно виражають безперервні функції. Для визначення коефіцієнтів a застосовують метод найменших квадратів.

Метод найменших квадратів заснований на наступному припущенні. По експериментальних точках можна побудувати декілька плавних кривих. Найкращою буде та крива, в якій різниці відхилення найменші, тобто $\sum \varepsilon = 0$. Порядок розрахунку коефіцієнтів полінома зводиться до наступного.

1. Визначають число членів ряду, яке зазвичай приймають не більше 3-4.

2. У прийняте вираження послідовно підставляють координати x і y у m - експериментальних крапок і отримують систему рівнянь.

3. Кожне рівняння прирівнюють відповідному відхиленню

$$a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_1^2 + \dots + a_n \cdot X_1^n - Y_1 = \varepsilon_1$$

$$a_0 + a_1 \cdot X_2 + a_2 \cdot X_2^2 + \dots + a_n \cdot X_2^n - Y_2 = \varepsilon_2$$

...

$$a_0 + a_1 \cdot X_m + a_2 \cdot X_m^2 + \dots + a_n \cdot X_m^n - Y_m = \varepsilon_m.$$

Необхідно, аби число крапок, тобто число рівнянь, було більше кількості коефіцієнтів a , що дозволяє обчислити їх при вирішенні системи рівнянь. Для цього отриману систему послідовно розбивають на групи зверху вниз, число яких має дорівнювати кількості коефіцієнтів a . У кожній групі складають рівняння і отримують нову систему рівнянь, рівну кількості груп (зазвичай 2-3).

Вирішуючи систему, знаходять значення коефіцієнтів a .

Найкращі результати при визначенні параметрів заданого рівняння дає використання методу найменших квадратів. Суть цього методу полягає в тому, що якщо всі виміри функції $y_1, y_2 \dots y_n$ вироблені з однаковою точністю і розподілені помилки виміру відповідають нормальному закону, то параметри досліджуваного рівняння визначаються за умови, що сума квадратів відхилення вимірних значень від розрахункових набуває найменшого значення.

Якщо апроксимуюче рівняння записати у виді

$$P(x) = b_1 + b_2 \cdot x + \dots + b_n \cdot x^n,$$

а наявні дані в точках x_i позначити через y_i , то умовою мінімуму суми квадратів буде рівність

$$S = \sum_{i=1}^N \{ [P(x_i, b_1, b_2, \dots, b_n) - y(x_i)]^2 \} = \min,$$

де N - число експериментальних точок.

Необхідними умовами екстремуму функції S є наступне

$$\left. \frac{\partial S}{\partial b_1} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \{ [P(x_i, b_1, b_2, \dots, b_n) - y(x_i)] \cdot \frac{\partial P}{\partial b_1} \} = 0 \right\}$$

$$\left. \frac{\partial S}{\partial b_2} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \{ [P(x_i, b_1, b_2, \dots, b_n) - y(x_i)] \cdot \frac{\partial P}{\partial b_2} \} = 0 \right\}$$

...

$$\left. \frac{\partial S}{\partial b_n} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \{ [P(x_i, b_1, b_2, \dots, b_n) - y(x_i)] \cdot \frac{\partial P}{\partial b_n} \} = 0 \right\}$$

Для випадку, коли $P(x) = b_1 + b_2 \cdot x + \dots + b_n \cdot x^n$, система розглянутих рівнянь може бути записана у виді:

$$b_1 \cdot N + b_2 \cdot \sum_{i=1}^N x_i + b_3 \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + \dots + b_n \cdot \sum_{i=1}^N x_i^{n-1} = \sum_{i=1}^N y(x_i)$$

$$b_1 \cdot \sum_{i=1}^N x_i + b_2 \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + b_3 \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + \dots + b_n \cdot \sum_{i=1}^N x_i^n = \sum_{i=1}^N x_i \cdot y(x_i)$$

...

$$b_1 \cdot \sum_{i=1}^N x_i^{n-1} + b_2 \cdot \sum_{i=1}^N x_i^n + b_3 \cdot \sum_{i=1}^N x_i^{n+1} + \dots + b_n \cdot \sum_{i=1}^N x_i^{2n-2} = \sum_{i=1}^N x_i^{n-1} \cdot y(x_i)$$

Ця система є системою n рівнянь з n невідомими значеннями параметрів b_i . Величини $N, x_i, y_i(x_i)$ в даній системі відомі. При $n \leq N$ ця система має єдине рішення; при $n > N$ - безліч рішень; на практиці зазвичай використовується умова $n \ll N$.

Для лінійної апроксимації $P = b_1 + b_2 \cdot x$ рівняння для визначення коефіцієнтів b_1, b_2 мають наступний вид

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 - N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2};$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i - N \cdot \sum_{i=1}^N x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2 - N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Інколи значення одне з коефіцієнтів заздалегідь відомо (наприклад, з теоретичного рішення або фізичних вистав). В цьому випадку розрахункові співвідношення методу найменших квадратів набирають виду

а) відоме значення b_1 , тоді
$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - b_1 \cdot N}{\sum_{i=1}^N x_i};$$

б) відоме значення b_2 , тоді
$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - b_2 \cdot \sum_{i=1}^N x_i}{N}.$$

Метод найменших квадратів забезпечує результати високої надійності. Міра точності коефіцієнтів b має бути такою, аби обчислені значення у збіглися із значеннями вихідних табличних. Це вимагає обчислювати b тим точніше, чим вище індекс b , тобто b_4 має бути точніше (більше знаків після коми), ніж b_3 і так далі.

Екстраполяція і інтерполяція часто використовується при перевірці результатів експерименту, знаходженні значень функції в проміжних точках за відсутності апроксимуючого рівняння або скруті з графічною побудовою.

Операція інтерполяції (відшукування проміжних значень) відносно просто виконується на ЕОМ і часто є проміжною при складних термодинамічних розрахунках. Одній з найбільш поширених є інтерполяційна формула Лагранжа:

$$y = y_1 \cdot \frac{(x-x_2) \cdot (x-x_3) \cdot \dots \cdot (x-x_n)}{(x_1-x_2) \cdot (x_1-x_3) \cdot \dots \cdot (x_1-x_n)} + y_2 \cdot \frac{(x-x_2) \cdot (x-x_3) \cdot \dots \cdot (x-x_n)}{(x_2-x_1) \cdot (x_2-x_3) \cdot \dots \cdot (x_2-x_n)} + \dots + y_n \cdot \frac{(x-x_2) \cdot (x-x_3) \cdot \dots \cdot (x-x_n)}{(x_n-x_1) \cdot (x_n-x_3) \cdot \dots \cdot (x_n-x_{n-1})},$$

де $x_1, y_1; x_2, y_2; \dots; x_n, y_n$ - сукупність значень, отриманих в експериментах;

x, y - значення функції і аргументу, не реалізовані в експериментах.

Екстраполяція (поширення результатів експерименту за межі діапазону дослідження) повинна застосовуватися з великою обережністю і лише в тому випадку, якщо є упевненість в плавному характері зміни кривої. Для виконання операції екстраполяції експериментальні точки представляються в системі координат, де їх зміна приблизно описується лінійною залежністю.

Диференціювання і інтеграція результатів фізичного і обчислювального експерименту використовуються для обчислення різних характеристик досліджуваного явища (витрата, тепловий потік), перевірки результатів експерименту і т.д.

Якщо в результаті фізичного експерименту отримані дискретні дані, то інтеграція може бути виконана за допомогою формули Сімпсона, яка отримана апроксимацією шуканої функції окремими параболою

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{3-n} \cdot \left(\frac{y_0 + y_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} y_i + 2 \cdot \sum_{i=1}^n y_{i-0,5} \right).$$

Для виконання диференціювання необхідно заздалегідь провести операцію графічного «згладжування», оскільки експериментальні дані завжди отримані з певною погрішністю. Похідну в першому наближенні можна розрахувати по формулі (похідна «вперед»):

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_i \approx \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i},$$

у якій $x_i, x_{i+1}, y_i, y_{i+1}$ - відносяться до умов після згладжування.

Точніші дані можуть бути отримані з використанням інтерполяційної формули Лагранжа для трьох опорних точок

$$\frac{dy}{dx} = \frac{(x_1 - x_3) + (x_1 - x_2)}{(x_1 - x_2) \cdot (x_1 - x_3)} \cdot y_1 + \frac{x_1 - x_2}{(x_2 - x_1) \cdot (x_2 - x_3)} \cdot y_2 + \frac{x_1 - x_3}{(x_3 - x_1) \cdot (x_3 - x_2)} \cdot y_3$$

1.23 Регресійний аналіз. Визначення законів розподілу і їх адекватності експериментальних даних

У реальних умовах часто зустрічаються ситуації, коли одному значенню аргументу відповідає декілька вимірюваних значень функції.

Під регресійним аналізом розуміють дослідження закономірностей між явищами (процесами), які залежать від багатьох, інколи незалежних чинників. Якщо дві змінні залежать один від одного так, що кожному значенню x відповідає певне значення y , то між ними існує функціональний або детермінований зв'язок.

Якщо зв'язок, що існує між ними, не цілком визначений і одному значенню x відповідає сукупність значень y , то такий зв'язок називають регресійним.

Функція $y=f(x)$ є регресійною (кореляційною), якщо кожному значенню аргументу відповідає статистичний ряд розподілу відгуку y . Отже, регресійні залежності характеризуються імовірнісними або стохастичними зв'язками. Встановлення регресійних залежностей між величинами x і y можливо лише тоді, коли виконані статистичні виміри. Статистичні залежності описують математичними моделями процесу, тобто регресійними виразами, що зв'язують незалежні значення x (чинники) із залежною змінною y (результуюча ознака, функція мети, відгук). Модель по можливості має бути простий і адекватною.

Суть регресійно-кореляційного аналізу зводиться до встановлення рівняння регресії, тобто виду кривої між випадковими величинами, аргументами x і функцією y , оцінці тісноти зв'язків між ними і достовірності і адекватності результатів вимірів.

Аби заздалегідь визначити наявність кореляційного зв'язку між x і y наносять точки на графік і будують так зване кореляційне поле. По тісноті групування крапок довкола прямої або кривої лінії, по нахилу лінії можна візуально судити про наявність кореляційного зв'язку.

Кореляційне поле характеризує вид зв'язку між x і y . За формою поля можна орієнтування судити про форму графіка, що характеризує прямолінійну або криволінійну залежності. Якщо на кореляційному полі усереднити точки, тобто для кожного значення x визначити \bar{y}_i і з'єднати ці точки, то буде отримана ламана лінія, звана експериментальною регресійною залежністю (лінією).

Наявність ламаної лінії пояснюється рядом причин: погрішностями вимірів, недостатньою кількістю вимірів, фізичним єством досліджуваного процесу і т.д. Якщо на кореляційному полі провести плавну лінію, яка рівновіддалена від них, то отримаємо нову теоретичну регресійну залежність (лінію).

Розрізняють однофакторні (парні) і багатфакторні регресійні залежності.

Парна регресія. Парна залежність може бути апроксимована прямою лінією, параболою, гіперболою, логарифмічною, статечною або показовою функцією, поліномом і ін. Двохфакторне поле можна апроксимувати площиною, параболоїдом другого порядку, гіперболоїдом. Для n змінних чинників зв'язку може бути встановлений за допомогою n -мірного простору рівняннями другого порядку

$$y = b_0 + \sum_1^n b_i \cdot x_i + \sum_1^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_1^n b_{ii} \cdot x_i^2,$$

де y - функція мети (відгуку) багатфакторних змінних;

x_i - незалежні чинники;

b_i - коефіцієнти регресії, що характеризують вплив чинника на функцію мети;

b_{ij} - коефіцієнти, що характеризують подвійний вплив чинників x_i і x_j на функцію мети.

При побудові теоретичної регресійної залежності оптимальною буде така функція, в якій дотримуються умови найменших квадратів

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \min,$$

де y_i - фактичні ординати поля;

\bar{y} - середнє значення ординати з абсцисою x , обчислену по рівнянню.

Поле кореляції апроксимують рівнянням прямої. Лінію регресії розраховують з умов найменших квадратів $y = a + b \cdot x$. При цьому коефіцієнти рівняння регресії визначаються таким чином

$$b = \frac{n \cdot \sum xy - \sum x \cdot \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}; \quad a = y - b \cdot x = \frac{\sum y}{n} - b \cdot \frac{\sum x}{n}$$

Критерієм близькості кореляційної залежності між x і y до лінійної функціональної залежності є коефіцієнт кореляції r . Він показує міру лінійності зв'язку між x і y

$$r = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

де n - число вимірів.

Значення коефіцієнта кореляції завжди менше одиниці. При $r=1,0$ x і y зв'язані функціональним зв'язком (в даному випадку лінійною), тобто кожному значенню x відповідає одне значення y . Якщо $r=0$ то лінійного кореляційного зв'язку не існує, проте може існувати нелінійна регресія. Зазвичай вважають тісноту зв'язку задовільною при $r \geq 0,5$; хорошою при $r = 0,8 \div 0,85$.

Для визначення відсотка розкиду (мінливості) шуканої функції y відносно її середнього значення, визначуваного мінливістю чинника x , обчислюють коефіцієнт детермінації

$$K_d = r^2$$

Рівняння регресії прямої можна представити вираженням $y = a + b \cdot x$ або

$$y = \bar{y} + r \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \cdot (x - \bar{x}),$$

де σ_y, σ_x - відповідно середньоквадратичне відхилення значень функції y і значень аргументу x від їх середніх значень \bar{y} и \bar{x} .

1.24 Математичне моделювання теплових процесів апаратів теплотехнології

Вивчення складних технологічних, у тому числі теплотехнічних, процесів тісно пов'язано з системним підходом. Системний підхід характеризується представленням

об'єктів вивчення у виді системи, вибором моделі і використанням її із застосуванням ЕОМ.

Система - це сукупність взаємодіючих елементів, що розглядаються як єдине ціле.

Загальними ознаками системи є: 1) наявність безлічі елементів, утворюючих певний взаємозв'язок; 2) певні стосунки елементів між собою; 3) взаємодія системи з довкіллям.

Розрізняють стохастичні (імовірнісні) і детерміновані системи.

Стохастичні системи - системи, схильні до впливу багаточисельних змінних; детерміновані характеризуються певними співвідношеннями між параметрами.

Теплову обробку матеріалів, що включає елементи термохімічної технології, можна розглядати як складну стохастичну систему. При тому початковими є наступні положення: 1) підпорядкування елементів структури системи статистичним закономірностям; 2) можливість появи випадкових ефектів при переході від елементарних процесів до складних; 3) наявність 3...15 фіксованих параметрів при стабілізації останніх, що створюють випадковий ефект.

Ефективне дослідження складної системи можливе в тому випадку, якщо вона буде розділена на простіші підсистеми. Такий підхід дозволяє відвернутися від всього різноманіття зв'язків між елементами і усередині них, зменшити розмірність задачі, більш повно осмислити єство процесів в досліджуваній системі.

Всі параметри, що характеризують технологічний апарат як систему, діляться на вхідних (X, H, Z) і вихідних (Y) (рисунки 1.10).

Вивчення роботи апаратів теплотехнології на оригіналові є складним, дорогим і часто не завжди доступним процесом. Найчастіше вивчення роботи апаратів теплотехнології проводять на моделях. Схема системи «теплотехнологічний апарат-модель» приведена на рисунку 1.11.

Відмітною особливістю вивчення роботи апаратів теплотехнології на моделях є: 1) обмежена кількість параметрів, що беруть участь в описі процесу; 2) стабілізація неконтрольованих параметрів; 3) виключення обурюючих параметрів шляхом створення відповідних умов проведення експериментів.

При вивченні роботи апаратів теплотехнології можливі два різні підходи: 1) встановлення залежностей, що відображають вплив параметрів, імітація, адаптація і оптимізація теплових процесів за допомогою математичної моделі об'єкту; 2) знаходження взаємозв'язку параметрів за допомогою фізичної моделі процесу.

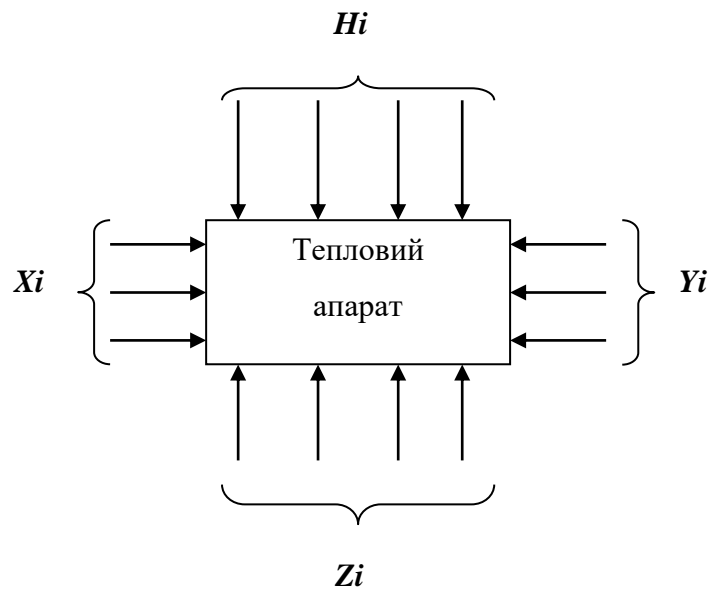
Математична модель створюється виходячи з цільової спрямованості процесу і завдань дослідження, з врахуванням необхідної точності рішення і достовірності використовуваних даних.

Математична модель є математичним відображенням найбільш істотних сторін процесу і є сукупністю рівнянь, умов і алгоритмічних правил, що дозволяють отримати інформацію про процеси, що протікають в об'єкті, розрахувати (імітувати) системи, підібрати (адаптувати) параметри, що визначають хід процесу або що характеризують його результат (якість матеріалу, ефективність і т.д.).

Фізична модель створюється виходячи з геометричної, фізичної і теплотехнічної подібності величин, тобто є копією оригінала, виконаного, як правило, в меншому масштабі. Фізичне моделювання тісно пов'язане з описом залежностей у виді критерійних рівнянь. Здобуття критерійних рівнянь витікає з диференціальних рівнянь, що описують процес, умов однозначності, теорії подібності, методу аналізу розмірності і експериментальних даних, отриманих на моделях.

Критерійні рівняння дозволяють розраховувати процес і його окремі параметри, оптимізувати режими ведення процесів, переносити закономірності і результати, отримані на моделях, на оригіналів установок.

Вибір методу при вивченні роботи апаратів теплотехнології визначається виходячи з мети і задач, які висувуються при виконанні роботи.



X - контрольовані незалежні властивості вихідних матеріалів (активність терпкого, велика заповнювача, щільність, вологість, температура матеріалу і т.д.). Кількісні значення вхідних параметрів визначаються заздалегідь або фіксуються як свідчення відповідних приладів.

H - контрольовані і регульовані параметри управління, характеризують стан управляючих дій. Для апаратів теплотехнології до цієї групи параметрів відносяться температура і швидкість руху теплоносія. Кількісні значення цієї групи параметрів задаються регулювальниками і фіксуються контрольовано-вимірювальною апаратурою.

Z - неконтрольовані і некеровані обурюючі параметри, мають випадковий характер, змінні по величині, інтенсивності і точкам додатка, не завжди мають явно виражену природу. До обурюючих параметрів відносяться неконтрольовані вхідні параметри дії випадкових зовнішніх чинників, зміна характеристик технологічного устаткування.

Y - залежні вихідні змінні, що характеризують якісні характеристики отриманого матеріалу. До вихідних параметрів можуть бути також віднесені дані, що враховують продуктивність, вартість і ін., оцінюючу правильність і ефективність роботи об'єкту. Параметри цієї групи часто виступають як параметри оптимізації або обмеження.

Рисунок 1.10 - Апарат теплотехнології як система

Математичне моделювання засноване на використанні систем рівнянь математичного опису, що відображають єство явищ, що протікають в об'єкті.

Математичне формулювання задачі в цьому випадку представляється як задача знаходження значення функції від декількох змінних

$$y=f(x_i, x_j, x_q),$$

де y - кількісна величина оцінюваного параметра (Y);

x_i - характеристики властивостей об'єкту (X);

x_j, x_q - характеристики зовнішніх дій (H) і (Z).

На незалежні змінні при моделюванні можуть бути накладені обмеження, викликані фізичними, ресурсними і іншими причинами, у виді рівності

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)=0$$

або нерівності

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)\leq 0.$$

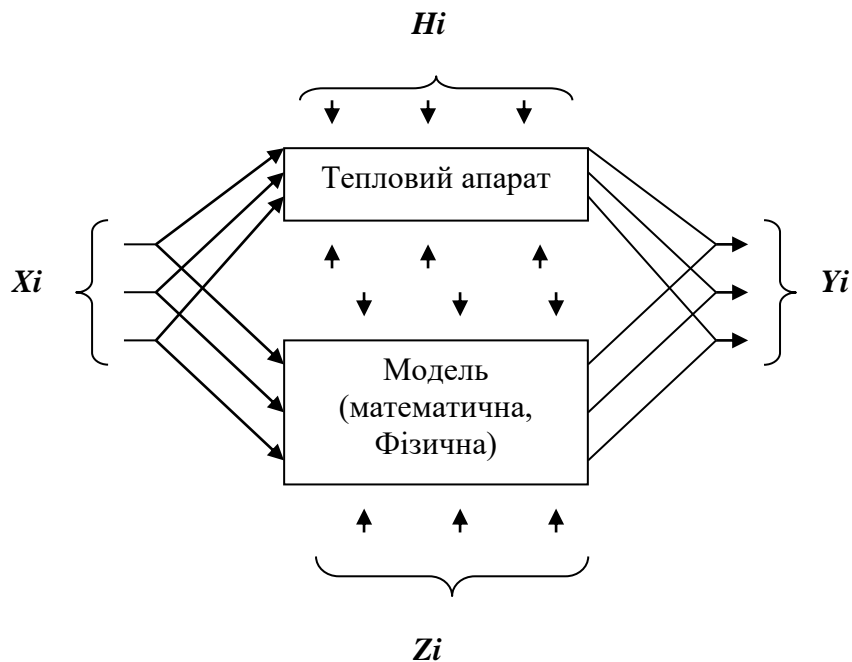


Рисунок 1.11 - Система «теплотехнологічний апарат-модель»

При математичному моделюванні процесів теплотехнології можливе вирішення наступних видів задач: 1) розрахунок вихідних параметрів Y , що відображають реакцію на обурення (X, H) - пряма задача імітації; 2) розрахунок вхідних параметрів X при фіксованих параметрах Y - зворотна задача імітації; 3) розрахунок параметрів управління H при відомих X і Y - задача адаптації; 4) розрахунок екстремальних значень параметрів X, H, Y з врахуванням фізичних, ресурсних і інших обмежень - задача оптимізації.

При виконанні дослідницьких робіт найчастіше доводиться стикатися з вирішенням прямих задач імітації. Інші види задач зустрічаються при більш поглибленому вивченні процесів.

Здобуття математичних моделей включає: 1) постановку задачі; 2) побудова схеми теплотехнічного процесу; 3) відбір і ранжирування параметрів, що визначають хід процесу; 4) планування експерименту (відбір параметрів, визначення інтервалів варіювання, вибір матриці планування); 5) активний експеримент, зв'язаний із застосуванням статистичних планів; 6) обробку результатів експерименту (знаходження коефіцієнтів рівнянь регресії, перевірка їх значущості); 7) перевірку адекватності моделі; 8) аналіз математичних моделей; 9) вирішення технологічних задач; 10) практичні рекомендації.

Загальна схема вирішення задач з вживанням математичних моделей показана на рисунку 1.12.

Постановка задачі полягає в технологічному і математичному формулюванні предмету дослідження. Технологічне формулювання задачі повинне відображати вплив параметрів на кінцеві показники процесу. Наприклад, вплив середньої щільності, початкового вологовмісту, температури і швидкості руху теплоносія на тривалість сушки, міцності показники матеріалу. Технологічне формулювання задачі повинне включати і ті умови однозначності (наприклад, обмеження по щільності, міцності, ресурсні обмеження), які накладаються при виконанні досліджень. Технологічна постановка задачі може бути сформульована і як задача, що направлена на пошук екстремальних значень або відповідає умовам якісних або ресурсних обмежень (наприклад, визначити температуру теплоносія, що забезпечує мінімальну дефектність структури при обмеженнях по t_r, v).



Рисунок 1.12 - Схема вирішення задач із застосуванням математичних моделей

Математичне формулювання задачі перш за все повинне вказувати, до якої категорії задач відноситься дана задача (імітації, адаптації, оптимізації і т.д.). Крім того, при математичному формулюванні задачі необхідно в загальному виді вказати перелік функціональних залежностей, які мають бути отримані при виконанні досліджень

$$y_1=f(x_i, h_j), y_2=\varphi(x_i, h_j).$$

При математичній постановці задачі можливе формулювання задач опису (імітації) процесу і встановлення впливу окремих чинників, завдань адаптації - знаходження показників і управління при фіксованих кінцевих властивостях, а також задачі оптимізації, мета яких знаходження екстремальних значень параметрів, що вивчаються.

Побудова схеми процесу теплової обробки матеріалів включає створення системи матеріал-теплова обробка, з вказівкою вхідних (X) і вихідних (Y) чинників, а також параметрів управління.

Схема процесу теплової обробки матеріалу може бути представлена у виді єдиної системи (рисунок 1.13).

При побудові схеми теплової обробки матеріалу необхідно вказати максимальну кількість показників, що характеризують властивості вихідного матеріалу, а також всі параметри управління, які реально впливають або можуть впливати на хід процесу. На цьому ж етапі слід зазначити стабільні показники, що не міняють своєї величини при виконанні роботи, і показники, що потрапляють в умови однозначності (обмеження).

Відбір і ранжирування параметрів проводиться з метою установки найбільш значимих, якнайповніше пов'язаних з досліджуваними.

При початковому етапі ранжирування доцільно включати якомога більше чинників x_i , що гіпотетично впливають на хід процесу для оцінки всіх лінійних і квадратичних ефектів, а також ефектів взаємодії, які можуть надавати істотний вплив на хід процесу. На етапі планування при виконанні дослідницьких робіт бажано залишити 2...5 основних чинників x_i .

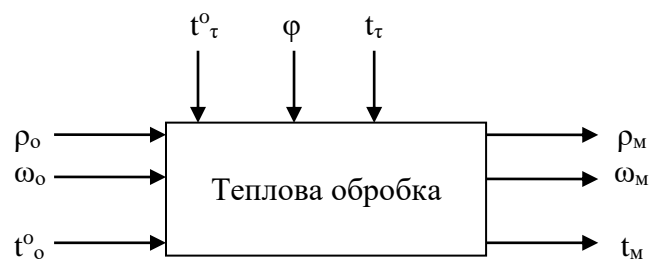


Рисунок 1.13 - Система «матеріал-теплова установка» при тепловій обробці

Одним із способів встановлення міри впливу окремих чинників на хід теплової обробки (ранжирування чинників) є анкетний опит фахівців.

Опитуваним пропонується проранжувати групу чинників (розподілити їх у порядку значущості), що впливають на кінцеві властивості матеріалу (y_1 - межа міцності при стискуванні) або показники процесу (y_2 - тривалість сушки). Перелік показників і межі їх зміни приведені в таблиці 1.

Результати анкетного опиту фахівців представлені в таблиці 2.

Обробка результатів опиту полягає у визначенні міри узгодженості думок всіх дослідників за допомогою коефіцієнта координації

$$W = \frac{S}{1/12m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j},$$

де S - сума квадратів відхилень суми рангів кожного чинника від середнього значення;

m - кількість експертів;

n - число чинників;

T_j - значення чинника

$$T_j = \frac{1}{12} \sum (t_j^3 - t_j),$$

де t_i - число повторень кожного рангу в j -м ряду.

Таблиця 1 - Показники сушки матеріалів і межі їх зміни, внесені до анкети

Показники теплової обробки	Межі в'язкості	
	мінімум	максимум
Щільність матеріалу, кг/м ³	300	500
Вологість матеріалу %	25	35
Температура теплоносія °С	60	100
Швидкість руху теплоносія, м/с	1	3
Відносна вологість теплоносія, %	50	60

Таблиця 2 - Результати опиту фахівців

Чинники	Думки фахівців									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X ₁	4	5	3							
X ₂	3	4	4							
X ₃	2	1	2							
X ₄	5	3	1							
X ₅	1	2	3							

Для розрахунку коефіцієнта конкордації необхідно підрахувати суму рангів кожного чинника $\sum_{i=1}^m a_i$, різницю між сумою рангів кожного чинника і середньою сумою рангів

$$\Delta_i = \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{ij/n} = \sum_{i=1}^m a_i - \bar{a} ,$$

квадрати цих різниць Δ_i^2 і суму квадратів відхилень

$$S = \sum_{i=1}^m \Delta_i^2$$

Коефіцієнт конкордації може набувати значень з 0 до +1, причому W=0 означає відсутність якої-небудь згоди в думках дослідників, W=1 - повна згода опитаних.

Математичне планування експерименту передбачає постановку дослідів за задалегідь складеною схемою, що має оптимальні властивості з точки зору умов об'єму експериментальних робіт і умов статистичної обробки результатів. В основу теорії планування експерименту покладені ймовірностно-статистичні методи, що дозволяють теоретично обґрунтовано встановити мінімальне необхідне число і склад експериментів, а також порядок їх проведення для здобуття кількісних залежностей між параметрами, що вивчаються, і чинниками, що впливають на нього.

Для планування експерименту характерне: 1) прагнення до мінімізації загального числа дослідів; 2) одночасне варіювання всіма змінними по спеціальних алгоритмах; 3) використання математичного апарату, що формалізує дії експериментатора.

Вживання математичних методів планування експериментів дозволяє користуватися обґрунтованою програмою проведення досліджень. Обробка результатів дослідів на ЕОМ дає можливість швидко провести багатоваріантні розрахунки і отримати математичний опис процесу, що вивчається. Чітка стратегія підвищує ефективність експерименту, забезпечує скорочення числа дослідів і дозволяє представити результати в зручній формі. Навіть при неповному знанні процесу можна шляхом направлено експерименту отримати його математичну модель, що включає найбільш впливаючі чинники. Така

математична модель може з успіхом використовуватися для управління процесом, у тому числі теплотехнічним, і для знаходження оптимальних режимів роботи теплових установок.

Планування експериментів включає вибір числа і виду чинників, встановлення основного рівня і інтервалів їх варіювання, вибір матриці планування експериментів.

Вибір числа і виду змінних чинників вирішується виходячи із задачі досліджень, схеми теплової обробки і ранжирування чинників. У число чинників відбираються найбільш значимі в кількості 2...5. Більше число змінних параметрів ускладнює проведення експерименту і обробку отриманих даних.

Важливим етапом при плануванні експериментів є вибір основного рівня і інтервалів варіювання чинників. За основний рівень слід набувати тих значень параметрів, при яких раніше були досягнуті найкращі результати.

При виборі інтервалів варіювання слід мати на увазі, що вони не мають бути надмірно вузькими або широкими. Вузькі інтервали варіювання утрудняють, а то і повністю виключають можливість оптимізації окремих параметрів. Широкі інтервали варіювання наводять до збільшення витрат часу на пошук оптимальних значень, а також можливі випадки проскакування екстремуму. На інтервал варіювання накладаються обмеження знизу (він не може бути менше можливої помилки виміру) і зверху - верхній або нижній рівні не повинні виходити за область визначення. Чим нижче точність виміру, чим менше кривизна поверхні відгуку і вже діапазон виміру параметра оптимізації, тим великим може бути інтервал варіювання.

Значення, які приймає незалежна; змінна X , називаються рівнями. Розрізняють основний (нульовий) рівень - центр планування експерименту, верхній рівень (+1) - максимальні значення X і нижній рівень (-1) - мінімальні значення X . При плануванні експерименту прийнято значення незалежної змінної в натуральному виді (X) замінювати на кодовані (x). Для кодування значення x знаходять по формулі

$$x = (X - X_0) / \Delta X ,$$

де x - кодоване значення змінної;

X - натуральне значення змінної;

X_0 - значення змінної на нульовому рівні;

ΔX - інтервал варіювання

$$\Delta X = (X_{\max} - X_{\min}) / 2,$$

$$X_0 = \sum_1^n X_i / N.$$

Інформацію, що показує умови планування експерименту, можна представити у виді таблиці 3.

Таблиця 3 - Умови планування експерименту

Чинники		Рівні варіювання			Інтервали варіювання
Натуральний вид	Кодований вид	-1	0	+1	
Початковий вологовміст, %	x_1	40	60	80	20
Температура теплоносія, °C	x_2	50	70	90	20
Швидкість руху теплоносія, м/с	x_3	1,0	2,0	3,0	1,0

Вибір матриці планування пов'язаний з визначенням числа, виду і порядку виконання експериментів. При виборі плану експерименту беруть до уваги типа змінних чинників, технічні можливості реалізації дослідів і інші умови. При вивченні теплових процесів мають місце лінійні, неповні квадратичні або квадратичні залежності, знаходження яких зв'язане із застосуванням повного факторного експерименту. При проведенні повного факторного експерименту планування здійснюється на двох рівнях - верхньому (+1) і нижнім (-1). Число дослідів N залежить від числа чинників k і визначається по формулі $N=2^k$. Так, для двох чинників $N=2^2=4$, для трьох $N=2^3=8$, для чотирьох $N=2^4=16$ і т.д.

У матриці планування кожен рядок відноситься до одного з експериментів. У вертикальних стовпцях вказуються номер досвіду, вид і рівень кодіваних змінних (x_i), а також результати спостережень - значення y . Приклади матриць математичного планування експерименту наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 - Матриці повнофакторного експерименту ($k=2...5$)

Точки плану	Чинники					Точки плану	Чинники				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	+1	+1	+1	+1	+1	17	+	+	+	+	-1
2	+1	-1	+1	+1	+1	18	+	-	+	+	-1
3	-1	+1	+1	+1	+1	19	-	+	+	+	-1
4	-1	-1	+1	+1	+1	20	-	-	+	+	-1
5	+	+	-1	+1	+1	21	+	+	-	+	-1
6	+	-1	-1	+1	+1	22	+	-	-	+	-1
7	-	+	-1	+1	+1	23	-	+	-	+	-1
8	-	-	-1	+1	+1	24	-	-	-	+	-1
9	+	+	+	-1	+1	25	+	+	+	-	-1
10	+	-	+	-1	+1	26	+	-	+	-	-1
11	-	+	+	-1	+1	27	-	+	+	-	-1
12	-	-	+	-1	+1	28	-	-	+	-	-1
13	+	+	-	-1	+1	29	+	+	-	-	-1
14	+	-	-	-1	+1	30	+	-	-	-	-1
15	-	+	-	-1	+1	31	-	+	-	-	-1
16	-	-	-	-1	+1	32	-	-	-	-	-1

Здобуття вихідної інформації для статистичної обробки здійснюється при експериментах, що проводяться на стендах, рідше на промислових установках. Розрізняють пасивні і активні експерименти. До пасивних експериментів відносяться такі, які виконуються без залучення спеціальних математичних методів планування. До пасивних відносяться також експерименти, що проводяться в умовах, коли немає можливості направленою варіювання змінними, а здійснюється фіксація їх поточних знань.

Активний експеримент проводять при значеннях параметрів процесу, вибраних відповідно до певного, заздалегідь сформульованого плану. При виконанні активних експериментів необхідно, аби теплова установка була оснащена контрольно-вимірювальною і регулюючою апаратурою, відповідній модельній схемі. Дані, що характеризують умови проведення експериментів і отримані результати, зводять в таблицю, аналогічну матриці планування.

Результати експериментів, виконаних згідно матриці планування, дозволяють отримати регресійну залежність між параметрами оптимізації і змінними чинниками у виді полінома першого або другого порядку

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i,$$

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2.$$

Ці рівняння називаються рівняннями регресії, в яких b_i , b_{ij} і b_{ii} - коефіцієнти регресії. Статистична обробка результатів експериментів і формування математичної моделі включає знаходження коефіцієнтів в рівнянні регресії, перевірку їх значущості і адекватності моделі.

Вільний член рівняння

$$b_0 = \sum_1^N y_u / N ,$$

де N - число дослідів;

y_u - значення вихідного параметра в u -м досвіді.

Коефіцієнти для лінійних членів рівнянь

$$b_i = \sum_1^N x_{iu} y_u / N ,$$

де x_{iu} - значення i -го чинника в рядку матриці в u -м досвіді.

Коефіцієнти парних взаємодій

$$b_{ij} = \sum_1^N x_{iu} x_{ju} y_u / N ,$$

де x_{ju} - значення j -го чинника в u -м досвіді.

Враховуючи імовірнісний характер регресійних рівнянь, слід провести їх статистичний аналіз, основною метою якого є: оцінка значущості коефіцієнтів рівнянь і перевірка адекватності рівнянь. Для більшої надійності бажано мати 4...5 значень на нульових рівнях.

При оцінці значущості коефіцієнтів рівнянні регресії визначається середньоарифметичне значення вихідних параметрів y і y_0

$$y = \frac{\sum_1^r y_{ui}}{r} = \frac{y_{u1} + y_{u2} + y_{u3} + \dots + y_{ur}}{r} ,$$

$$y_0 = \frac{\sum_1^n y_{0u}}{n_0} .$$

де n_0 - число нульових крапок.

Дисперсія відтворюваності вихідного параметра

$$S_{yu}^2 = \frac{\sum_1^N (y_{u1} - y_u)^2}{N} ,$$

$$S_{y0}^2 = \frac{\sum_1^N (y_{0u} - y_0)^2}{n-1} .$$

Середньоквадратична помилка при визначенні коефіцієнтів для лінійних і неповних квадратичних рівнянь

$$S_{b0} = S_{bi} = S_{bij} = S_{yu} / \sqrt{N}$$

Розрахункове значення t -критерію Стьюдента для лінійних і неповних квадратичних

$$t_{p(b_0)} = |b_0| / S_{b_0},$$

$$t_{p(b_i)} = |b_i| / S_{b_i},$$

$$t_{p(b_{ij})} = |b_{ij}| / S_{b_{ij}}.$$

Коефіцієнти вважаються значимими, якщо розрахункове значення критерію виявиться більше табличного t_T , отриманого при рівні 0,05 або 0,1. Значення t_T знаходять виходячи з числа мір свободи, які визначають як:

$f(y)=N$ - для матриці планування без дублювання;

$f(y)=N(r-1)$ - при дублюванні дослідів по рядках;

$f(y)=N_0-1$ - при проведенні дослідів на нульовому рівні.

Якщо $t_p < t_T$, то коефіцієнт є незначимим і може бути відкинтий без перерахунку останніх.

Перевірка адекватності отриманих рівнянь регресії полягає у визначенні дисперсії адекватності, оцінці однорідності дисперсій по критерію Фішера і порівнянні набутих значень з табличними даними.

Для лінійних і неповних квадратичних рівнянь дисперсія адекватності

$$S_{2\hat{a}\hat{a}}^2 = \sum_1^T (\bar{y} - y_u)^2 / (N - m),$$

де N - число дослідів;

m - число значимих коефіцієнтів, у тому числі b_0 .

Для оцінки однорідності дисперсій застосовують F -критерій Фішера. Розрахункові значення критерію визначають по формулах

$$\text{при } S_{2\hat{a}\hat{a}}^2 > S_{(y)}^2 \quad F_p = S_{2\hat{a}\hat{a}}^2 / S_{(y)}^2;$$

$$\text{при } S_{2\hat{a}\hat{a}}^2 < S_{(y)}^2 \quad F_p = S_{(y)}^2 / S_{2\hat{a}\hat{a}}^2,$$

де $S_{(y)}^2$ - дисперсія відтворюваності вихідного параметра.

Табличні значення критерію Фішера F_T , знаходять по прийнятій довірчій вірогідності і числу мір свободи. У теплових процесах довірча вірогідність може бути прийнята 95% (90%). Число мір свободи f_{ad} для лінійних і неповних квадратичних рівнянь

$$f_{ad} = N - m$$

Рівняння вважається адекватним для прийнятого рівня довірчої вірогідності, якщо $F_p < F_T$. Якщо отримане рівняння неадекватно, то при проведенні дослідів були допущені грубі помилки або даний поліном недостатньо повно відображає досліджувану залежність. У цих випадках необхідно повторити досліди, або змінити інтервали варіювання, або застосувати інший план.

Аналіз математичних моделей у виді рівнянь регресії виконують на завершальному етапі. Найлегше аналізу піддаються лінійні моделі. Знак при коефіцієнті показує вплив, відповідного чинника: (+) свідчить про те, що із збільшенням чинника величина відповідного виходу параметра збільшується, а (-) означає, що вона убуває. Чим більше значення коефіцієнта, тим сильніше вплив чинника. Якщо необхідно набути максимального значення вихідного параметра, то значення всіх чинників, коефіцієнти b_i яких мають знак (+), слід приймати максимальними, а значення чинників, коефіцієнти b_i яких мають знак (-), - мінімальними. Абсолютні значення коефіцієнтів рівнянь регресії збільшуються із збільшенням інтервалів варіювання.

У неповних квадратичних рівняннях регресії знак перед коефіцієнтом лінійного члена відповідає напрямку зміни вихідного параметра за умови, що інші чинники прийняті на основному рівні. Знак (+) перед коефіцієнтом взаємодії свідчить про те, що збільшення вихідного параметра можливе лише в тому випадку, якщо взаємодіючі чинники знаходяться одночасно на верхньому або на нижньому рівні, а знак (-) означає, що один чинник знаходиться на верхньому, а інший на нижньому рівні.

У квадратичних рівняннях аналіз найзручніше вести, перетворивши рівняння регресії в параболу виду $\bar{y} = b_0 + b_1x_1 + b_1x_1^2$, що можливо, якщо набути значень всіх чинників, окрім одного на основному рівні. Тоді екстремум (максимум або мінімум) буде в точці $x_{\text{ext}} = -b_1 / 2b_{11}^2$. Абсолютне значення коефіцієнта відповідає швидкості зміни досліджуваного чинника x_i .

Задачі оптимізації полягають в знаходженні такого поєднання чинників, яке забезпечує максимальне (мінімальне) значення вихідного параметра. Частина параметрів в цьому випадку може виступати як обмеження. Екстремум визначається шляхом диференціювання рівняння послідовно по x_1, x_2, x_3 . Отримана система лінійних рівнянь прирівнюється до нуля. Шляхом її рішення знаходять значення x_i , що забезпечує екстремальне значення \bar{y} . Підставляючи знайдені значення x_i у вихідне рівняння, визначають екстремальні значення вихідного параметра. Наприклад, для рівняння з трьома змінними маємо

$$\begin{aligned} \bar{y} &= b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_1x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \\ &+ b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3; \\ \frac{\partial y}{\partial x_1} &= b_1 + 2b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + b_{13}x_3 = 0; \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} &= b_2 + 2b_{22}x_2 + b_{12}x_1 + b_{23}x_3 = 0; \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} &= b_3 + 2b_{33}x_3 + b_{13}x_1 + b_{23}x_2 = 0. \end{aligned}$$

Система з трьох рівнянь з трьома невідомими може бути вирішена способом підстановки або іншими методами.

Задача мінімізації полягає у визначенні такого співвідношення чинників, яке дозволяє набути заданих значень вихідних параметрів при мінімальному значенні одного з них, наприклад температури теплоносія.

Найбільш простим і доступним способом використання рівнянь регресії є їх вистава у виді графіків і номограм. Графічне зображення рівняння регресії дозволяє оперативно встановити значення вихідного параметра при зміні кожного чинника.

Виконання роботи повинне закінчуватися висновками, що витікають з отриманих експериментальних даних і математичних моделей процесу сушки. Ґрунтуючись на результатах аналізу рівнянь регресії, у висновках необхідно показати значення кожного параметра (його вплив), намітити дороги оптимізації або мінімізації того або іншого параметра залежно від конкретної задачі, що вирішується при виконанні роботи.

Вирішення технологічних задач, пов'язаних з імітацією або оптимізацією технологічних процесів, є завершальним етапом математичного моделювання.

Відпрацьовані математичні моделі дозволяють розрахувати кінцеві показники, визначити значення параметрів управління або вхідних показників при їх стабілізації на виході, оптимізувати окремі параметри і т.д. На підставі розрахунків, виконаних із застосуванням моделей, можуть бути отримані таблиці, графіки, номограми, призначені для практичного використання.

Розглянемо на прикладі. Вплив початкового вологовмісту матеріалу, температури і швидкості руху теплоносія на межу міцності при вигині зразків з наповненого піногіпсу.

Для y_2 складають таблицю, що включає матрицю планування, експериментальні і розрахункові дані (таблиця 5).

Таблиця 5 - Матриця планування, експериментальні і розрахункові дані для y_2

Точка плану	Чинники			Значення вихідного параметра			Розрахункові значення для визначення коефіцієнтів						
	x_1	x_2	x_3	y_2'	y_2''	y_2'''	y_2	y_2x_1	y_2x_2	y_2x_3	$y_2x_1 x_2$	$y_2x_1 x_3$	$y_2x_2 x_3$
1	+1	+1	+1	4,8	4,3	4,4	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
2	+1	-1	+1	4,9	5,3	4,9	5,0	5,0	-5,0	5,0	-5,0	5,0	-5,0
3	-1	+1	+1	5,2	5,3	5,4	5,3	-5,3	5,3	5,3	-5,3	-5,3	5,3
4	-1	-1	+1	5,8	6,0	5,6	5,8	-5,8	-5,8	5,8	+5,8	-5,8	5,8
5	+1	+1	-1	4,5	5,0	4,9	4,8	4,8	4,8	-4,8	4,8	-4,8	-4,8
6	+1	-1	-1	5,6	5,3	5,3	5,4	5,4	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	5,4
7	-1	+1	-1	5,8	5,4	5,9	5,7	-5,7	5,7	-5,7	-5,7	5,7	-5,7
8	-1	-1	-1	6,3	6,4	5,2	6,3	-6,3	-6,3	-6,3	6,3	6,3	6,3
Сума							42,8	-3,4	-2,2	-1,6	0,0	0,2	0,2

Для обчислення значущості коефіцієнтів і оцінки адекватності моделі в таблиці приведені результати паралельних експериментів по рядках.

Розрахункову інформацію для перевірки значущості коефіцієнтів регресії і перевірки адекватності отриманої залежності зручно представити у виді таблиці 6.

Визначення коефіцієнтів рівняння регресії

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N} = \frac{42,8}{8} = 5,35;$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{1i} \bar{y}_i}{N} = -\frac{3,4}{8} = -0,43;$$

$$b_3 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{3i} \bar{y}_i}{N} = -\frac{1,6}{8} = -0,2;$$

$$b_{12} = 0;$$

$$b_{13} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{1i} x_{3i} \bar{y}_i}{N} = \frac{0,2}{8} = 0,025;$$

$$b_{23} = \frac{0,2}{8} = 0,025.$$

Таблиця 6 - Розрахункова інформація для перевірки значущості коефіцієнтів регресії (I) і перевірки адекватності отриманої залежності (II)

Точка плану	Розрахункові дані					
	I			II		
	y_2	$y_2 - y_4$	$(y_2 - y_4)^2$	y	$y - y_4$	$(y - y_4)^2$
1	4,5	-0,85	0,72	4,65	0,15	0,0225
2	5,0	-0,35	0,12	5,19	0,19	0,0361
3	5,3	-0,05	0,002	5,51	0,21	0,0441
4	5,8	0,45	0,20	6,05	0,25	0,0625
5	4,8	-0,55	0,30	4,65	-0,15	0,0225
6	5,4	0,05	0,002	5,19	-0,21	0,0441
7	5,7	0,35	0,12	5,51	-0,19	0,0361
8	6,3	0,95	0,90	6,05	-0,15	0,0225
Σ	42,8		2,364			0,29
y	5,35					

Рівняння регресії для y_2 з врахуванням отриманих коефіцієнтів

$$y_2 = 5,35 - 0,43x_1 - 0,27x_2 - 0,2x_3 + 0,025x_1x_3 + 0,025x_2x_3.$$

Оцінимо значущість коефіцієнтів по t -критерію Стьюдента. Для цього необхідно визначити:

середньоарифметичне значення

$$\bar{y}_2 = \sum_1^N y_{1u} / N = 42,8 / 8 = 5,35;$$

дисперсію відтворюваності S_y^2 для y_2

$$S_y^2 = \sum_1^N (y_{2u} - y_2)^2 / N = 2,364 / 8;$$

середньоквадратичне відхилення для y_2

$$S_{yu} = \sqrt{\sum (y_{2u} - y_u)^2 / N} = 0,54;$$

середньоквадратичну помилку для лінійних і неповних квадратичних рівнянь

$$S_{b_0} = S_{b_1} = S_{b_{ij}} = \frac{S_{yu}}{\sqrt{N}} = \frac{0,54}{2,83} = 0,19;$$

розрахункове значення t -критерію для лінійних і неповних квадратичних рівнянь

$$\begin{aligned} t_{p(b_0)} &= |b_0| / S_{b_0} = 5,35 / 0,19 = 28,1, \\ t_{p(b_1)} &= |b_1| / S_{b_1} = 0,43 / 0,19 = 2,26, \\ t_{p(b_2)} &= |b_2| / S_{b_2} = 0,27 / 0,19 = 1,42, \\ t_{p(b_{13})} &= |b_{13}| / S_{b_{13}} = 0,025 / 0,19 = 0,13, \\ t_{p(b_{23})} &= |b_{23}| / S_{b_{23}} = 0,025 / 0,19 = 0,13. \end{aligned}$$

При рівні значущості 0,1 і числі мір свободи $f_y = N(f-1) = 8(3-1) = 16$ табличне значення t -критерію Стьюдента дорівнює 1,75. При $t_p < t_T$ коефіцієнт є незначимим і може бути відкинутий без перерахунку останніх. У рівнянні залишаються коефіцієнти b_0 и b_1 . Розрахунковий t -критерій при b_2 менше табличного, але має значення, близьке до нього, тому також може бути залишений. Тоді рівняння набере виду

$$y_2 = 5,35 - 0,43x_1 - 0,27x_2.$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії визначимо дисперсію адекватності $S_{ад}^2$ - розрахункове і табличне значення F -критерію Фішера

$$S_{\bar{y}\bar{y}}^2 = \sum_1^T (\bar{y} - y_u)^2 / (N - m) = 0,29 / 3 = 0,097,$$

де \bar{y}_2 - розрахункове значення y_2 ;

y_u - значення y_2 , отримане при експерименті по рядку;

m - число значимих коефіцієнтів;

N - число дослідів.

$$F_p = \frac{S_y^2}{S_{a0}^2} = \frac{0,3}{0,097} = 3,09$$

Табличне значення F -критерію знаходиться з врахуванням довірчої вірогідності і числа мір свободи. При довірчій вірогідності 95% і числі мір свободи дисперсії адекватності $f_{ад} = N - m = 8 - 3 = 5$ маємо $F_T = 2,9$.

Рівняння вважається адекватним, якщо $F_p < F_T$. В даному випадку для прийнятого рівня довірчої вірогідності рівняння виявилось неадекватно ($3,09 > 2,9$).

При довірчій вірогідності 90% (рівень значущості 0,1) $F_T = 4,44$, в цьому випадку $F_p < F_T$ ($3,09 < 4,44$). Отже, при довірчій вірогідності 90% рівняння адекватно описує наявну залежність.

У випадку якщо і при зміні довірчій вірогідності рівняння неадекватно, то при проведенні дослідів були допущені грубі помилки або вибраний поліном недостатньо повно відображає досліджувану залежність. Необхідно або повторити досліди, або змінити інтервали варіювання, або застосувати інший план.

Аналіз отриманих залежностей. В результаті виконання експериментів і математичної обробки даних встановлені наступні залежності тривалість теплової обробки

$$y_1 = 87,5 + 12,5x_1 - 10x_2 - 7,5x_3;$$

межа міцності наповненого піногипсу при вигині

$$y_2 = 5,35 - 0,43x_1 - 0,27x_2;$$

де x_1, x_2, x_3 - відповідно початкова вологість матеріалу, температура і швидкість руху теплоносія.

Отримані рівняння показують, що тривалість сушки збільшується з підвищенням початкової вологості матеріалу і скорочується при збільшенні температури теплоносія і швидкості його руху. Причому вплив температури виявляється сильніше в порівнянні з швидкістю руху теплоносія.

На межу міцності при вигині наповненого піногипсу негативно діє як підвищення температури, так і швидкість руху теплоносія. В цьому випадку вплив температури виявляється сильніше, ніж швидкості руху теплоносія. Подібні закономірності можуть бути виявлені не лише для лінійних і неповних квадратичних залежностей, але і для залежностей, виражених рівняннями вищого порядку.

При обчисленні значень y_i для проміжних значень X знаходять їх кодоване значення по формулі

$$x_i = [X_i - X_{i(0)}] / (\Delta X_i),$$

де x_i - кодоване значення чинника;

X_i - натуральне значення чинника;

$X_{i(0)}$ - натуральне значення чинника на нульовому рівні.

Так, для $X_1 = 50\%$, $X_2 = 80^\circ\text{C}$ и $X_3 = 1,5$ м/с відповідно кодовані значення будуть рівні

$$x_1 = [X_1 - X_{1(0)}] / (\Delta X_1) = (50 - 60) / 20 = -0,5;$$

$$x_2 = [X_2 - X_{2(0)}] / (\Delta X_2) = (80 - 70) / 20 = 0,5;$$

$$x_3 = [X_3 - X_{3(0)}] / (\Delta X_3) = (1,5 - 2,0) / 1,0 = -0,5.$$

При побудові номограм, враховуючи великий об'єм розрахунків (особливо для неповних квадратичних і квадратичних рівнянь), перехід від натуральних значень до кодованих і визначення шуканої функції виробляють із застосуванням спеціальних програм, призначених для цих цілей. Для лінійних залежностей номограми легко можуть бути побудовані без вживання ЕОМ. Для цього слід скористатися розрахованими значеннями \bar{y} отриманими після статистичної обробки експериментальних даних.

Наприклад, для $y_1 = 87,5 + 12,5x_1 - 10x_2 - 7,5x_3$ має значення, приведені в таблицю 7.

Таблиця 7 - Дані для визначення \bar{y}_1

Номер опиту	$x_1(u, \%)$	$x_2(t^\circ, C^\circ)$	$x_3(v, m/c)$	\bar{y}_1
1	40	50	1,0	92,5
2	40	90	1,0	72,5
3	80	50	1,0	117,5
4	80	90	1,0	97,5
5	40	50	3,0	77,5
6	40	90	3,0	57,5
7	80	50	3,0	102,5
8	80	90	3,0	82,5

При лінійній залежності для побудови номограми досить скористатися чотирма значеннями в (1, 3, 6, 8). Інші дані займають проміжне значення. Номограма дозволяє прослідити не лише вплив окремих параметрів, але і визначити числові значення.

2 ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ВІДШУКАННЯ ОПТИМУМУ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ

Стосовно розрахунку екстремальних значень параметрів з врахуванням фізичних, ресурсних і інших обмежень при математичному моделюванні процесів теплотехнології - то це є задача оптимізації. Процес оптимізації здійснюється на підставі системного аналізу, за допомогою якого створюється математична модель досліджуваного об'єкту, параметри якої підлягають оптимізації.

Дослідження і оптимізація виробничих процесів і систем є в даний час однією з найважливіших складових частин дослідницької роботи.

Оптимізація полягає у відшуванні параметрів незалежних змінних, відповідних екстремуму (максимуму або мінімуму) цільової функції

$$\max f(x), x \in X$$

або

$$\min f(x), x \in X,$$

де $X = E_n$ - деяка безліч. При цьому якщо $X = E_1$ - задача зводиться до відшування екстремуму функції однієї змінної; якщо $X = E_n$ - задача відшування екстремуму функції n -змінних.

Третій варіант - якщо задача оптимізації функції декілька змінних вирішується за наявності обмежень на аргументи у виді нерівностей і рівнянь.

2.1 Функція однієї змінної. Умови екстремуму

Розглянемо функцію однієї змінної $f(x)$. Поставимо задачу знаходження мінімуму даної функції.

Хай функція є безперервною в області $x \in X$.

Якщо виконується умова $f(x^*) \leq f(x)$ для всіх $x \in X$, то в точці x^* знаходиться *глобальний мінімум* функції $f(x)$.

Якщо виконується умова $f(x^*) < f(x)$ для всіх $x \in X, x \neq x^*$, то в точці x^* знаходиться *строго глобальний мінімум* функції $f(x)$.

Поставимо умову $|x - x^*| \leq \varepsilon, \varepsilon > 0$. Якщо $f(x^*) \leq f(x)$ для всіх $x \in X, x \neq x^*$, в точці x^* знаходиться *локальний мінімум* функції $f(x)$.

Необхідною умовою знаходження локального екстремуму функції $f(x)$ в області $x \in X$ є

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^*} = 0$$

Проте дана умова однакова і для точок локального мінімуму, і для точок локального максимуму, і для точок перегину, тобто є недостатнім.

Для того, щоб уникнути порівняння значень функції $f(x)$ в усіх точках, що задовольняють заданій умові, необхідно ввести додаткові умови, які виконуються лише в точках мінімуму.

Якщо перші $(n-1)$ похідні функції $f(x)$ в точці x^* звертаються в нуль, а похідна порядку n відмінна від нуля, то:

- 1) якщо n - непарне, то x^* - точка перегину;
- 2) якщо n - парне, то x^* - точка локального оптимуму, при цьому:
 - якщо похідна більше 0, то x^* - точка локального мінімуму;
 - якщо похідна менше 0, то x^* - точка локального максимуму.

Вирішення більшості практичних задач, пов'язаних з відшукуванням оптимуму цільової функції аналітично не представляється можливим, тому найчастіше використовуються чисельні методи оптимізації.

2.2 Чисельні методи відшукування безумовного оптимуму

Для вирішення задачі відшукування безумовного мінімуму функції $f(x)$, заданою на всьому просторі E_n може бути використаний цілий ряд чисельних методів.

Пошук екстремуму функції можна виробляти, використовуючи умову $\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x^*} = 0$,

проте у ряді випадків похідна цільовій функції є досить складним вираженням, у зв'язку з чим, використовують інший алгоритм пошуку мінімуму цільової функції, який полягає в покроковому визначенні точок x_1, x_2, x_3 і т.д., значення цільової функції в яких утворюють убуючу послідовність, що сходиться. Такі способи зазвичай називають прямими методами вирішення завдань оптимізації.

Проте використання необхідних умов часто наводить також до побудови деякої послідовності, тому відмінність між двома розглянутими підходами виявляється не дуже істотною.

У результаті задача зводиться до побудови послідовності векторів $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, що задовольняють умові

$$f(x_1) > f(x_2) > f(x_3) \dots > f(x_n)$$

Такі послідовності $\{x_k\}$ прийнято називати *релаксаційними*, а методи їх побудови називають *методами спуску*.

Різні методи спуску відрізняються один від одного способами вибору напряму спуску і довжини кроку уздовж цього напряму.

Найважливішою характеристикою всіх методів спуску є швидкість їх збіжності.

При оцінці якості методу говорять про *лінійну швидкість збіжності* (збіжності із швидкістю геометричної прогресії), якщо

$$|x_{k+1} - x^*| \leq q |x_k - x^*|,$$

де x^* - точка мінімуму цільової функції;

$0 < q < 1$ - деяка константа.

Швидкість збіжності *зверхлінійна*, якщо

$$|x_{k+1} - x^*| \leq q_k |x_k - x^*|,$$

де $q_k \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$.

Швидкість збіжності *квадратична*, якщо

$$|x_{k+1} - x^*| \leq C |x_k - x^*|^2,$$

де $C \geq 0$.

Алгоритми мінімізації прийнято ділити на класи залежно від максимального порядку похідних функції, що мінімізується, обчислення яких передбачає даний метод. Так, методи, значення самої цільової функції, що використовують лише, відносяться до методів нульового порядку (*методи пошуку*); якщо, крім того, потрібне обчислення перших похідних функції, що мінімізується, дані методи відносяться до класу першого порядку і так далі

При виборі того або іншого методу оптимізації висувається вимога найменшого числа кроків (ітерацій) для здобуття результату із заданою точністю. Проте дана умова не завжди наводить до знаходження найбільш ефективного методу з точки зору витрат машинного часу, оскільки використання методів, що передбачають обчислення похідних

першого і другого порядків для досить складної цільової функції часто є громіздкою і тривалою процедурою. У зв'язку з цим відшукування найбільш прийнятної методу залежить від природи досліджуваної функції, заданої точності знаходження оптимуму, а також можливостей використовуваної техніки.

2.3 Одновимірний оптимізаційний пошук. Методи виключення інтервалів: правило виключення інтервалів; етап встановлення кордонів інтервалу; етап зменшення інтервалу

При оптимізації цільової функції в першу чергу говорять про її *унімодалність*. Дана властивість функції полягає в тому, що на заданому інтервалі $[a, b]$ дана функція має єдиний мінімум і не містить ділянок, де вона постійна. Властивість унімодалності дозволяє за результатами будь-якої пари експериментів (обчислень значень функції в точці) вказати інтервал, де міститься x^* , вужчий, ніж початковий. Тобто, якщо узяти два значення $a < x_1 < x_2 < b$, то можливі три варіанти:

- а) $f(x_1) > f(x_2)$, виключити інтервал $[a, x_1]$;
- б) $f(x_1) < f(x_2)$, виключити інтервал $[x_2, b]$;
- в) $f(x_1) = f(x_2)$, виключити інтервали $[a, x_1]$ і $[x_2, b]$.

Згідно правилу виключення інтервалів, можна реалізувати процедуру пошуку кордонів досить широкого інтервалу, що містить точки оптимуму.

При цьому необхідно пройти два етапи:

- 1) етап встановлення кордонів інтервалу, на якому реалізується пошук мінімуму цільової функції;
- 2) етап зменшення інтервалу, що полягає в послідовному перетворенні вихідного інтервалу з метою доведення його величини до заданого досить малого значення.

Встановлення кордонів інтервалу виробляють залежно від конкретного практичної задачі, що вирішується в процесі оптимізації. Якщо аргумент цільової функції не визначений заздалегідь, використовують евристичні методи пошуку.

Наприклад, евристичний метод Свенна дозволяє визначати подальшу пробну точку на підставі наступної залежності

$$x_{k+1} = x_k + 2^k \cdot \Delta,$$

де Δ - деяким способом підібрана величина кроку.

При цьому якщо x_0 - довільно вибрана точка, то знак Δ визначається шляхом порівняння $f(x_0)$, $f(x_0 + |\Delta|)$ і $f(x_0 - |\Delta|)$, використовуючи описаний вище метод виключення інтервалів.

2.4 Методи зменшення інтервалів

Метод ділення інтервалу навпіл

Суть методу полягає в розбитті заданого інтервалу $[a, b]$ на чотири рівні частини за допомогою трьох точок x_1 , x_{cp} і x_2 , після чого шляхом попарного порівняння значень функції в цих точках на кожній ітерації виключається половина інтервалу:

- 1) якщо $f(x_1) < f(x_{cp})$, виключити інтервал $[x_{cp}, b]$;
- 2) якщо $f(x_1) \geq f(x_{cp})$, виробити порівняння $f(x_2)$ и $f(x_{cp})$;
- 3) якщо $f(x_2) < f(x_{cp})$, виключити інтервал $[a, x_{cp}]$;
- 4) якщо $f(x_2) \geq f(x_{cp})$, виключити інтервали $[a, x_1]$ і $[x_2, b]$.

Після визначення нових кордонів інтервалу $[a, b]$ виробляють повторне обчислення x_1 , x_{cp} і x_2 , а також значень функції в цих точках і повторює алгоритм зменшення

інтервалу. Дана процедура виробляється до моменту, поки довжина інтервалу не стане менша або рівній заданій досить малій величині ε

$$L = |b - a| \leq \varepsilon$$

Алгоритм методу.

Для функції $y = f(x)$ задані кордони інтервалу $[a, b]$ і необхідна точність розрахунків ε .

Крок 1. Прийняти $x_{cp} = (a + b)/2$ і $L = (b - a)$. Обчислити значення $f(x_{cp})$.

Крок 2. Прийняти $x_1 = a + L/4$ і $x_2 = b - L/4$. Обчислити значення $f(x_1)$ і $f(x_2)$.

Крок 3. Порівняти $f(x_1)$ і $f(x_{cp})$.

1) Якщо $f(x_1) < f(x_{cp})$, то $b = x_{cp}$, $x_{cp} = x_1$. Йти до кроку 5.

2) Якщо $f(x_1) \geq f(x_{cp})$, йти до кроку 4.

Крок 4. Порівняти $f(x_2)$ і $f(x_{cp})$.

1) Якщо $f(x_2) < f(x_{cp})$, то $a = x_{cp}$, $x_{cp} = x_2$. Йти до кроку 5.

2) Якщо $f(x_2) > f(x_{cp})$, то $a = x_1$, $b = x_2$.

Крок 5. Обчислити $L = (b - a)$.

1) Якщо $L > \varepsilon$, йти до кроку 2.

2) Якщо $L \leq \varepsilon$, йти до кроку 6.

Крок 6. Друк результатів.

Метод дихотомії

Використовуючи даний метод, зменшення інтервалу, на якому виробляється пошук мінімуму цільової функції виробляється шляхом ділення його навпіл.

Поряд з середньою точкою C вибирається точка G (праворуч від точки C). Якщо $f(G) < f(C)$, то інтервал $[a, C]$ виключається як що не містить екстремальної точки x^* , інакше виключається інтервал $[b, C]$.

Алгоритм методу.

Крок 1. Для функції $y = f(x)$ задати початкові значення $[a, b]$ і необхідну точність розрахунків ε .

Крок 2. $C = (a + b)/2$; $y_C = f(C)$.

Крок 3. Якщо $(b - a) < \varepsilon$, йти до кроку 8. Інакше перейти до кроку 4.

Крок 4. $G = C + \varepsilon$; $y_G = f(G)$.

Крок 5. Якщо $(y_C - y_G) > 0$, йти до кроку 7. Інакше перейти до кроку 6.

Крок 6. $b = C$. Йти до кроку 2.

Крок 7. $a = C$. Йти до кроку 2.

Крок 8. $x = (a + b)/2$; $y_C = f(x)$.

Крок 9. Друк результатів.

Метод золотого перетину

Даний метод передбачає ділення вихідного інтервалу за «правилом золотого перетину».

Золотим перетином називається ділення відрізка на дві частини так, що відношення довжини всього відрізка до довжини більшої його частини дорівнює відношенню більшої частини до меншої.

Запишемо цю умову для відрізка одиничної довжини:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\tau}{1 - \tau},$$

де τ - велика частина відрізка;

$1 - \tau$ - менша частина відрізка.

Квадратичне рівняння

$$\tau^2 + \tau - 1 = 0$$

має позитивний корінь

$$\tau = (\sqrt{5} - 1)/2$$

званий дробом Фібоначчі. Це число і утворює золотий перетин відрізка. Використання дробу Фібоначчі дозволяє визначити координати крапок C і G , рівновіддалених від центру відрізка

$$C = a + (b - a) \cdot (1 - \tau)$$

$$G = a + (b - a) \cdot \tau$$

Якщо $f(C) > f(G)$, то виключають відрізок $[a, C]$, приймаючи $a = C$. Інакше вважають $b = G$.

Алгоритм методу.

Крок 1. Для функції $y = f(x)$ задати початкові значення $[a, b]$ і необхідну точність розрахунків ε .

Крок 2. $\tau = (\sqrt{5} - 1)/2$; $C = a + (b - a) \cdot (1 - \tau)$; $G = a + (b - a) \cdot \tau$. Розрахувати $f(C)$ і $f(G)$.

Крок 3. Якщо $f(C) > f(G)$, йти до кроку 5.

Крок 4. $b = G$, $G = C$, $f(G) = f(C)$, $C = a + (b - a) \cdot (1 - \tau)$. Розрахунок нового значення, йти до кроку 6.

Крок 5. $a = C$, $C = G$, $f(C) = f(G)$, $G = a + (b - a) \cdot \tau$. Розрахунок нового значення $f(G)$.

Крок 6. Якщо $(b - a) < \varepsilon$, йти до кроку 3.

Крок 7. $x = (a + b)/2$; $y = f(x)$. Друкує x, y .

Метод рівномірного пошуку

Метод ґрунтується на монотонності зміни функції мети на інтервалі $[a, b]$ при покроковому зростанні координати параметра, що оптимізується. Процес зміни координати здійснюється до тих пір, поки функція мети убуває, тобто

$$f(x_{k+1}) < f(x_k)$$

Ітераційний процес методу рівномірного пошуку виконується на підставі формули

$$x_{k+1} = x_k + \varepsilon$$

Алгоритм методу.

Крок 1. Для функції $y = f(x)$ задати початкові значення a , $y_0 = \infty$ і необхідну точність розрахунків ε .

Крок 2. $x = a$.

Крок 3. $y = f(x)$.

Крок 4. Якщо $y_0 > y$, йти до кроку 6.

Крок 5. $x = x + \varepsilon$, $y_0 = y$, йти до кроку 3.

Крок 6. Друк результатів x , y .

Метод порозрядного наближення

Метод порозрядного наближення функції $y = f(x)$ на інтервалі $[a, b]$ є різновидом методу рівномірного пошуку і реалізується відповідно до формули

$$x_{k+1} = x_k + h_k$$

Вибравши початкове значення x_k для $k = 0$ і початковий крок пошуку $h_0 = |b - a|/n$, здійснюємо ітераційний процес з початковим кроком до тих пір, поки не виконається умова

$$f(x_{k+1}) > f(x_k)$$

і потім продовжуємо пошук в протилежному напрямі з кроком в n раз меншим колишнього.

Алгоритм методу.

Крок 1. Для функції $y = f(x)$ задати початкові значення a , b , ε , n .

Крок 2. $h = |b - a|/n$, $x_0 = a$, розрахунок $f(x_0)$.

Крок 3. $x_{k+1} = x_k + h$, розрахунок $f(x_{k+1})$.

Крок 4. Якщо $|x_{k+1} - x_k| < \varepsilon$, йти до кроку 7.

Крок 5. Якщо $f(x_{k+1}) > f(x_k)$, то $h = -h/n$.

Крок 6. $x_k = x_{k+1}$, $f(x_k) = f(x_{k+1})$, йти до кроку 3.

Крок 7. Друк результатів x , y , k .

2.5 Методи оцінювання з використанням квадратичної апроксимації

У методах, заснованих на мінімакській стратегії, не враховується величина різниці між значеннями функції. Якщо ввести додаткову вимогу, аби функція була досить гладкою, можна побудувати методи, що враховують відносні зміни значень функції. Ідея методів полягає в апроксимації гладкої функції поліномом і використанні його для оцінювання координати точки оптимуму.

Простий варіант поліноміальної апроксимації - квадратична апроксимація, заснована на тому факті, що функція, що має мінімум, має бути принаймні квадратичною. Функцію на обмеженому інтервалі апроксимують квадратичним поліномом, а потім

використовують побудовану схему апроксимації для оцінювання координати точки дійсного мінімуму функції.

Якщо задана послідовність крапок x_1, x_2, x_3 і відомі відповідні цим точкам значення функції f_1, f_2, f_3 , то можна визначити постійні величини a_0, a_1, a_2 таким чином, що значення квадратичної функції

$$q(x) = a_0 + a_1 \cdot (x - x_1) + a_2 \cdot (x - x_1) \cdot (x - x_2)$$

збігаються із значеннями $f(x)$ в трьох вказаних точках. Перейдемо до обчислення $q(x)$ в кожній з трьох вказаних точок

$$f_1 = f(x_1) = q(x_1) = a_0 \quad \Rightarrow \quad a_0 = f_1$$

$$f_2 = f(x_2) = q(x_2) = f_1 + a_1 \cdot (x_2 - x_1) \quad \Rightarrow \quad a_1 = \frac{f_2 - f_1}{x_2 - x_1}$$

$$f_3 = f(x_3) = q(x_3) = f_1 + \frac{f_2 - f_1}{x_2 - x_1} \cdot (x_3 - x_1) + a_2 \cdot (x_3 - x_1) \cdot (x_3 - x_2)$$

звідки
$$a_2 = \frac{1}{x_3 - x_2} \cdot \left(\frac{f_3 - f_1}{x_3 - x_1} - \frac{f_2 - f_1}{x_2 - x_1} \right)$$

Побудований поліном можна використовувати для оцінювання координати точки оптимуму.

$$\frac{dq}{dx} = a_1 + a_2 \cdot (x - x_2) + a_2 \cdot (x - x_1) = 0$$

звідки отримаємо $\bar{x} = (x_2 + x_1)/2 - a_1/2 \cdot a_2$.

Оскільки $f(x)$ - унімодальна і апроксимуючий квадратичний поліном також є унімодальною функцією, то можна чекати, що \bar{x} близько до точки дійсного оптимуму x^* .

Метод послідовного оцінювання з використанням квадратичної апроксимації

Цей метод заснований на послідовному вживанні процедури оцінювання з використанням квадратичної апроксимації.

Хай x_1 - початкова точка, Δx - вибрана величина кроку по осі x .

Алгоритм методу.

Крок 1. Обчислити $x_2 = x_1 + \Delta x$.

Крок 2. Обчислити $f(x_1)$ і $f(x_2)$.

Крок 3. Якщо $f(x_1) > f(x_2)$, прийняти $x_3 = x_1 + 2 \cdot \Delta x$.

Якщо $f(x_1) \leq f(x_2)$, прийняти $x_3 = x_1 - \Delta x$.

Крок 4. Обчислити $f(x_3)$ і знайти

$$f_{\min} = \min \{f_1, f_2, f_3\}$$

x_{\min} - точка x_i , яка відповідає f_{\min} .

Крок 5. По трьох точках x_1, x_2, x_3 обчислити \bar{x} використовуючи формулу для оцінювання за допомогою квадратичної апроксимації.

Крок 6. Перевірка на закінчення пошуку

а) чи є різниця $f_{\min} - f(x)$ досить малою?

б) чи є різниця $x_{\min} - \bar{x}$ досить малою?

Якщо обое умови виконуються, закінчити пошук. Інакше перейти до кроку 7.

Крок 7. Вибрати «найкращу» точку (x_{\min} або \bar{x}) і дві точки по обое сторони від неї. Позначити ці точки в природному порядку і перейти до кроку 4.

2.6 Методи з використанням похідних

Якщо на додаток до умов унімодальності і безперервності ввести вимогу диференційованості функції, то ефективність пошуку мінімуму можна істотно підвищити. Вище відмічено, що необхідна умова існування локального мінімуму в точці z - рівність нулю першої похідної в цій точці

$$f'(z) = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=z} = 0$$

Якщо функція $f(x)$ містить члени, що включають x в третій і вищих мірах, то безпосереднє здобуття аналітичного вирішення рівняння $f'(x) = 0$ може виявитися скрутним. Тому використовують наближені методи. При цьому схема ітераційного процесу виглядає таким чином

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k \cdot \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_k},$$

де $\alpha_k > 0$.

Всі ітераційні процеси, в яких напрям руху на кожному кроці збігається з градієнтом функції, відрізняються один від одного способами вибору кроку α_k .

Найбільш поширено два методи вибору кроку:

- перший називається методом з *дробленням кроку* і пов'язаний з перевіркою на кожній ітерації деякої нерівності

$$f(x_k - \alpha_k \cdot f'(x_k)) - f(x_k) \leq -\varepsilon \cdot \alpha_k (f'(x_k))^2,$$

де $0 < \varepsilon < 1$ - довільно вибрана постійна (одна і та ж для всіх ітерацій).

Перша проблема, зв'язана з використанням даного ітераційного процесу полягає в правильному виборі кроку α_k . Досить малий крок α_k забезпечує убавання функції, тобто виконання нерівності $f(x_k - \alpha_k \cdot f'(x_k)) < f(x_k)$, але може привести до неприйнятної великої кількості ітерацій, необхідних для досягнення мінімуму. З іншого боку, дуже великий крок може викликати несподіване зростання функції або вагання біля точки мінімуму.

- у другому при переході з точки x_k в точку x_{k+1} функція $f(x_k - \alpha \cdot f'(x_k))$ мінімізується по α .

Оскільки використання першого методу з постійним кроком наводить до великої кількості ітерацій для досягнення точки мінімуму, методи спуску із змінним кроком є більш економічними.

Процес, на кожній ітерації якого крок α_k вибирається з умови мінімуму функції $f(x)$ у напрямі руху, тобто $f(x_k - \alpha_k \cdot f'(x_k)) = \min_{\alpha \geq 0} f(x_k - \alpha \cdot f'(x_k))$, називається

методом найшоршого спуску. При цьому послідовність крапок $x_0, x_1, x_2 \dots x_k$ зигзагоподібно наближається до точки оптимуму і на двох послідовних ітераціях напруму спуску взаємно ортогональні.

Не дивлячись на необхідність рішення на кожному кроці досить трудомісткої задачі одновимірної мінімізації, як правило, другий метод дає вигравш в числі машинних операцій, оскільки забезпечує ітераційний процес з найвигіднішим кроком.

Метод Ньютона

Метод Ньютона відноситься до методів другого порядку, оскільки побудова ітераційного процесу передбачає використання другої похідної функції, що мінімізується. У зв'язку з цим ставиться умова: досліджувана функція має бути двічі диференціюєма.

Робота алгоритму починається в точці x_0 , яка представляє початкове наближення координати стаціонарної точки, або кореня рівняння $f'(x) = 0$. Потім будується лінійна апроксимація функції $f'(x)$ в точці x_0 і точка, в якій апроксимуюча лінійна функція перетворюється на нуль, приймається як наступне наближення. Якщо точка x_k прийнята як поточне наближення до стаціонарної точки, то лінійна функція, що апроксимує функцію $f'(x)$ в точці x_k , записується у виді

$$\tilde{f}'(x; x_k) = f'(x_k) + f''(x_k) \cdot (x - x_k)$$

Прирівнявши праву частину нулю, отримаємо

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}$$

На цій формулі заснований ітераційний процес методу Ньютона.

Алгоритм методу.

Крок 1. Задати початкове наближення x_0 і точність розрахунків ε .

Крок 2. $x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}$.

Крок 3. Якщо $|x_{k+1} - x_k| < \varepsilon$, йти до кроку 6.

Крок 4. $x_k = x_{k+1}$.

Крок 5. Йти до кроку 2.

Крок 6. $x = x_{k+1}$; $y = f(x)$.

Крок 7. Друк результатів x , y , k .

Метод можна модифікувати, ввівши параметр (евристичний коефіцієнт), який впливає на швидкість збіжності

$$x_{k+1} = x_k - \alpha \cdot \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}$$

Зазвичай α рівно подвоєному дробу Фібоначчі

$$\alpha = 2 \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \right) = 3 - \sqrt{5}$$

Метод середньої точки

Розглядаючи значення похідної в точці, можна зробити виводи. Якщо в точці z виконується нерівність $f'(z) < 0$, то з врахуванням припущення про унімодальності природно стверджувати, що точка мінімуму не може знаходитися лівіше за точку z , означає інтервал $x \leq z$ виключаємо. Якщо $f'(z) > 0$ - виключаємо інтервал $x \geq z$. Вибираючи в якості z на кожній ітерації середину інтервалу, приходимо до методу середньої точки.

Алгоритм методу.

Крок 1. Задати кордони інтервалу $a \leq x \leq b$ і необхідну точність розрахунків ε .

Крок 2. Прийняти $R = b, L = a$, при цьому $f'(a) < 0, f'(b) > 0$.

Крок 3. Обчислити $z = (R + L)/2, f'(z)$.

Крок 4. Якщо $|f'(z)| \leq \varepsilon$ - закінчити пошук, йти до кроку 5.

Інакше,

якщо $f'(z) < 0$, то $L = z$, йти до кроку 3;

якщо $f'(z) > 0$, то $R = z$, йти до кроку 3.

Крок 5. Друк результатів розрахунку.

Розглянутий метод заснований лише на дослідженні знаку похідною, незалежно від значень, які ця похідна приймає.

Метод хорд (січних)

Метод хорд є комбінацією методу Ньютона і загальної схеми виключення інтервалів. Передбачимо, що виявлено дві точки L і R , в яких знаки похідних різні. Алгоритм методу хорд дозволяє апроксимувати функцію $f'(x)$ прямою лінією, що сполучає дві точки (хордою), і знайти точку, в якій січна графіка $f'(x)$ пересікає вісь абсцис.

Таким чином, наступне наближення до стаціонарної точки x^* визначається по формулі

$$z = R - \frac{f'(R) \cdot (R - L)}{f'(R) - f'(L)}$$

Ознакою наявності кореня на відрізку $[a, z]$ є виконання умови $f'(a) \cdot f'(z) < 0$.

Алгоритм програми.

Крок 1. Задати кордони інтервалу $a \leq x \leq b$ і необхідну точність розрахунків ε .

Крок 2. Прийняти $R = b, L = a$, при цьому $f'(a) < 0, f'(b) > 0$.

Крок 3. Обчислити $z = R - \frac{f'(R) \cdot (R - L)}{f'(R) - f'(L)}$.

Крок 4. Якщо $|f'(z)| \leq \varepsilon$ - закінчити пошук, йти до кроку 5. Інакше: якщо $f'(L) \cdot f'(z) < 0$, то $R = z$, йти до кроку 3; інакше $L = z$, йти до кроку 3.

Крок 5. Друк результатів розрахунку.

При реалізації методу хорд розглядається як знак похідної, так і її значення.

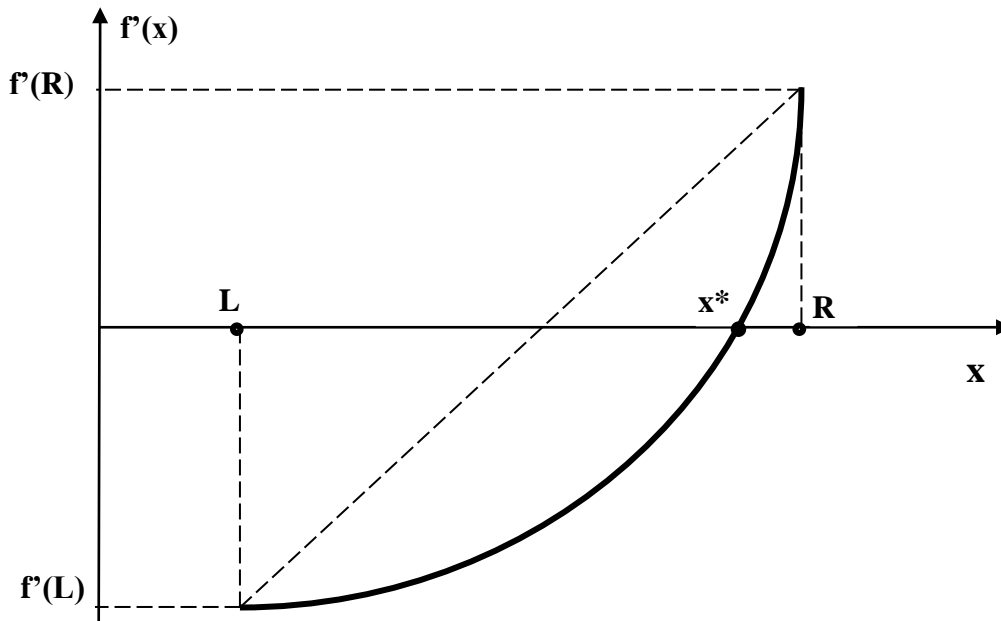


Рисунок 2.1 - Графічна інтерпретація методу хорд

Метод простих ітерацій

Метод простих ітерацій полягає в наступному. Вихідне рівняння $f'(x) = 0$ перетворюють яким-небудь чином до виду $x = \varphi(x)$ і здійснюють ітераційний процес $x_{k+1} = \varphi(x_k)$ до виконання умови $|x_{k+1} - x_k| < \varepsilon$.

Алгоритм методу.

- Крок 1. Для функції $x = \varphi(x)$ задати початкові значення a, b і необхідну точність розрахунків ε .
- Крок 2. $x_k = (a + b)/2$.
- Крок 3. $x_{k+1} = \varphi(x_k)$; $y = f(x_{k+1})$.
- Крок 4. Якщо $|x_{k+1} - x_k| < \varepsilon$, то йти до кроку 6.
- Крок 5. $x_k = x_{k+1}$, йти до кроку 3.
- Крок 6. Друк результатів x, y .

Перетворення до виду $x = \varphi(x)$ можна здійснювати різними способами, але існує небезпека того, що ітераційний процес не сходиться.

Наприклад: помножимо праву і ліву частини рівності $f'(x) = 0$ на λ і додамо x , отримаємо

$$\begin{aligned} x + \lambda \cdot f'(x) &= x \\ x &= x - \lambda \cdot f'(x) \end{aligned}$$

позначивши $x - \lambda \cdot f'(x) = \varphi(x)$, приходимо до залежності $x = \varphi(x)$.

Для підвищення збіжності параметр λ розраховують на кожній ітерації

$$\lambda = \alpha / f''(x_k), \text{ де зазвичай } \alpha = 3 - \sqrt{5}.$$

Метод Стеффенсена-Ейткена

Метод є різновидом методу ітерацій. Ітераційна схема методу Стеффенсена-Ейткена складається з послідовності операцій.

Алгоритм методу.

Крок 1. Задаються початковими значеннями a, b і необхідною точністю розрахунків ε .

Крок 2. $x_0 = (a + b)/2$.

Крок 3. Розраховують параметр λ і два подальших значення аргументу

$$\lambda = (3 - \sqrt{5}) / f''(x_0);$$

$$x_1 = x_0 - \lambda \cdot f'(x_0);$$

$$x_2 = x_1 - \lambda \cdot f'(x_1).$$

Крок 4. Якщо $x_2 - 2 \cdot x_1 + x_0 = 0$, йти до кроку 8.

Крок 5. Обчислити $x_3 = x_0 - \frac{(x_1 - x_0)^2}{x_2 - 2 \cdot x_1 + x_0}$.

Крок 6. Якщо $|x_3 - x_0| < \varepsilon$, йти до кроку 9.

Крок 7. Привласнити $x_0 = x_3$ і йти до кроку 3.

Крок 8. $x = x_1, y = f(x)$, йти до кроку 10.

Крок 9. $x = x_3, y = f(x)$.

Крок 10. Друк результатів x, y .

2.7 Метод пошуку з використанням кубічної апроксимації

У даному методі що підлягає мінімізації функція $f(x)$ апроксимується поліномом третього порядку. Логічна схема методу аналогічна схемі методу з використанням квадратичної апроксимації. Проте в даному випадку побудова апроксимуючого полінома проводиться на основі меншого числа крапок, оскільки в кожній точці виробляють обчислення значень, як функції, так і її похідної.

На першому кроці вибираються дві точки x_1 і x_2 так, щоб похідні в них мали різні знаки. Далі в інтервалі від x_1 до x_2 апроксимуємо досліджувану функцію кубічним поліномом

$$p(x) = a_0 + a_1 \cdot (x - x_1) + a_2 \cdot (x - x_1)(x - x_2) + a_3 \cdot (x - x_1)^2(x - x_2)$$

Константи полінома a_0, a_1, a_2, a_3 підбираються так, щоб значення $p(x)$ і її похідної в точках x_1 і x_2 збігалися із значеннями функції, що мінімізувалася, і її похідної в цих же точках.

Перша похідна функції $p(x)$

$$\frac{dp(x)}{dx} = a_1 + a_2 \cdot (x - x_1) + a_2 \cdot (x - x_2) + a_3 \cdot (x - x_1)^2 + 2 \cdot a_3 \cdot (x - x_1)(x - x_2)$$

Прирівнювання до нуля даного рівняння дозволить визначити координату мінімуму функції, що наводить до вирішення квадратного рівняння. Коріння даного рівняння визначиться таким чином:

1) $x^* = x_2$, якщо $\mu < 0$;

2) $x^* = x_2 - \mu \cdot (x_2 - x_1)$, якщо $0 \leq \mu \leq 1$;

3) $x^* = x_1$, якщо $\mu > 1$;

де

$$\mu = \frac{f'(x_2) + \omega - z}{f'(x_2) - f'(x_1) + 2 \cdot \omega};$$
$$z = \left(\frac{3 \cdot [f(x_1) - f(x_2)]}{x_2 - x_1} \right) + f'(x_1) + f'(x_2),$$

якщо $x_1 < x_2$, $\omega = \sqrt{z^2 - f'(x_1) \cdot f'(x_2)}$;

якщо $x_1 > x_2$, $\omega = -\sqrt{z^2 - f'(x_1) \cdot f'(x_2)}$.

Після визначення x^* з трьох крапок x_1 , x_2 і x^* вибирають дві, так, щоб значення похідної досліджуваної функції в цих двох точках мали протилежні знаки, і процедура пошуку продовжується.

Алгоритм методу.

Крок 1. Задається точність розрахунків $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ і крок зміни аргументу Δ .

Крок 2. Задається початкове значення аргументу x_0 , обчислюється значення похідної функції, що мінімізується, в даній точці $f'(x_0)$. Визначаються n значень аргументів по формулі $x_k = x_{k-1} + \Delta$, $k = 1, n$ і значення похідної досліджуваної функції в даних точках до тих пір, поки не виконається умова $f'(x_{k-1}) \cdot f'(x_k) < 0$.

Крок 3. Привласнюємо $x_1 = x_{k-1}$, $x_2 = x_k$, $f'(x_1) = f'(x_{k-1})$, $f'(x_2) = f'(x_k)$.

Крок 4. Визначається значення функції в точках x_1 і x_2 - $f(x_1), f(x_2)$.

Крок 5. Визначаються параметри ω, z, μ .

Крок 6. Якщо $\mu < 0$, $x^* = x_2$;

якщо $0 \leq \mu \leq 1$, $x^* = x_2 - \mu \cdot (x_2 - x_1)$;

якщо $\mu > 1$, $x^* = x_1$.

Крок 7. Визначають значення функції в знайдений точці $f(x^*)$, а також значення її похідної $f'(x^*)$.

Крок 8. Виробляють порівняння $f(x^*) < f(x_1)$. Якщо умова виконується, йти до пункту 10.

Крок 9. Інакше обчислюють нове значення $x^* = x^* + 0,5 \cdot (x^* - x_1)$ до тих пір, поки не виконається умова $f(x^*) < f(x_1)$.

Крок 10. Виробляють перевірку на закінчення пошуку

$$|f'(x^*)| \leq \varepsilon_1, |(x^* - x_1) / x^*| \leq \varepsilon_2$$

Якщо обое умови виконуються, пошук завершити.

Крок 11. Інакше визначити нові значення x_1 і x_2 таким чином:

- якщо $f'(x^*) \cdot f'(x_1) < 0$, привласнити $x_1 = x^*$, $x_2 = x_1$;

- якщо $f'(x^*) \cdot f'(x_2) < 0$, привласнити $x_1 = x^*$, значення x_2 залишається тим самим.

Крок 12. Визначити значення функції і її першої похідної в знов знайдених точках x_1 і x_2 , після чого йти до пункту 5.

У разі, коли багатократне обчислення похідної не складає труднощів, метод пошуку з використанням кубічної апроксимації виявляється ефективнішим в порівнянні зі всіма розглянутими вище методами.

2.8 Порівняння методів

Якщо виробити порівняння всіх методів одновимірної оптимізації, то можна укласти, що методи оптимізації з використанням квадратичної і кубічної апроксимації істотно ефективніше методів виключення інтервалів. Так, вживання схеми з використанням квадратичної апроксимації дозволяє досягти суперлінійної швидкості збіжності

$$|x_{k+1} - x^*| \leq q_k |x_k - x^*|^\alpha,$$

де $\alpha = 1,3$; тоді як метод золотого перетину, що є найбільш ефективним методом виключення інтервалів, має лінійну швидкість збіжності

$$|x_{k+1} - x^*| \leq q |x_k - x^*|$$

Це означає, що у разі, коли інтервали збіжності порівнянні між собою, а досліджувана функція є досить гладкою і унімодальною, метод, заснований на квадратичній апроксимації, сходиться швидше, ніж будь-який з методів виключення інтервалів. Також якщо необхідно отримати вирішення з дуже високою мірою точності, то кращими виявляються методи пошуку на основі поліноміальної апроксимації. Проте, якщо досліджувана функція є мультимодальною або швидкозмінюючою, то поліноміальні методи сходяться набагато повільніше, ніж методи виключення інтервалів. У таких випадках для надійної роботи алгоритму доцільно використовувати метод золотого перетину.

2.9 Функції декількох змінних. Пошук оптимуму

Задана скалярна цільова функція n -змінних $f(x)$, $x \in R^n$ - вектор керованих змінних розмірності n .

Ставиться задача оптимізації цільової функції, причому якщо функція опукла, то це наводить до знаходження глобального мінімуму, якщо властивість опуклості не виконується, тобто функція має декілька мінімумів, задача оптимізації ускладнюється.

Введемо критерії оптимальності, що дозволяють серед ряду крапок виділяти точки оптимуму досліджуваної функції.

За визначенням в усіх точках з околиці точки мінімуму цільова функція набуває значень, які перевищують мінімальне, тобто має місце нерівність

$$\Delta f = f(x) - f(x^*) \geq 0$$

Точка x^* є точкою глобального мінімуму, якщо дана нерівність виконується для всіх $x \in R^n$;

якщо дана нерівність виконується лише в деякій δ - околиці точки x^* , то x^* є точка локального мінімуму;

якщо з нерівності виключити знак рівності, то x^* - точка строгого мінімуму.

Розглянемо необхідні і достатні умови існування мінімуму функції.

Необхідні умови:

Для наявності в точці x^* локального мінімуму необхідно, аби виконувалася нерівність

$$\nabla f(x^*) = 0,$$

де $\nabla f(x^*)$ - вектор - стовпець перших похідних цільової функції в даній точці;

$\nabla^2 f(x^*)$ - матриця других похідних (позитивно напіввизначена).

Достатні умови:

Якщо $\nabla f(x^*) = 0$ і матриця $\nabla^2 f(x^*)$ - позитивно визначена, то точка x^* є точкою строгого мінімуму цільової функції.

Методи, орієнтовані на вирішення задач оптимізації функції декілька змінних, можна розділити на три класи відповідно до типу досліджуваної при їх реалізації інформації:

1. Методи прямого пошуку, засновані на обчисленні лише значень цільової функції.
2. Градієнтні методи, в яких використовуються точні значення перших похідних цільової функції.
3. Методи другого порядку, в яких разом з першими похідними використовуються також другі похідні функції $f(x)$.

2.10 Методи прямого пошуку

Багатовимірні методи прямого пошуку можна розділити на евристичних і теоретичних.

Евристичні реалізують процедуру пошуку за допомогою інтуїтивних геометричних вистав і забезпечують здобуття приватних емпіричних результатів. Теоретичні методи засновані на фундаментальних математичних теоремах і при виконанні певних умов володіють високою збіжністю.

Простий підхід до вирішення багатовимірних задач полягає в тому, що пошук ведеться на основі перебору напрямів з довільно заданої безлічі. Для того, щоб гарантувати можливість проведення пошуку всієї даної області доцільно накласти вимогу лінійної незалежності напрямів пошуку, які повинні утворити базис допустимої області визначення $f(x)$. Наприклад, не можна вести пошук оптимуму функції три змінних з використанням двох напрямів пошуку. Звідси витікає, що всі дані методи прямого пошуку використовують, щонайменше, N незалежних напрямів пошуку, де N - розмірність вектора x .

Елементарним прикладом методу з перебором на безлічі напрямів пошуку є метод циклічної зміни змінних, відповідно до якої кожного разу міняється лише одна змінна. При такому підході безліч напрямів пошуку вибирається у виді безлічі напрямів в просторі керованих змінних задачі. Потім уздовж кожного з координатних напрямів в просторі керованих змінних задачі. Потім уздовж кожного з координатних напрямів послідовно проводиться пошук точки оптимуму на основі методів вирішення задач оптимізації з однією змінною. Такі методи називають методами координатного спуску.

Методи полягають в почерговому пошуку мінімуму по координаті x_1 , потім x_2 і т.д. Після знаходження точки мінімуму по координаті x_1 переходимо до знаходження точки мінімуму по координаті x_2 і т.д. Пошук ведеться з однаковим кроком, який зменшується після знаходження всіх значень $\tilde{x}_{1m}, \tilde{x}_{2m}, \dots, \tilde{x}_{nm}$. В порівнянні з алгоритмом рішення одновимірної задачі для багатовимірної алгоритм лише доповнюється циклом задачі змінних x_1, x_2, \dots, x_n , усередині якого оцінюється погрішність знаходження x_{im} для кожної змінної.

Для прикладу розглянемо алгоритм методу координатного спуску з порозрядним наближенням.

Алгоритм методу.

Крок 1. Задати початкове наближення $x(N)$, де N - число змінних; початковий крок пошуку H , точність розрахунків ε , параметр $P = H$.

Крок 2. $i = 0$.

Крок 3. $i = i + 1$, якщо $i > N$, йти до кроку 8.

Крок 4. $B = 10^{20}$.

Крок 5. $x(i) = x(i) + H$, $C = B$, $B = f[x(i)]$.

Крок 6. Якщо $B - C > 0$, йти до кроку 5. Інакше $H = -H/4$, йти до кроку 7.

Крок 7. Якщо $|H| \geq |P/4|$, йти до кроку 5. Інакше $H = P$, йти до кроку 3.

Крок 8. $P = P/16$, $H = P$, якщо $16 \cdot P > \varepsilon$, йти до кроку 2.

Крок 9. Друк результатів розрахунку.

Відповідно до приведеного алгоритму ведеться одновимірний пошук по i -й координаті з кроком пошуку H (до тих пір, поки нове значення функції B не стане більше старого C (див. кроки 5 і 6). Потім крок H зменшується в 4 рази, і пошук ведеться в протилежному напрямі. Наступна зміна напрямку пошуку не виробляється, оскільки «спрацьовує» умова $|H| \geq |P/4|$ (крок 7). В цьому випадку здійснюється перехід на наступну координату $i = i + 1$ (крок 3) і проводиться аналогічний пошук в прямому і зворотному напрямі з кроками H і $-H/4$ відповідно. Потім здійснюється перехід на наступну координату. Після перебору всіх координат крок пошуку і параметр P зменшуються в 16 разів і процедуру повторюється. Пошук ведеться до тих пір, поки крок не стане менший ε - заданій точності розрахунків.

Метод пошуку по симплексу

Даний метод відноситься до категорії евристичних і ґрунтується на припущенні, що експериментальним зразком, що містить найменшу кількість крапок, є регулярний симплекс.

Регулярний симплекс в N - мірному просторі є многогранником, утвореним $N + 1$ рівностоячими один від одного точками - вершинами. Наприклад, в разі двох змінних симплексом є рівносторонній трикутник. У тривимірному просторі симплексом є тетраедр.

Визначається вершина симплексу, в якій значення функції є найбільшим. Ця вершина відбивається відносно центру тяжіння останніх вершин симплексу.

Отримувана точка є вершиною нового симплексу, а відбита вершина виключається.

Суть методу.

1. Будується регулярний симплекс в просторі незалежних змінних.

Побудова виробляється таким чином. Задається початкова точка $x^{(0)}$ і масштабний множник α . Координати останніх вершин симплексу в N - мірному просторі обчислюються за формулою

$$x_j^{(i)} = \begin{cases} x_j^{(0)} + \delta_1, & j \neq i \\ x_j^{(0)} + \delta_2, & j = i \end{cases}$$

де i - номер точки симплексу; $i = 1, 2, \dots, N$;

j - координата точки i ; $j = 1, 2, \dots, N$.

Прирости δ_1 і δ_2 , залежні лише від N і вибраного масштабного множника α , визначаються по формулах

$$\delta_1 = \left[\frac{(N+1)^{1/2} + N - 1}{N \cdot \sqrt{2}} \right] \cdot \alpha$$

$$\delta_2 = \left[\frac{(N+1)^{1/2} - 1}{N \cdot \sqrt{2}} \right] \cdot \alpha$$

Величина масштабного множника α вибирається дослідником, виходячи з характеристик вирішуваної задачі. При $\alpha = 1,0$ ребра регулярного симплексу мають одиничну довжину.

2. Оцінюються значення цільової функції в кожній з вершин симплексу, і визначається вершина, в якій це значення найбільше.

3. Знайдена вершина проектується через центр тяжіння останніх вершин симплексу в точку - вершину нового симплексу. Виробляється це таким чином.

Хай $x^{(k)}$ - точка, що підлягає віддзеркаленню. Центр тяжіння останніх N крапок розташований в точці

$$x_C = \frac{1}{N} \cdot \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^N x^{(i)}$$

Всі точки прямої, проходячи через $x^{(k)}$ і x_C , задаються формулою

$$x = x^{(k)} + \lambda \cdot (x_C - x^{(k)})$$

Для того, щоб побудований симплекс володів властивістю регулярності, віддзеркалення має бути симетричним. Отже, нова вершина виходить при $\lambda = 2$. Таким чином

$$x_{\text{нов}}^{(k)} = 2 \cdot x_C - x_{\text{пред}}^{(k)}$$

Ітерації продовжуються до тих пір, поки або не буде накрыта точка мінімуму, або не почнеться циклічний рух по двох або більш симплексу. У цих випадках користуються наступними правилами.

Правило 1. Накриття точки мінімуму.

Якщо вершина, якою відповідає найбільше значення цільової функції, побудована на попередній ітерації, то замість неї береться вершина, якою відповідає наступне по величині значення цільової функції.

Правило 2. Циклічний рух.

Якщо деяка вершина симплексу не виключається впродовж більш ніж M ітерацій, то необхідно зменшити розміри симплексу за допомогою коефіцієнта редуції і

побудувати новий симплекс, вибравши як базової точку, якою відповідає мінімальне значення цільової функції. Параметр M обчислюється за формулою

$$M = 1,65 \cdot N + 0,05 \cdot N^2,$$

де N - розмірність задачі, а M округляється до найближчого цілого числа.

Правило 3. Критерій закінчення пошуку.

Пошук завершується, коли або розміри симплексу, або різниці між значеннями функції у вершинах стають досить малими. Необхідно задати величину параметра закінчення пошуку.

Покроковий алгоритм методу пошуку по симплексу для функції два змінних.

Алгоритм методу.

Крок 1. Задача початкової точки $x(0) = [x_1(0); x_2(0)]^T$, коефіцієнта редукції m , масштабний множник α , параметр закінчення пошуку ε .

Крок 2. Приймаємо $Z^{(1)} = Z^{(2)} = Z^{(3)} = Z^{(4)} = Z^{(5)} = 0$; $Z^{(k)} = [Z_1^{(k)}, Z_2^{(k)}]^T$.
Розраховуємо $\delta_1 = 1,9318 \cdot \alpha$; $\delta_2 = 0,5176 \cdot \alpha$.

Будуємо регулярний симплекс

$$\begin{aligned} x_1^{(1)} &= x_1^{(0)} + \delta_2; & x_1^{(2)} &= x_1^{(0)} + \delta_1; \\ x_2^{(1)} &= x_2^{(0)} + \delta_1; & x_2^{(2)} &= x_2^{(0)} + \delta_2. \end{aligned}$$

Крок 3. Розрахунок $f(x^{(0)})$, $f(x^{(1)})$, $f(x^{(2)})$.

Крок 4. Зміна нумерації крапок і розставлення їх в порядку убавання функції:

$$f(x^{(0)}) \geq f(x^{(1)}) \geq f(x^{(2)}),$$

(див. підпрограму MAX).

Крок 5. Віддзеркалення точки $x^{(0)}$

$$\begin{aligned} x_1^{(3)} &= x_1^{(1)} + x_1^{(2)} - x_1^{(0)} \\ x_2^{(3)} &= x_2^{(1)} + x_2^{(2)} - x_2^{(0)} \end{aligned}$$

Переприсвоюємо $x_1^{(0)} = x_1^{(3)}$, $x_2^{(0)} = x_2^{(3)}$.

Розрахунок $f(x^{(0)})$.

Крок 6. Перевірка умови циклічного руху ($M = 5$).

Переприсвоюємо

$$\begin{aligned} Z_1^{(1)} &= Z_1^{(2)}, & Z_2^{(1)} &= Z_2^{(2)}; \\ Z_1^{(2)} &= Z_1^{(3)}, & Z_2^{(2)} &= Z_2^{(3)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_1^{(3)} &= Z_1^{(4)}, & Z_2^{(3)} &= Z_2^{(4)}; \\ Z_1^{(4)} &= Z_1^{(5)}, & Z_2^{(4)} &= Z_2^{(5)}; \\ Z_1^{(5)} &= Z_1^{(2)}, & Z_2^{(5)} &= Z_2^{(2)}. \end{aligned}$$

Якщо $x_1^{(2)} = Z_1^{(1)}$, $x_2^{(2)} = Z_2^{(1)}$, то $\alpha = \alpha/m$, йти до кроку 2. Інакше перейти до кроку 7.

Крок 7. Перевірка умови закінчення пошуку.

Якщо $\|x^{(1)} - x^{(0)}\| < \varepsilon$, йти до кроку 9. Інакше перейти до кроку 8.

Крок 8. Перевірка умови накриття точки мінімуму.

Якщо $f(x^{(0)}) > f(x^{(1)})$, то пере присвоїло $x^{(0)} = x^{(1)}$, $x^{(1)} = x^{(0)}$, йти до кроку 5. інакше перейти до кроку 4.

Крок 9. Друк результатів розрахунку x , $f(x)$, де $x = \frac{x^{(0)} + x^{(1)} + x^{(2)}}{3}$.

Підпрограма MAX для зміни нумерації крапок і розставлення в порядку убавання функції.

```
DO 1 I=2, 3
DO 1 J=3, I, -1
IF (F(J-1).GT.F(J)) GOTO 1
FF=F(J)
F(J)=F(J-1)
F(J-1)= FF
1 CONTINUE
```

Алгоритм модифікованого методу аналогічний розглянутому вище алгоритму. Відмінність полягає в тому, що в модифікованому методі немає необхідності перевіряти умову циклічного руху. Недоліком модифікованого методу небезпека сплюснення симплексу, коли всі три точки симплексу (для двовимірної задачі) розташовуються на одній прямій. Для цього випадку в алгоритмі необхідно передбачити побудову нового симплексу.

Метод пошуку Хука-Джівса

Даний метод дозволяє удосконалити стратегію методу пошуку по симплексу шляхом введення безлічі векторів, задаючих напрям пошуку. Простий підхід полягає в тому, що пошук ведеться на підставі рекурсивного перебору напрямлень з довільно заданої безлічі. Для того, щоб гарантувати можливість проведення пошуку всієї даної області, кількість незалежних напрямів пошуку приймає рівним розмірності цільової функції.

Процедура методу Хука-Джівса є комбінацією «досліджуючого» пошуку з циклічною зміною змінних і пошуку, що прискорюється, за зразком з використанням певних евристичних правил.

Досліджуючий пошук орієнтований на виявлення характеру локальної поведінки цільової функції. Отримана в результаті досліджуючого пошуку інформація використовується потім в процесі пошуку за зразком.

Розглянемо кожен з них.

Досліджуючий пошук.

Задаємося величиною кроку, яка може бути різною для різних координатних напрямів і змінюється в процесі пошуку. Якщо значення цільової функції в пробній точці не перевищує значення функції у вихідній точці, то крок пошуку вважається успішним. Інакше необхідно повернутися в попередню точку, і зробити крок в протилежному напрямі з подальшою перевіркою значення цільової функції. Після перебору всіх N координат досліджуючий пошук завершується. Отриману в результаті точку називають базовою точкою.

Пошук за зразком.

Полягає в реалізації єдиного кроку з отриманої базової точки уподовж прямою, сполучаючою цю точку з попередньою базовою точкою. Нова точка зразка визначається відповідно до формули

$$x_p^{(k+1)} = x^{(k)} + (x^{(k)} - x^{(k-1)})$$

З отриманої точки $x_p^{(k+1)}$ знов проводимо досліджуючий пошук. Якщо в результаті виходить точка з меншим значенням цільової функції, чим в точці $x^{(k)}$, то вона розглядається як нова базова точка $x^{(k+1)}$. Інакше зменшуємо крок і знов проводимо досліджуючий пошук з точки $x^{(k)}$. Пошук завершується, коли величина кроку досить мала.

Алгоритм методу.

Крок 1. Задати початкову точку $x^{(0)}$ приросту $\Delta_i (i = 1, 2, \dots, N)$, коефіцієнт зменшення кроку $\alpha > 1,0$, параметр закінчення пошуку ε .

Крок 2. Провести досліджуючий пошук. Як приклад розглянемо послідовність операцій досліджуючого пошуку для двомірної задачі:

1. Чи був крок по координаті x_1 вдалим, тобто $f(x^{(0)}) > f(x^{(0)} + \Delta_1)$?

Так: привласнити $Z = x^{(0)} + \Delta_1$, йти до 3.

Ні: продовжувати.

2. Чи є крок в протилежному напрямі вдалим, тобто $f(x^{(0)} - \Delta_1) < f(x^{(0)})$?

Так: привласнити $Z = x^{(0)} - \Delta_1$, йти до 3.

Ні: привласнити $Z = x^{(0)}$, продовжити.

3. Чи був крок по координаті x_2 вдалим, тобто $f(Z + \Delta_2) < f(Z)$?

Так: привласнити $x^{(1)} = Z + \Delta_2$, йти до кроку 3.

Ні: продовжити.

4. Чи є крок в протилежному напрямі вдалим, тобто $f(Z - \Delta_2) < f(Z)$?

Так: привласнити $x^{(1)} = Z - \Delta_2$, йти до кроку 3.

Ні: привласнити $x^{(1)} = Z$, йти до кроку 3.

Крок 3. Чи був досліджуваний пошук вдалим, тобто $f(x^{(1)}) < f(x^{(0)})$?

Так: перейти до кроку 5.

Ні: продовжити.

Крок 4. Перевірка на закінчення пошуку. Чи виконується нерівність $\|\Delta x\| < \varepsilon$?

Так: припинити пошук, поточна точка апроксимує точку оптимуму x^* .

Ні: зменшити прирости по формулі $\Delta_i = \Delta_i / \alpha$, $i = 1, 2, \dots, N$.

Крок 5. Провести пошук за зразком

$$x_p^{(k+1)} = x^{(k)} + (x^{(k)} - x^{(k-1)}).$$

Крок 6. Провести досліджуваний пошук, використовуючи $x_p^{(k+1)}$ як базову точку, хай $x^{(k+1)}$ - отримана в результаті точка.

Крок 7. Чи виконується нерівність $f(x^{(k+1)}) < f(x^{(k)})$?

Так: прийняти $x^{(k-1)} = x^{(k)}$, $x^{(k)} = x^{(k+1)}$. Перейти до кроку 5.

Ні: перейти до кроку 4.

Модифікована процедура методу Хука-Джівса дозволяє повністю використовувати можливості пошуку уподовж прямою, визначеною зразком за умови вдалого руху за зразком, що дозволяє істотно підвищити збіжність алгоритму.

У алгоритмі, приведеному, вище ця модифікація реалізується повторенням кроку 5, до тих пір, поки пошук за зразком буде невдалим.

...

Крок 5. Виробити пошук за зразком:

$$x_p^{k+1} = x^k + (x^k - x^{k-1}). \text{ Привласнюємо } x^{k+1} = x_p^{k+1}.$$

Крок 6. Якщо $f(x^{k+1}) < f(x^k)$, привласнюємо $x^k = x^{k+1}$, $x^{k-1} = x^k$, йти до пункту 5.

Крок 7. Якщо умова не виконується, виробити досліджуваний пошук, причому як базову вибрати точку x^k .

2.11 Градієнтні методи

При використанні прямих методів для здобуття рішення інколи потрібна надзвичайно велика кількість обчислень значень функції. По-друге, необхідною умовою наявності в точці x^* локального мінімуму є виконання рівності

$$\nabla f(x^*) = 0,$$

де ∇f - градієнт цільової функції

$$\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right]^T$$

Все це наводить до необхідності розгляду методів, заснованих на використанні градієнта цільової функції. Вказані методи носять ітераційний характер, оскільки компоненти градієнта виявляються нелінійними функціями керованих змінних.

Передбачається, що $f(x)$, $\nabla f(x)$ і $\nabla^2 f(x)$ існують і безперервні. Всі описувані методи засновані на ітераційній процедурі, що реалізовується відповідно до формули

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha^{(k)} \cdot S(x^{(k)}),$$

де $x^{(k)}$ - поточне наближення до рішення x^* ;

$\alpha^{(k)}$ - параметр, що характеризує довжину кроку;

$S(x^{(k)})$ - напрям пошуку в N - мірному просторі керованих змінних.

Спосіб знаходження $S(x)$, α визначає метод.

Метод Коши (найшорішого спуску)

У зв'язку з тим, що локальна зміна цільовій функції в околиці деякої точки x визначається першої похідної даної функції, то як напрям пошуку вибирається антиградієнт $[-\nabla f(x)]$ - напрям найбільшого убуття функції.

У основі простого градієнтного методу лежить формула

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \alpha \cdot \nabla f(x^{(k)}),$$

де α - заданий позитивний параметр.

В такого методу два недоліки: 1) необхідно підбирати відповідне α ; 2) повільно сходиться, оскільки ∇f - мало в околиці точки мінімуму.

Тому доцільно визначати α на кожній ітерації

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \alpha^{(k)} \cdot \nabla f(x^{(k)})$$

У методі Коши значення $\alpha^{(k)}$ обчислюється шляхом рішення задачі мінімізації $f(x^{(k+1)})$ уздовж напрямку $\nabla f(x^{(k)})$ за допомогою того або іншого методу одновимірного пошуку.

Метод дуже надійний, але швидкість збіжності низька, оскільки зміни змінних безпосередньо залежать від величини градієнта, яка прагне до нуля в околиці точки мінімуму.

Головна перевага методу - його стійкість, оскільки завжди забезпечується умова $f(x^{(k+1)}) \leq f(x^{(k)})$.

Алгоритм методу.

Перед реалізацією алгоритму необхідно розробити три підпрограми: для розрахунку функції FCT і для розрахунку двох компонентів градієнта $GRAD1$ і $GRAD2$.

Крок 1. Задаємо початкове наближення $x^{(0)}$ (для двомірної задачі - дві координати $x_1^{(0)}$ і $x_2^{(0)}$), і параметр закінчення рахунку ε .

Крок 2. Використовуючи підпрограми *GRAD1* і *GRAD2* знаходимо значення компонентів градієнта

$$S_1^{(k)} = \frac{\partial f(x_1^{(k)}, x_2^{(k)})}{\partial x_1}, \quad S_2^{(k)} = \frac{\partial f(x_1^{(k)}, x_2^{(k)})}{\partial x_2}$$

Крок 3. Виконати перевірку по критерію закінчення ітераційного процесу. Якщо $\sqrt{(S_1^{(k)})^2 + (S_2^{(k)})^2} < \varepsilon$, йти до кроку 6. інакше перейти до кроку 4.

Визначити оптимальне значення $\alpha^{(k)}$ з умови $f(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}) \rightarrow \min$.

Для цього підставимо замість $x_1^{(k+1)}$ і $x_2^{(k+1)}$ вирази, отримані з основної формули методу Коши:

$$x_1^{(k+1)} = x_1^{(k)} - \alpha \cdot S_1^{(k)}$$

$$x_2^{(k+1)} = x_2^{(k)} - \alpha \cdot S_2^{(k)}$$

Оскільки числові значення $x_1^{(k)}$, $x_2^{(k)}$, $S_1^{(k)}$, $S_2^{(k)}$ визначені раніше, то отримуємо однопараметричну функцію

$$f(\alpha) = f(x_1^{(k)} - \alpha \cdot S_1^{(k)}, x_2^{(k)} - \alpha \cdot S_2^{(k)}),$$

яку оптимізуємо по параметру α з використанням якого-небудь одновимірного методу оптимізації. В результаті визначаємо α_{opt} .

Крок 5. Розрахувати нові значення

$$x_1^{(k+1)} = x_1^{(k)} - \alpha_{opt} \cdot S_1^{(k)}$$

$$x_2^{(k+1)} = x_2^{(k)} - \alpha_{opt} \cdot S_2^{(k)}$$

Йти до кроку 2.

Крок 6. Друк результатів $x_1^{(k)}$, $x_2^{(k)}$, $f(x_1^{(k)}, x_2^{(k)})$.

Метод Ньютона

Стратегія пошуку, використовувана в методі Коши, реалізовує рух в напрямі, протилежному до градієнта, ґрунтується на послідовній лінійній апроксимації цільової функції і вимагає обчислення значень функції і її першої похідної на кожній ітерації. Для того, щоб побудувати загальнішу стратегію пошуку, використовуємо інформацію про другі похідні. З розкладання цільової функції в ряд Тейлора можна отримати формулу

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \nabla^2 f(x^{(k)})^{-1} \cdot \nabla f(x^{(k)})$$

де для двомірної задачі

$$\nabla f(x) = \left[\frac{\partial f(x_1, x_2)}{\partial x_1}, \frac{\partial f(x_1, x_2)}{\partial x_2} \right]^T,$$

$$\nabla^2 f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} \\ \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_2^2} \end{bmatrix}^T \text{ - матриця Гессе.}$$

$\nabla^2 f(x)^{-1}$ - матриця, зворотна матриці Гессе.

Для здобуття зворотної матриці другого порядку можна скористатися формулою

$$A^{-1} = \frac{1}{\det} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

де \det - головний визначник матриці A ;

A_{ij} - арифметичне доповнення, рівне мінору, помноженому на $(-1)^{i+j}$.

В результаті отримаємо

$$\nabla^2 f(x)^{-1} = \frac{1}{\det} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_2^2} & -\frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_2 \partial x_1} \\ -\frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} \end{bmatrix}^T$$

$$\det = \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} \cdot \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_2^2} - \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} \cdot \frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_2 \partial x_1}$$

Алгоритм методу Ньютона для функції два змінних. Перед реалізацією алгоритму має бути розроблені сім підпрограм:

1. *FCT* - для розрахунку функції $f(x_1, x_2)$.

2-3. - для розрахунку компонентів градієнта

$$F1 = \frac{\partial f}{\partial x_1}; \quad F2 = \frac{\partial f}{\partial x_2}$$

4-7. - для розрахунку компонентів матриці Гессе

$$F11 = \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}; \quad F12 = \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}$$

$$F21 = \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}; \quad F22 = \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2}$$

Крок 1. Задаємо початкове наближення $x^{(0)}$ (дві координати $x_1^{(0)}$ і $x_2^{(0)}$) і параметр закінчення рахунку ε , $k = 0$.

Крок 2. Використовуючи підпрограми, розраховуємо чисельні значення компонентів градієнта матриці Гессе, використовуючи правила перемножування матриць

$$x_1^{(k+1)} = x_1^{(k)} - \frac{1}{\det} \cdot [F_{22} \cdot F_1 + (-F_{21}) \cdot F_2]$$

$$x_2^{(k+1)} = x_2^{(k)} - \frac{1}{\det} \cdot [(-F_{12}) \cdot F_1 + F_{11} \cdot F_2]$$

Крок 3. Виконати перевірку по критерію закінчення рахунку.

Якщо $\sqrt{F_1^2 + F_2^2} < \varepsilon$, йти до кроку 5. Інакше перейти до кроку 4.

Крок 4. Переприсвоїти $x_1^{(k)} = x_1^{(k+1)}$, $x_2^{(k)} = x_2^{(k+1)}$. Йти до кроку 2.

Крок 5. Розрахувати $f(x_1^{(k+1)})$ по підпрограмі FCT. Друк результатів розрахунку $x_1^{(k+1)}$, $x_2^{(k+1)}$, $f(x_1^{(k+1)})$, k .

При дослідженні не квадратичних функцій метод Ньютона не відрізняється високою надійністю. Це пов'язано з тим фактом, що в разі значного віддалення точки x_0 від точки x^* , крок по методу Ньютона часто виявляється надмірно великим, що може привести до відсутності збіжності. В цьому випадку метод можна модифікувати, забезпечивши зменшення цільової функції від ітерацій до ітерації і здійснивши пошук, як в методі Коши. Послідовність ітерацій будується відповідно до формули

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \alpha^{(k)} \cdot \nabla^2 f(x^{(k)})^{-1} \cdot \nabla f(x^{(k)})$$

Вибір $\alpha^{(k)}$ здійснюється з умови $f(x^{(k+1)}) \rightarrow \min$.

Це гарантує виконання нерівності $f(x^{(k+1)}) \leq f(x^{(k)})$.

Алгоритм модифікованого методу аналогічний алгоритму звичайного методу Ньютона, лише доповнюється розрахунком $\alpha^{(k)}$ (див. крок 4 методи Коши), який виконується між першим і другим кроком. Розрахунок нових значень координат $x^{(k+1)}$ виробляється по формулах

$$x_1^{(k+1)} = x_1^{(k)} - \frac{\alpha^{(k)}}{\det} \cdot [F_{22} \cdot F_1 + (-F_{21}) \cdot F_2]$$

$$x_2^{(k+1)} = x_2^{(k)} - \frac{\alpha^{(k)}}{\det} \cdot [(-F_{12}) \cdot F_1 + F_{11} \cdot F_2]$$

Якщо обчислення перших і других похідних не зв'язані з великими труднощами, метод виявляється надійним і ефективним.

3 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИПРОБУВАНЬ

Серед основних подій життєвого циклу апаратів теплотехнології (як об'єкту дослідження) займають випробування. В процесі виробництва апаратів теплотехнології проводиться велика кількість різних по складності випробувань, починаючи з найпростіших - контрольних, потім лабораторних, стендових і нарешті до найскладніших - виробничих.

У міру підвищення вимог до характеристик апаратів і пов'язаного з цим їх технічного ускладнення роль випробувань ставати усе більш значною. При цьому вартість випробувань і тривалість проведення стають такими, що визначають в загальних витратах і термінах. Тому вирішення основної проблеми скорочення термінів створення і вартості розробки апаратів теплотехнології зводиться в основному до раціональної організації процесу її експериментального відробітку. Для вирішення цієї задачі необхідно проводити оптимальне планування випробувань.

В даний час можна з певною мірою упевненості говорити, що розроблені і існують теоретичні основи оптимального проектування технічних систем, що дозволяють вибирати найкращі конструктивні параметри, закони управління і інші характеристики систем. Але, на жаль, ще відсутня прийнята теорія випробувань, що дозволяє оптимізувати ці вельми важливі етапи життєвого циклу теплотехнічної системи.

Питання про створення найближчими роками теорії випробувань складних теплотехнічних систем є проблематичним. Випробування в цілому є вельми складним процесом, що характеризується величезною різноманітністю вирішуваних задач, багаторівневих етапів випробувань, неоднорідністю інформаційних потоків, циркулюючих в самій системі випробувань, різноманіттям оцінюваних характеристик і т.д.

Сенс випробувань зводиться до того, що визначаються конкретні задачі, які вирішуються з використанням інформації, отриманої в процесі проведення випробувань. Такими задачами можуть бути доопрацювання системи, уточнення її математичної моделі, контроль стану, діагностика, оцінка характеристик надійності і так далі. Тому можна говорити про випробування, пов'язані з доопрацюванням системи і уточненням її математичної моделі, про випробування в цілях контролю і т.п.

Основна мета випробувань полягає в здобутті інформації про стан випробовуваного апарату. Ця інформація надалі може використовуватися для вирішення самих різних задач.

У будь-якому випробуванні можна виділити наступні чотири фази:

- 1) планування випробування;
- 2) його проведення;
- 3) обробка результатів випробувань;
- 4) аналіз отриманих результатів і виробітку рішення.

Планування є найважливішим етапом виконання будь-яких робіт і дій. В результаті планування має бути отримана відповідь на питання: що, коли і як робити. Планування передуює організації і проведенню робіт. Планування характерне для всіх цілеспрямованих дій і зв'язане, по суті, з попереднім ухваленням рішень.

Планування починається із з'ясування цілей і завдань, які необхідно досягти і вирішити в процесі виконання даної операції (сукупності цілеспрямованих дій системи). Потім розробляється комплекс заходів, правило вибору способів дій, направлених на досягнення і вирішення поставлених перед системою цілей і задач. При цьому передбачається і вирішення питань, пов'язаних з розподілом і використанням матеріальних, тимчасових, фінансових і людських ресурсів. Природною є вимога, аби план функціонування системи був в якомусь сенсі найкращим, оптимальним.

Система випробувань в загальному випадку є організаційною системою. Основні її елементи - люди, випробовувані об'єкти, випробувальне устаткування з відповідним математичним забезпеченням.

На етапі планування випробувань складається програма, яка повинна включати мету і задачі випробувань, опис об'єкту випробувань, порядок їх проведення і забезпечення, об'єм, послідовність і методики випробувань, порядок обробки отриманих результатів, форму і порядок звітності.

Програма випробувань повинна створюватися паралельно із створенням об'єкту. Більш того, в конструкції об'єкту, в його компоновці мають бути враховані вимоги, що висуваються випробуваннями. При проектуванні об'єктів паралельно повинні здійснюватися проектування і створення спеціального випробувального устаткування.

Проведення випробувань пов'язане з реалізацією програми випробувань. Випробувачі мають бути готовими до необхідності вироблення і ухвалення обґрунтованого оперативного рішення для корекції програми або компенсації впливу обурюючих дій. Як правило, оптимальність цих заходів значною мірою визначається наявністю тимчасових, людських і матеріальних резервів (випробовувані об'єкти, випробувальне устаткування), які мають бути передбачені на етапі планування випробувань.

Між етапами обробки і аналізу результатів випробувань не завжди можна провести чітку границю. Деколи розділення цих етапів є вельми умовним і багато в чому визначається характером випробувань і складністю випробовуваного об'єкту. Загальним для обох етапів є те, що на них здійснюється перетворення інформації. На етапі проведення випробувань інформація добувається, на двох подальших етапах вона обробляється.

У багатьох випробуваннях етап обробки отриманих результатів можна зв'язати з попередньою їх обробкою, при якій здійснюється попереднє усереднювання даних, виключення з обробки аномальних вимірів і так далі. У загальному випадку під первинною обробкою можна розуміти процес здобуття і інтерпретації статистичних характеристик результатів прямих вимірів, що отримуються при випробуваннях. Такими характеристиками можуть бути математичні чекання, дисперсії, середньоквадратичні відхилення, кореляційні моменти або функції, закони розподілу, показники, що відображають властивості точкових і інтервальних оцінок статистичних характеристик і так далі. Всі ці характеристики можуть бути представлені у виді масивів чисел в пам'яті ЕОМ, таблиць, графіків.

Отримані таким чином результати первинної обробки використовуються на етапі аналізу для вирішення завдань вторинної обробки. При вторинній обробці знаходяться оцінки випробувачів характеристик і параметрів об'єкту або процесу його функціонування, що цікавлять, і виробляються рішення. Зазвичай ці характеристики і показники пов'язані з вимірюваними змінними відомими співвідношеннями. При вторинній обробці ці співвідношення використовуються для знаходження шуканих величин. Прикладами таких величин можуть бути показники надійності або ефективності функціонування, структура і параметри математичної моделі об'єкту і т.д.

За результатами вторинної обробки з врахуванням вимог, що пред'являються до характеристик об'єкту, випробувачі рекомендують замовникові ті або інші рішення.

Іноколи випробувальний режим об'єкту поєднується з робітником. У цих умовах розрізняють оперативну і повну обробку інформації. Як оперативна, так і повна обробка включає первинну і вторинну обробки. В цьому випадку важко виділити в часі етапи збору і аналізу результатів випробувань. Етап аналізу завершується виробленням рішення, тобто обґрунтованих пропозицій керівникам випробувань, які враховують ці пропозиції при ухваленні рішень.

Теорія випробувань вивчає закономірності побудови і функціонування системи випробувань. Основні проблеми цієї теорії пов'язані з розробкою і дослідженням моделей об'єктів, засобів і процесу випробувань.

В даний час в основу планування будь-якої операції, як правило, закладається принцип оптимальності. Для реалізації цього принципу необхідно мати показник ефективності функціонування системи і модель. При вирішенні задач планування роботи складних систем, який є система випробувань, доводиться використовувати математичну модель. У зв'язку з вказаним вище на етапі планування випробувань слід в першу чергу вибрати і обґрунтувати показники і критерії ефективності випробувань, а також побудувати математичну модель випробувань. Дана проблема є досить складною, і поки що належного освітлення в технічній літературі не отримала. Крім того, на цьому етапі має бути побудована математична модель і випробовуваного об'єкту.

Модель випробовуваного об'єкту використовується для визначення і обґрунтування видів, об'ємів і послідовності випробувань, для вибору вимірюваних і контрольованих змінних і параметрів, для обґрунтування виду і характеристик тестових сигналів і т.д.

Методи вирішення перерахованих задач значною мірою визначаються типом моделі і об'ємом наявної інформації про характеристики об'єкту.

На етапі планування випробувань, окрім перерахованих, вирішується маса інших технічних, організаційних проблем і задач, до яких можна віднести: збір інформації і обґрунтування методів її обліку в процесі проведення випробувань і обробки їх результатів; визначення форм звітної документації; попередній вибір методів обробки інформації, що отримується при випробуваннях; підготовка варіантів ухвалення рішень при типових ситуаціях.

При проведенні випробувань починається реалізація їх програми, здійснюється збір інформації про випробовуваний об'єкт і його функціонування. Сповна природною є вимога здобуття максимуму інформації при витраті обмежених матеріальних і тимчасових ресурсів. В процесі випробувань в основному вирішуються організаційні питання. Система випробувань при цьому функціонує як деяка система управління виробничою і організаційною діяльністю колективів людей. З цих позицій процес виконання випробувань може розглядатися як система організаційно-технічного управління.

Багато проблем, що виникають при дослідженні системи випробувань, пов'язано з наявністю в цій системі людей. Функції людей при випробуваннях можуть бути вельми всілякими (від оператора до керівника випробуваннями). Побудова моделі поведінки кожної людини і всієї організаційно-технічної системи - вельми складна задача, вирішення якого неможливе без залучення зусиль фахівців різних напрямів.

Для випробувань, як правило, характерні динамічність, обмеженість тимчасових ресурсів, оперативність. В той же час, як вже було відмічено вищим, оптимальна запланована програма випробувань на практиці безперервно обурюється. У цих умовах ефективною є та система випробувань, яка вчасно компенсує вплив обурюючих дій або коректує програму випробувань за рахунок вироблення оперативних управлінських рішень.

Проблеми, що вирішуються на етапах обробки результатів вимірів, пов'язані з вибором математичних моделей об'єкту випробувань, тракту передачі і обробки вимірювальної інформації, з обґрунтуванням оптимальних методів обробки інформації, відповідного математичного забезпечення обчислювальної техніки і засобів відображення інформації і т.д.

На етапі аналізу і здійснення рішення первинними задачами є визначення показників і критеріїв оцінки результатів випробувань, вибір методів ідентифікації, технічної діагностики, методів прогнозування технічного стану об'єкту.

Враховуючи, що об'єкти теплотехнології і їх системи в процесі розробки проходять ряд різних по складності взаємозв'язаних випробувань, планування їх має бути комплексним, який охоплює повний цикл випробувань. Використовуючи такий підхід,

представляється можливим визначити об'єм кожного випробування, встановити критерій його закінченості і готовності об'єкту для переходу до подальших випробувань.

3.1 Випробування. Основні терміни і визначення

Випробування - експериментальне визначення кількісних і якісних характеристик властивостей об'єкту випробувань як результату дії на нього при його функціонуванні, при моделюванні об'єкту або дій.

Експериментальне визначення характеристик властивостей об'єкту при випробуваннях може проводитися за допомогою вимірів, аналізів, діагностування, шляхом реєстрації певних подій при випробуваннях (відмови, пошкодження, течя) і т.д.

Характеристики властивостей об'єкту при випробуваннях можуть оцінюватися, якщо задачею випробувань є здобуття кількісних або якісних оцінок, а можуть контролюватися, якщо задачею випробувань є лише встановлення відповідності характеристик об'єкту заданим вимогам. В цьому випадку випробування зводяться до контролю. Тому ряд видів випробувань є контрольними, в процесі яких вирішується задача контролю.

Найважливішою ознакою будь-яких випробувань є прийняття на основі їх результатів певних рішень.

Іншою ознакою випробувань є задача певних умов випробувань (реальних або модельованих), під якими розуміється сукупність дій на об'єкт і режимів функціонування об'єкту.

Визначення характеристик об'єкту при випробуваннях може вироблятися як при функціонуванні об'єкту, так і за відсутності функціонування, за наявності дій, до або після їх застосування.

Об'єкт випробувань - апарат, що піддається випробуванням.

Залежно від його виду і цілей випробувань об'єктом може бути як одиничний апарат, так і технологічна система.

Головною ознакою об'єкту випробувань є те, що за результатами його випробувань приймається певне рішення по об'єкту - про його придатність, про можливість пред'явлення на наступні випробування, про можливість серійного випуску і ін.

Залежно від виду продукції і програми випробувань об'єктом випробувань може бути макет або модель, і рішення за результатами випробувань може відноситися безпосередньо до макету або моделі. Проте якщо при випробуванні апарату деякі елементи його доводиться для випробувань замінити моделями або окремі характеристики визначати на моделях, то об'єктом випробувань залишається сам апарат, оцінку характеристик якого отримують на основі випробувань моделі.

Модель для випробувань - виріб, процес, явище, математична модель, що знаходяться в певній відповідності з об'єктом випробувань або діями на нього і здатні замінити їх в процесі випробувань.

Макет для випробувань є спрощеним відтворенням об'єкту випробувань або його частини, призначене для випробувань.

При таких випробуваннях на відміну від контролю передбачається дія на об'єкт випробувань різних чинників або режимів функціонування, які називаються умовами випробувань.

Умови випробувань - сукупність впливаючих чинників або режимів функціонування об'єкту при випробуваннях.

До умов випробувань відносяться зовнішні впливаючі чинники як природні, так і штучно створювані, а також внутрішні дії, що викликаються тертям, проходженням електричного струму та ін. і режими функціонування об'єкту, способи і місце його установки, монтажу, кріплення, швидкість переміщення і т.п.

Зовнішні впливаючі чинники - це явища або процеси зовнішні по відношенню до апарату або його складових частин, які викликають або можуть викликати обмеження або втрату працездатності в процесі експлуатації.

У нормативних документах на методи випробувань вказуються значення впливаючих чинників, режими функціонування, які називаються нормальними умовами випробувань.

Нормальні умови випробувань - умови випробувань, встановлені нормативно-технічною документацією.

Приклад умов випробувань.

1. Умови випробувань.

2. Двигуни серійного виготовлення і дослідні зразки нових і модернізованих двигунів перед випробуваннями мають бути обкатані в об'ємі, встановленому технічною документацією на обкатку двигунів, затвердженою в установленому порядку. Двигуни, що були в експлуатації, обкатці не піддаються.

3. Випробування проводять переважно при температурі довколишнього повітря $283\text{K} < T < 313\text{K}$ ($10^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$) при атмосферному тиску $80\text{ кПа} < B < 110\text{ кПа}$ (600 мм рт. ст. $< B < 825\text{ мм рт. ст.}$). Якщо температура і тиск виходять за вказані межі, їх наводять в протоколі випробувань і в звіті про результати випробувань. Випробування допускається проводити в приміщенні з кондиціонованим повітрям, де можливе регулювання умов, при яких проводять випробування (температури і тиски).

4. Температуру палива на вході в паливну систему дизеля підтримують в межах, встановлених в технічній документації виготівника, затвердженій в установленому порядку.

5. Випробування проводять на паливі і маслі, встановлених в технічній документації виготівника, затвердженій в установленому порядку.

6. При проведенні випробувань температуру рідини, що охолоджує, і масла в двигуні підтримують в межах, вказаних в технічних умовах на двигун. За відсутності таких вказівок температуру рідини, що охолоджує, на виході з двигуна підтримують в межах $75\text{-}85^\circ\text{C}$, а температуру масла в межах $80\text{-}100^\circ\text{C}$.

7. При проведенні випробувань двигунів повітряного охолодження температуру довколишнього повітря підтримують в межах, вказаних в технічних умовах на двигун. За відсутності таких вказівок температура довколишнього повітря не повинна перевищувати плюс 40°C . Температура двигуна в точці, вказаній в технічних умовах на двигун, повинна підтримуватися в межах між максимальним значенням, вказаним в технічних умовах на двигун, і меншим на 20°C .

8 Для підтримки температур, встановлених п.п. 4, 6 і 7, може використовуватися, при необхідності, допоміжна система охолодження або автономний вентилятор.

9. При кожному випробуванні число точок вимірів має бути достатнім для того, щоб при побудові характеристик виявити форму і характер протікання кривої у всьому діапазоні обстежуваних режимів.

10. Показники двигуна можуть визначатися як при ручному, так і при автоматичному управлінні стендом. Показники двигуна повинні визначатися при сталому режимі роботи.

Примітка. Сталий режим роботи - режим, при якому момент, що крутить, частота обертання, температура рідини, що охолоджує, температура масла, а для двигуна повітряного охолодження і температура двигуна змінюються за час виміру не більше ніж на $+2\%$.

11. Значення моменту, що крутить, частоти обертання і витрати палива повинні визначатися одночасно. У протокол вносять середнє арифметичне значення результату двох послідовних вимірів, які не повинні відрізнятися одне від іншого більш ніж на 2% .

12. При ручному управлінні стендом тривалість виміру витрати палива має бути не менше 30 с.

13. При визначенні робочих показників, умовних механічних втрат і рівномірності роботи циліндрів фіксують показники, перераховані в п. 2.

14. Після закінчення випробувань двигуна складають звіт (технічну довідку), в якому дають висновок про відповідність двигуна технічним умовам.

Випробування об'єктів проводяться відповідно до розроблених і затверджених програм і методик.

Програма випробувань - організаційно-методичний документ, обов'язковий до виконання, що встановлює об'єкт і цілі випробувань, види, послідовність і об'єм експериментів, що проводяться, порядок, умови, місце і терміни проведення випробувань, забезпечення і звітність по ним, а також відповідальність за забезпечення і проведення випробувань.

Програма випробувань повинна містити методики випробувань або посилань на них, якщо методики оформлені як самостійні документи.

Програма і методи випробувань може містити наступні розділи:

- сфера застосування;
- мета випробувань;
- об'єкти, періодичність, терміни проведення і організація випробувань;
- загальні умови випробувань;
- програма випробувань, що визначає об'єм випробувань і послідовність;
- методи конкретних випробувань, включаючи умови, об'єм, порядок оформлення результатів експериментів, що проводяться;
- оформлення результатів випробувань.

Методика випробувань - організаційно-методичний документ, обов'язковий до виконання, що включає метод випробувань, засоби і умови випробувань, відбір проб, алгоритми виконання операцій за визначенням однієї або декількох взаємозв'язаних характеристик властивостей об'єкту, форми представлення даних і оцінювання точності, достовірності результатів, вимоги техніки безпеки і охорони довкілля.

Методика випробувань по суті визначає технологічний процес випробувань і може бути оформлена самостійним документом, включена в програму випробувань або нормативний документ на продукцію (стандарти, технічні умови). Методика випробувань має бути атестована.

Атестація методики випробувань - визначення значень показників точності, достовірності або відтворюваності результатів випробувань і їх відповідності заданим вимогам, що забезпечують методикою.

Метод випробувань - правила вживання певних принципів і засобів випробувань.

Об'єм випробувань - характеристика випробувань, визначувана кількістю об'єктів і видом випробувань, а також сумарною тривалістю випробувань.

Випробування об'єкту, як і контроль, носять системний характер.

Система випробувань - сукупність засобів випробувань, виконавців і певних об'єктів випробувань, що взаємодіють по правилах, встановлених відповідною нормативною документацією.

Головною характерною ознакою будь-якої системи випробувань є наявність деякої організованої сукупності виконавців (організацій або окремих осіб), що мають в своєму розпорядженні необхідні засоби випробувань і випробувань, що взаємодіють з певними об'єктами, по встановлених правилах.

Засіб випробувань - технічний пристрій, речовина або матеріал для проведення випробувань.

Поняттям «Засіб випробувань» охоплюються будь-які технічні засоби, вживані при випробуваннях. Сюди відноситься, перш за все, випробувальне устаткування. У засоби випробувань включаються засоби вимірів як вбудовані у випробувальне устаткування, так і вживані при випробуваннях для вимірів тих або інших характеристик об'єкту або

контролю умов випробувань. До засобів випробувань слід відносити також допоміжні технічні пристрої для кріплення об'єкту випробувань, реєстрації і обробки результатів.

До засобів випробувань відносяться також основні і допоміжні речовини і матеріали (реактиви і тому подібне), вживані при випробуваннях.

Випробувальне устаткування - засіб випробувань, що є технічним пристроєм для відтворення умов випробувань.

Для забезпечення точнісних характеристик, випробувальне устаткування повинно бути атестовано відповідно до ДСТУ.

Атестація випробувального устаткування - визначення нормованих точнісних характеристик випробувального устаткування, їх відповідності вимогам нормативних документів і встановлення придатності цього устаткування до експлуатації.

Як приклад розглянемо вимоги до випробувального устаткування для проведення стендових випробувань двигунів.

Виписка з ДСТУ:

Випробувальний стенд повинен мати устаткування для виміру наступних показників:

- частоти обертання колінчастого валу з точністю $\pm 0,5\%$;
- витрати палива з точністю $\pm 1\%$;
- температури всмоктуваного повітря з точністю $\pm 1^\circ\text{C}$;
- температури рідини, що охолоджує, з точністю $\pm 2^\circ\text{C}$;
- температури масла з точністю $\pm 2^\circ\text{C}$;
- температури палива з точністю $\pm 2^\circ\text{C}$;
- температури відпрацьованих газів з точністю $\pm 2^\circ\text{C}$ (лише при приймальних випробуваннях);
- температури газу (в газових двигунів) з точністю $\pm 2^\circ\text{C}$;
- барометричного тиску з точністю ± 200 Па (2,0 мбар);
- тиски масла з точністю $\pm 3\%$ (лише при приймальних випробуваннях);
- кута випередження запалення або початку подачі палива з точністю $\pm 1^\circ$ повороту колінчастого валу;
- розрідження у впускному трубопроводі (лише при приймальних випробуваннях);
- тиски наддуву.

Примітка. Поняття «Випробувальний стенд» в різних галузях трактується по-різному. Так, наприклад, в техніці вібраційних випробувань під вібраційним стендом розуміється віброуючий стіл, а весь комплекс засобів управління і виміру разом із столом називається вібраційною установкою.

Стенд для випробувань, навпаки, включає весь комплекс засобів, необхідних для проведення цих випробувань.

Оскільки термін «випробувальне устаткування» як засіб випробувань для відтворення умов випробувань повністю охоплює всі тлумачення поняття «Випробувальний стенд», то, відповідно, поширений термін «стендові випробування» визначається як випробування, що проводяться на випробувальному устаткуванні.

Точність результатів випробувань - властивість випробувань, що характеризується близькістю результатів випробувань до дійсних значень характеристик об'єкту, в певних умовах випробувань.

Відтворюваність методів і результатів випробувань - характеристика, визначувана близькістю результатів випробувань, ідентичних зразків одного і того ж об'єкту по одній і тій же методиці в різних лабораторіях, різними операторами з використанням різного устаткування.

Відтворюваність методів і результатів випробувань, окрім методики випробувань (що включає метод, засоби, алгоритм проведення і так далі), може в значній мірі залежати від властивостей об'єкту випробувань.

Якщо об'єктом випробувань є, наприклад, декілька однотипних апаратів, що піддаються вибіркоvim випробуванням, то такі випробування у постачальника і споживача можуть проводитися на ідентичних апаратах, вибраних випадковим чином, і в цьому випадку деякі відмінності при виготовленні одних і тих же апаратів може істотно, інколи вирішальним чином, впливати на відтворюваність результатів випробувань.

Дані випробувань - реєстровані при випробуваннях значення характеристик властивостей об'єкту або умов випробувань, напрацювань, а також інших параметрів, що є початковими для подальшої обробки.

Результат випробувань - оцінка характеристик властивостей об'єкту, встановлення відповідності об'єкту заданим вимогам за даними випробувань, результати аналізу якості функціонування об'єкту в процесі випробувань.

Протокол випробувань - документ, що містить необхідні відомості про об'єкт випробувань, вживані методи, засоби і умови випробувань, результати випробувань, а також висновок за результатами випробувань, оформлений в установленому порядку.

Категорія випробувань - вид випробувань, що характеризується організаційною ознакою їх проведення і ухваленням рішення за результатами оцінки об'єкту в цілому.

Широкий круг видів випробувань, що об'єднуються в категорії випробувань, характеризується організаційними ознаками їх проведення, а саме - рівнем (державні, міжвідомчі, відомчі випробування), етапами розробки (попередні, приймальні), різними видами випробувань готової продукції (кваліфікаційні, періодичні, типові і т.д.).

За результатами всіх цих випробувань здійснюється оцінка об'єкту в цілому і приймається відповідне рішення - про можливість пред'явлення на приймальні випробування, про його постановку на виробництво, про закінчення освоєння серійного виробництва, про можливість його продовження, про привласнення тій або іншій категорії якості і т.д.

Зразок для випробувань - продукція або її частина, або проба, що безпосередньо піддаються експерименту при випробуваннях.

Дослідний зразок - зразок продукції, виготовлений по знов розробленій робочій документації для перевірки шляхом випробувань відповідності його заданим технічним вимогам з метою ухвалення рішення про можливість постановки на виробництво або використання за призначенням.

Суб'єктами системи випробувань є випробувальні організації, випробувальні підрозділи і безпосередні виконавці. Випробувальні організації і підрозділи мають бути атестовані.

Випробувальна організація - організація, на яку в установленому порядку покладено проведення певних видів випробувань.

Випробувальний підрозділ - підрозділ організації, на який керівництвом останньої покладено проведення випробувань для своїх потреб.

Атестація випробувальних організацій і підрозділів - посвідчення компетентності випробувальних організацій і підрозділів і їх оснащеності, що забезпечують проведення на належному технічному рівні всіх передбачених нормативно-технічною документацією випробувань.

Питання для самоперевірки

1. З якою метою проводяться випробування?
2. Дайте визначення терміну «об'єкт випробувань». Що може бути об'єктом випробувань?
3. Що включають умови випробувань?
4. Відповідно до яких документів проводяться випробування? Коротко охарактеризуйте ці документи.
5. Що розуміється під системою випробувань?
6. Що загального і в чому відмінність між засобом випробувань і випробувальним устаткуванням?

7. З якою метою проводиться атестація випробувального устаткування?
8. Дайте визначення терміну «відтворюваність методів і результатів випробувань». Від яких чинників залежить відтворюваність методів і результатів випробувань?
9. У чому відмінність між даними випробувань і результатами випробувань?
10. Який документ оформляється після завершення випробувань і що він повинен містити?

3.2 Види випробувань

Вид випробувань - класифікаційне угруповання випробувань за певною ознакою.

Відповідно до ДСТУ всі види випробувань систематизовані по дев'яти основних ознаках:

- призначення випробувань;
- рівень проведення випробувань;
- етапи розробки продукції;
- випробування готової продукції;
- умови і місце проведення випробувань;
- тривалість випробувань;
- вид дії;
- результат дії;
- визначувані характеристики об'єкту.

Класифікаційне угруповання випробувань по перерахованих ознаках з відповідними визначеннями приведені в таблиці 3.1.

Випробування можуть мати два і більш за ознаки з числа перерахованих. При необхідності найменування випробувань може включати перерахування цих ознак, наприклад, державні періодичні стендові випробування на надійність і т.п.

Дослідницькі випробування. Дослідницькі випробування при необхідності проводять на будь-яких стадіях життєвого циклу продукції.

Дослідницькі випробування проводяться з метою:

- визначення або оцінки показників якості функціонування випробовуваного об'єкту в певних умовах;
- вибору найкращих режимів вживання об'єкту або найкращих характеристик властивостей об'єкту;
- порівняння безлічі варіантів реалізації об'єкту при проектуванні і атестації;
- побудови математичної моделі функціонування об'єкту (оцінки параметрів математичної моделі);
- відбору істотних чинників, що впливають на показники якості функціонування об'єкту;
- вибору виду математичної моделі об'єкту (серед заданої безлічі варіантів).

До дослідницьких випробувань відносяться доводочні випробування.

Приймальні випробування. Приймальні випробування дослідних зразків проводяться для вирішення питання про доцільність постановки цієї продукції на виробництво, а приймальні випробування зразків продукції одиничного виробництва проводяться для вирішення питання про доцільність передачі їх в експлуатацію.

Контрольні випробування. Контрольні випробування проводяться з метою:

- рішення питання доцільності постановки продукції на виробництво (попередні і приймальні випробування);
- оцінки готовності підприємства до випуску продукції даного типу в заданому об'ємі (кваліфікаційні випробування);
- оцінки готовності підприємства до випуску продукції даного типу в заданому об'ємі (кваліфікаційні випробування);
- контролю якості продукції;

- контролю стабільності якості продукції (періодичні, інспекційні випробування);
- можливості продовження випуску продукції (періодичні випробування);
- оцінки ефективності і доцільності змін, що вносяться, в конструкцію (типові випробування);
- встановлення відповідності характеристик властивостей продукції національним або міжнародним нормативним документам (сертифікаційні випробування).

На стадії серійного виробництва проводяться випробування: пред'явницькі, періодичні, типові, сертифікаційні і інспекційні.

Таблиця 3.1 - Класифікаційне угруповання випробувань

Ознака виду випробувань	Вид випробувань
1	2
1. Призначення випробувань	<p>1.1. Дослідницькі випробування - випробування, що проводяться для вивчення певних характеристик властивостей об'єкту</p> <p>1.2. Контрольні випробування - випробування, що проводяться для контролю якості об'єкту</p> <p>1.3. Порівняльні випробування - випробування аналогічних по характеристиках або однакових об'єктів, таких, що проводяться в ідентичних умовах для порівняння характеристик їх властивостей</p> <p>1.4. Визначальні випробування - випробування, що проводяться для визначення значення характеристик об'єкту із заданими значеннями показників точності або достовірності</p>
2. Рівень проведення випробувань	<p>2.1. Державні випробування - випробування встановлених найважливіших видів продукції, що проводяться головною організацією по державних випробуваннях, або приймальні випробування, що проводяться державною комісією або випробувальною організацією, якою надано право їх проведення</p> <p>2.2. Міжвідомчі випробування - випробування продукції, що проводяться комісією з представників декількох зацікавлених міністерств або відомств, або приймальні випробування встановлених видів продукції для приймання складових частин об'єкту, що розробляється спільно декількома відомствами</p> <p>2.3. Відомчі випробування - випробування, що проводяться комісією з представників зацікавленого міністерства або відомства</p>
3. Етапи розробки продукції	<p>3.1. Доводочні випробування - дослідницькі випробування, що проводяться при розробці продукції з метою оцінки впливу змін, що вносяться до неї, для досягнення заданих значень показників її якості</p> <p>3.2. Попередні випробування - контрольні випробування дослідних зразків або дослідних партій продукції з метою визначення можливості їх пред'явлення на приймальні випробування</p> <p>3.3. Приймальні випробування - контрольні випробування дослідних зразків, дослідних партій продукції або виробів одиничного виробництва, що проводяться відповідно з метою рішення питання про доцільність постановки цієї продукції на виробництво або використання за призначенням</p>

Продовження таблиці 3.1

1	2
4. Випробування готової продукції	<p>4.1. Кваліфікаційні випробування - контрольні випробування настановної серії або першої промислової партії, підприємства, що проводяться з метою оцінки готовності, до випуску продукції даного типу в заданому об'ємі</p> <p>4.2. Пред'явницькі випробування - контрольні випробування продукції, що проводяться службою технічного контролю підприємства-виготівника перед пред'явленням її для приймання представником замовника, споживача або інших органів приймання</p> <p>4.3. Періодичні випробування - контрольні випробування продукції, що випускається, що проводяться в об'ємах і в терміни, встановлені нормативно-технічною документацією, з метою контролю стабільності якості продукції і можливості продовження її випуску</p> <p>4.4. Інспекційні випробування - контрольні випробування встановлених видів продукції, що проводяться у вибірковому порядку з метою контролю стабільності якості продукції спеціально уповноваженими організаціями</p> <p>4.5. Типові випробування - контрольні випробування продукції, що випускається, що проводяться з метою оцінки ефективності і доцільності змін, що вносяться, в конструкцію, рецептуру або технологічний процес</p> <p>4.6. Атестаційні випробування - випробування, що проводяться для оцінки рівня якості продукції при її атестації по категоріях якості</p> <p>4.7. Сертифікаційні випробування - контрольні випробування продукції, відповідності характеристик її властивостей, що проводяться з метою встановлення, національним або міжнародним нормативно-технічним документам</p>
5. Умови і місце проведення випробувань	<p>5.1. Лабораторні випробування - випробування об'єкту, що проводяться в лабораторних умовах</p> <p>5.2. Стендові випробування - випробування об'єкту, що проводяться на випробувальному устаткуванні</p> <p>5.3. Полігонні випробування - випробування об'єкту, що проводяться на випробувальному полігоні</p> <p>5.4. Натурні випробування - випробування об'єкту в умовах, відповідних умовам його використання по прямому призначенню з безпосереднім оцінюванням або контролем визначуваних характеристик властивостей об'єкту</p> <p>5.5. Випробування з використанням моделей - випробування з використанням моделей</p> <p>5.6. Експлуатаційні випробування - випробування об'єкту, що проводяться при експлуатації</p>
6. Тривалість випробувань	<p>6.1. Нормальні випробування - випробування, методи і умови проведення яких забезпечують здобуття необхідного об'єму інформації про характеристики властивостей об'єкту в такий же інтервал часу, як і в передбачених умовах експлуатації</p> <p>6.2. Прискорені випробування - випробування, методи і умови проведення яких забезпечують здобуття необхідної інформації про характеристики властивостей об'єкту в коротший термін, ніж при нормальних випробуваннях</p> <p>6.3. Скорочені випробування - випробування, що проводяться за скороченою програмою</p>

Продовження таблиці 3.1

1	2
7. Вид дії	7.1. Механічні випробування - випробування на дію механічних чинників 7.2. Кліматичні випробування - випробування на дію кліматичних чинників 7.3. Термічні випробування - випробування на дію термічних чинників 7.4. Радіаційні випробування - випробування на дію радіаційних чинників 7.5. Електричні випробування - випробування на дію електричної напруги, струму або поля 7.6. Електромагнітні випробування - випробування на дію електромагнітних полів 7.7. Магнітні випробування - випробування на дію магнітного поля 7.8. Хімічні випробування - випробування на дію спеціальних середовищ 7.9. Біологічні випробування - випробування на дію біологічних чинників
8. Результат дії	8.1. Неруйнівні випробування - випробування із застосуванням неруйнівних методів контролю 8.2. Руйнівні випробування - випробування із застосуванням руйнівних методів контролю 8.3. Випробування на міцність - випробування, що проводяться для визначення значень впливаючих чинників, що викликають вихід значень характеристик властивостей об'єкту за встановлені межі або його руйнування 8.4. Випробування на стійкість - випробування виробу, що проводяться для контролю здатності, виконувати свої функції і зберігати значення параметрів в межах встановлених норм під час дії на нього певних чинників
9. Визначувані характеристики об'єкту	9.1. Функціональні випробування - випробування що проводяться з метою визначення значень показників призначення об'єкту 9.2. Випробування на надійність - випробування, що проводяться для визначення показників надійності в заданих умовах 9.3. Випробування на безпеку 9.4. Випробування на транспортабельність 9.5. Граничні випробування - випробування, що проводяться для визначення залежностей між гранично допустимими значеннями параметрів об'єкту і режимів експлуатації 9.6. Технологічні випробування - випробування, що проводяться при виготовленні продукції з метою оцінки її технологічності

Типові випробування. Типові випробування проводять для оцінки ефективності і доцільності змін, що вносяться до конструкції або технологічного процесу. Типові випробування проводить виготівник за участю конструкторських або технологічних служб по програмах і методами, встановленими залежно від характеру внесених змін. При позитивних результатах типових випробувань приймається рішення про доцільність внесення змін до конструкції апарату або технологічного процесу, при негативних - передбачувана зміна не вноситься. Якщо продукція, в яку передбачається внести зміни, підлягає прийманню замовником, то типові випробування проводяться в його присутності.

Сертифікаційні випробування. Сертифікаційні випробування проводять для визначення відповідності продукції вимогам національних і міжнародних стандартів по

безпеці і охороні довкілля. Порядок і умови проведення сертифікаційних випробувань встановлюються в документації по сертифікації. За результатами цих випробувань приймається рішення про видачу сертифікату відповідності. Випробування продукції для цілей сертифікації проводять акредитовані в установленому порядку випробувальні лабораторії.

Експлуатаційні випробування. Експлуатаційні випробування - випробування апарату, що проводяться при експлуатації. Одним з основних видів експлуатаційних випробувань є дослідна експлуатація. Крім того, може проводитися підконтрольна експлуатація, яка в деякій мірі умовно може бути віднесена також до експлуатаційних випробувань. Підконтрольна експлуатація є природною експлуатацією, хід і результати якої спостерігаються персоналом, спеціально призначеним і підготовленим для цієї мети (додатковим або штатним) і таким, що керується документацією, розробленою також спеціально для збору, обліку і первинної обробки інформації, джерелом якої служить підконтрольна експлуатація.

Допускається поєднувати перераховані категорії випробувань.

Мета поєднання випробувань - економія засобів і часу. Поєднані випробування повинні забезпечувати сукупність всіх перевірок, передбачених для окремих категорій випробувань. За результатами поєднаних випробувань, як правило, оформляють загальний документ, віднесений до першої з вказаних категорій випробувань. У необхідних випадках оформляють окремі документи по кожній категорії випробувань.

За умовами і місцем проведення випробування можуть бути:

- лабораторні, які проводяться в лабораторних умовах;
- стендові, які проводяться на випробувальному устаткуванні у випробувальних або науково-дослідних підрозділах;

- полігонні, такі, що проводяться на випробувальному полігоні. Випробувальний полігон - територія і випробувальні споруди на ній, оснащені засобами випробувань і забезпечуючи випробування об'єкту в умовах, близьких до умов експлуатації об'єкту;

- натурні - випробування в умовах, відповідних умовам його використання по прямому призначенню. В даному випадку випробовуються не складові частини апарату або його модель, а лише безпосередньо сам готовий апарат. Характеристики властивостей апарату при натурних випробуваннях визначаються безпосередньо без використання аналітичних залежностей, що відображають фізичну структуру об'єкту випробувань або його частин;

- випробування з використанням моделей проводяться на фізичній моделі (спрощеною, зменшеною) виробу або його складових частин; інколи при цих випробуваннях виникають необхідності в проведенні розрахунків на математичних і фізико-математичних моделях у поєднанні з натурними випробуваннями об'єкту і його складових частин.

За тривалістю, а вірніше по тимчасовій повноті проведення випробування можуть бути:

- нормальні, коли методи і умови проведення забезпечують здобуття необхідного об'єму інформації про характеристики властивостей об'єкту в такий же інтервал часу, як і в передбачених умовах експлуатації;

- прискорені, коли методи і умови проведення забезпечують здобуття необхідної інформації про характеристики властивостей об'єкту в коротший термін, ніж при нормальних випробуваннях. Проведення прискорених випробувань дозволяє скорочувати витрати засобів і часу на створення продукції. Прискорення здобуття результатів випробувань може бути досягнуте за рахунок вживання підвищених навантажень, збільшення температур при термічних випробуваннях і т.д.;

- скорочені проводяться за скороченою програмою.

За результатом дії випробування можуть бути:

- неруйнівні - об'єкт випробувань після проведення випробувань може експлуатуватися;
- руйнівні - об'єкт після проведення випробувань не може бути використаний для експлуатації.

Випробування по визначуваних характеристиках об'єкту класифікуються:

- на функціональних, таких, що проводяться з метою визначення значень показників призначення об'єкту;
- на надійність, що проводяться для визначення показників надійності в заданих умовах;
- на міцність, що проводяться для визначення значень впливаючих чинників з метою виходу значення певних характеристик об'єкту за встановлені межі або його руйнування;
- на стійкість, вироби, що проводяться для контролю здатності, виконувати свої функції і зберігати значення параметрів в межах норм, встановлених нормативною і технічною документацією, під час дії на нього певних чинників (агресивних середовищ, ударної хвилі, електричного поля, радіаційних випромінювань і т.д.);
- на безпеку, що проводяться з метою підтвердження, встановлення чинника безпеки для обслуговуваного персоналу або осіб, що мають відношення до об'єкту випробувань;
- на граничних, які проводяться для визначення залежностей між гранично допустимими значеннями параметрів об'єкту і режимом експлуатації;
- на технологічних, які проводяться при виготовленні продукції з метою оцінки її технологічності.

Метою випробувань слід вважати знаходження дійсного значення параметра або характеристики не за тих реальних умов, в яких він фактично може знаходитися в ході випробувань, а в заданих номінальних умовах випробування. Реальні умови випробувань практично завжди відрізняються від номінальних, оскільки встановити параметри умов випробувань абсолютно точно неможливо. Отже, результат випробування завжди має погрішність, що виникає не лише внаслідок неточного визначення шуканої характеристики, але і із-за неточного встановлення номінальних умов випробування.

Результатом випробувань називається оцінка характеристик властивостей об'єкту, встановлення відповідності об'єкту заданим вимогам за даними випробувань, результату аналізу якості функціонування об'єкту в процесі випробувань.

Результат випробувань характеризується точністю.

Між виміром і випробуванням існує велика схожість:

- результати обох операцій виражаються у виді чисел;
- погрішності обох операцій можуть бути виражені як різниці між результатом виміру (випробування) і дійсним значенням вимірюваної величини (або визначуваної характеристики за номінальних умов експлуатації).

Проте з точки зору метрології між ними є значна відмінність: *погрішність виміру є лише однією із складових погрішності випробування*. Тому можна сказати, що випробування - це загальніша операція, ніж вимір. Вимір можна рахувати окремим випадком випробування, при якому умови випробувань не представляють інтересу.

При проведенні випробувань необхідно забезпечити їх єдність, тобто необхідну точність, відтворюваність і достовірність результатів випробувань. Забезпечення єдності випробувань направлене на усунення розбіжностей в результатах повторних випробувань у постачальника і споживача і скорочення об'єму повторних випробувань. При цьому головною метою випробувань є безумовна достовірність і повнота отримуваної при випробуваннях інформації.

Технічною основою забезпечення єдності випробувань є атестоване випробувальне устаткування і повірені засоби вимірів, засоби атестації і перевірки.

Нормативно-методичною основою забезпечення єдності випробувань є:

- стандарти на методи випробувань;
- програми і методики випробувань;

- організаційно-методичні документи, що встановлюють порядок діяльності випробувальних підрозділів, регламентують загальні вимоги до випробувань, а також нагляд за їх проведенням;

- стандарти «Державної системи забезпечення єдності вимірів».

Питання для самоперевірки

1. По яких основних ознаках, згідно ДСТУ класифікуються всі види випробувань?
2. З якою метою проводяться дослідницькі випробування?
3. Мета проведення приймальних випробувань.
4. Які випробування називаються контрольними? Для вирішення яких задач (цілей) проводяться контрольні випробування?
5. Перерахуйте і охарактеризуйте види контрольних випробувань.
6. Які види випробувань проводяться на стадії серійного виробництва?
7. Які задачі вирішуються при проведенні типових випробувань?
8. Назвіть цілі проведення інспекційних і сертифікаційних випробувань.
9. Проведіть паралель між вимірами і випробуваннями; між випробуваннями і контролем.

3.3 Атестація випробувального устаткування

Атестація випробувального устаткування - це визначення нормованих точнісних характеристик випробувального устаткування, їх відповідності вимогам нормативних документів і встановлення придатності цього устаткування до експлуатації.

Основні положення і порядок проведення атестації випробувального устаткування регламентований ДСТУ.

Основна мета атестації випробувального устаткування - підтвердження можливості відтворення умов випробувань в межах відхилень, що допускаються, і встановлення придатності використання випробувального устаткування відповідно до його призначення.

Розрізняють три види атестації випробувального устаткування:

- первинна атестація;
- періодична атестація;
- повторна атестація.

Випробування, перевірку і калібрування засобів вимірів, використовуваних як засоби випробувань або у складі випробувального устаткування, здійснюють відповідно до нормативних документів державної системи забезпечення єдності вимірів.

Типи засобів вимірів, що вбудовуються у випробувальне устаткування, вживане для випробувань мають бути затверджені у встановленому для даної сфери порядку.

Первинна атестація випробувального устаткування. Первинній атестації піддається випробувальне устаткування при введенні в експлуатацію в конкретному випробувальному підрозділі.

Первинна атестація полягає в експертизі експлуатаційної і проектної документації, на підставі якої виконана установка випробувального устаткування, експериментальному визначенні його технічних характеристик і підтвердженні придатності використання випробувального устаткування.

Первинну атестацію випробувального устаткування проводять відповідно до нормативних документів, що діють, на методики атестації певного виду випробувального устаткування або по програмах і методиках атестації конкретного устаткування, тобто атестація випробувального устаткування, що серійно випускається, проводиться по нормативних документах, що діють, одиничного - по програмах і методиках, розроблених для даного випробувального устаткування.

Первинну атестацію випробувального устаткування проводить комісія, що призначається керівником організації за узгодженням з державним науковим метрологічним центром, якщо їх представники повинні брати участь в роботі комісії.

До складу комісії включають представників:

- підрозділу організації, провідного випробування на даному випробувальному устаткуванні;
- метрологічної служби організації, підрозділ якої поводить випробування;
- державних наукових метрологічних центрів і (або) органів державної метрологічної служби при використанні випробувального устаткування для випробувань продукції з метою її обов'язкової сертифікації або випробувань на відповідність обов'язковим вимогам державних стандартів;
- замовника на підприємстві в разі використання випробувального устаткування для випробувань продукції, що поставляється по контрактах.

Первинну атестацію випробувального устаткування можуть проводити на договірній основі акредитовані в установленому порядку головні і базові організації метрологічної служби (згідно області їх акредитації).

На первинну атестацію випробувальним підрозділом представляється випробувальне устаткування з повним комплектом технічної документації і технічними засобами, необхідними для його нормального функціонування і для проведення первинної атестації.

До складу документації, що надається, повинні входити:

- експлуатаційні документи по ДСТУ;
- програма і методика первинної атестації випробувального устаткування;
- методика періодичної атестації випробувального устаткування в процесі експлуатації, якщо вона не викладена в експлуатаційних документах.

В процесі первинної атестації встановлюють:

- можливість відтворення зовнішніх впливаючих чинників або режимів функціонування об'єкту випробувань, встановлених в документах, на методики випробувань об'єктів конкретних видів;
- відхилення характеристик умов випробувань від нормованих значень;
- забезпечення безпеки персоналу і відсутність шкідливої дії на довкілля;
- перелік характеристик випробувального устаткування, які перевіряють при періодичній атестації устаткування, методи, засоби і періодичність її проведення.

Результати первинної атестації оформляються протоколом.

Протокол первинної атестації випробувального устаткування повинен містити наступні дані:

- склад комісії з вказівкою прізвищу, посади, найменування організації;
- основні відомості про випробувальне устаткування (найменування, тип, заводський (інвентарний) номер, найменування підприємства-виготівника);
- характеристики випробувального устаткування, що перевіряються;
- умови проведення первинної атестації: температура, вологість, освітленість і т.п.;
- документи, використовувані для первинної атестації: програма і методика атестації, стандарти, технічні умови, експлуатаційні документи і т.п.;
- характеристики засобів вимірів, використовуваних для проведення первинної атестації випробувального устаткування: найменування, тип, заводський (інвентарний) номер, завод виготівник, відомості про перевірку (калібрування);
- результати первинної атестації:
 - а) зовнішній огляд (комплектність, відсутність пошкоджень, функціонування вузлів, агрегатів, наявність документів, що діють, на методики перевірки (калібрування) вбудованих або таких, що входять в комплект засобів вимірів);
 - б) значення характеристик випробувального устаткування, отримані при первинній атестації;
- висновок комісії про відповідність випробувального устаткування вимогам нормативних документів на випробувальне устаткування і на методики випробувань

об'єктів конкретних видів і можливості використання випробувального устаткування для їх випробувань;

- рекомендації комісії:

а) перелік нормованих характеристик, які визначають при періодичній атестації випробувального устаткування в процесі його експлуатації;

б) періодичність періодичної атестації випробувального устаткування в процесі його експлуатації;

в) додаткові рекомендації комісії (при необхідності).

Протокол первинної атестації випробувального устаткування підписують голова і члени комісії, що проводили первинну атестацію.

При позитивних результатах первинної атестації на підставі протоколу первинної атестації оформляється атестат по відповідній формі.

Атестат підписує керівник організації, в підрозділі якої проводилася первинна атестація випробувального устаткування.

Негативні результати первинної атестації вказують в протоколі.

Відомості про виданий атестат (номер і дата видачі), набутих значень характеристик випробувального устаткування, а також термін подальшої періодичної атестації випробувального устаткування і періодичність її проведення в процесі експлуатації вносять до формуляру або спеціально заведеного журналу.

3.4 Періодична атестація випробувального устаткування

Періодичній атестації піддається випробувальне устаткування, що знаходиться в експлуатації і пройшовши первинну атестацію.

Періодичній атестації устаткування піддається через інтервали часу, встановлені в експлуатаційній документації на випробувальне устаткування при його первинній атестації. Інтервали часу періодичної атестації можуть бути скоректовані за результатами контролю стану випробувального устаткування в процесі його експлуатації; для різних частин випробувального устаткування інтервали атестації можуть бути різні.

Періодичну атестацію випробувального устаткування в процесі його експлуатації проводять в об'ємі, необхідному для підтвердження відповідності характеристик випробувального устаткування вимогам нормативних документів на методики випробувань і експлуатаційних документів на устаткування і придатності його до подальшого використання.

Номенклатуру характеристик випробувального устаткування, що перевіряються, і об'єм операцій при його періодичній атестації встановлюють при первинній атестації устаткування, виходячи з нормованих технічних характеристик устаткування і тих характеристик, які визначають при випробуваннях.

Періодичну атестацію випробувального устаткування в процесі його експлуатації проводять співробітники підрозділу, в якому встановлено устаткування, уповноважені керівником підрозділу для виконання цієї роботи, і представники метрологічної служби організації.

Результати періодичної атестації випробувального устаткування оформляють протоколом.

Протокол періодичної атестації випробувального устаткування повинен містити наступні дані:

- основні відомості про випробувальне устаткування (найменування, тип, заводський (інвентарний) номер, найменування підприємства-виготівника);

- характеристики випробувального устаткування, що перевіряються;

- умови проведення періодичної атестації: температура, вологість, освітленість і т.п.;

- результати періодичної атестації;

а) зовнішній огляд (відсутність пошкоджень, функціонування вузлів, агрегатів, наявність експлуатаційних документів на випробувальне устаткування і документів, підтверджуючих зведення про перевірку (калібрування) вбудованих чи і таких, що входять в комплект засобів вимірів);

б) характеристики засобів вимірів, використовуваних для проведення періодичної атестації випробувального устаткування (найменування, тип, заводський (інвентарний) номер, найменування підприємства-виготівника), і зведення про їх перевірку (калібрування);

в) значення характеристик випробувального устаткування, отримані при попередній атестації;

г) значення характеристик випробувального устаткування, отримані при періодичній атестації;

- висновок про відповідність випробувального устаткування вимогам нормативних і експлуатаційних документів на випробувальне устаткування і на методики випробувань об'єктів конкретних видів.

Протокол з результатами періодичної атестації підписують особи, що її проводили. Затверджує протокол керівник організації.

При позитивних результатах періодичної атестації в паспорті (формулярі) роблять відповідну відмітку, а на випробувальне устаткування прикріплюють бирку з вказівкою дати проведеній атестації і терміну подальшої періодичної атестації.

При негативних результатах періодичної атестації в протоколі вказують заходи, необхідні для доведення технічних характеристик випробувального устаткування до необхідних значень.

Повторна атестація випробувального устаткування. Повторній атестації випробувальне устаткування піддається: в разі ремонту або модернізації випробувального устаткування; проведення робіт з фундаментом, на якому воно встановлене; переміщення стаціонарного випробувального устаткування і інших причин, які можуть викликати зміни характеристик відтворення умов випробувань.

Повторну атестацію випробувального устаткування після ремонту або модернізації здійснюють в порядку, встановленому для первинної атестації випробувального устаткування.

Повторну атестацію випробувального устаткування після проведення робіт з фундаментом, на якому воно встановлене, або переміщення стаціонарного випробувального устаткування, або викликану іншими причинами, які можуть викликати зміни характеристик відтворення умов випробувань, здійснюють в порядку, встановленому для періодичної атестації випробувального устаткування.

Питання для самоперевірки

1. З якою метою проводиться атестація випробувального устаткування?
2. На які види підрозділяється атестація випробувального устаткування?
3. У яких випадках проводиться повторна атестація випробувального устаткування і чим вона відрізняється від первинної атестації?
4. Хто проводить первинну атестацію випробувального устаткування?
5. Які документи мають бути представлені на первинну атестацію випробувального устаткування?
6. Перерахуйте документи, які оформляються після завершення первинної атестації.
7. У чому відмінність між періодичною і первинною атестаціями випробувального устаткування?

3.5 Зовнішні впливаючі чинники

3.5.1 Класифікація зовнішніх впливаючих чинників

Зовнішній впливаючий чинник (ЗВЧ) - явище, процес або середовище зовнішні по відношенню до об'єкту або його складових частин, які викликають або можуть викликати обмеження або втрату працездатного стану об'єкту в процесі експлуатації.

У нормативній документації розглядають зовнішні впливаючі чинники, обмеження або втрату працездатного стану об'єкту, тобто що надають на них шкідливу дію, хоча у ряді випадків вони можуть підвищувати працездатний стан, наприклад, низькі температури підвищують працездатність холодильних установок.

Нормальне значення ЗВЧ - значення ЗВЧ, статично оброблене і усереднене на основі багатократних спостережень для певної області експлуатації об'єкту.

Номинальне значення ЗВЧ - що нормоване змінюється або незмінне верхнє і нижнє значення ЗВЧ, в межах яких забезпечується заданий працездатний стан об'єктів конкретних видів.

У нормативних документах в числі номінальних значень ЗВЧ можна задавати також робочі і граничні робочі значення.

Граничні робочі значення ЗВЧ - значення ЗВЧ, в межах яких вироби можуть рідко виявлятися в експлуатації і повинні при цьому:

- зберігати працездатний стан, але можуть не зберігати необхідної точності і номінальних параметрів (при цьому в стандарті або технічних умовах вказують допустимі відхилення точності і номінальних параметрів, якщо ці відхилення мають місце);

- відновлювати необхідну точність і номінальні параметри після припинення дії цих граничних робочих значень.

Ефективне значення ЗВЧ - умовне постійне значення, що приймається при розрахунках номінальних параметрів об'єкту, що впливають на термін служби, суттєво залежних від даного ЗВЧ і нормованих для роботи протягом терміну служби.

Дія ефективного значення ЗВЧ, як правило, еквівалентно дії змінного значення даного чинника в процесі експлуатації.

Стійкість об'єкту до ЗВЧ - властивість об'єкту зберігати працездатний стан під час дії на нього певного ЗВЧ протягом всього терміну служби в межах заданих значень.

Міцність об'єкту до ЗВЧ - властивість об'єкту зберігати працездатний стан після дії на нього певного ЗВЧ в межах заданих значень.

Номенклатура, характеристики і структура кодового позначення ЗВЧ регламентовані ДСТУ.

Залежно від характеру дії на об'єкти всі ЗВЧ діляться на сім класів:

- механічні;
- кліматичні та інші природні;
- біологічні;
- радіаційні;
- електромагнітних полів;
- спеціальних середовищ;
- термічні.

Кожен клас ЗВЧ ділиться на групи, а кожна група на види з відповідними кожному виду характеристиками. Наприклад, клас механічних ЗВЧ ділиться на групи: коливання, удар, постійне прискорення, механічний тиск, сила (момент) і потік рідини. Група «постійне прискорення» підрозділяється на види ЗВЧ: лінійне прискорення, кутове прискорення, доцентрове прискорення.

Кожен вид ЗВЧ має визначені ДСТУ характеристики з вказівкою міжнародного і національного позначення одиниці фізичної величини.

3.5.2 Клас механічних зовнішніх впливаючих чинників

Перша група - коливання.

Підрозділяється на чотири види:

- синусоїдальна вібрація;
- випадкова вібрація;
- акустичний шум;
- хитавиця.

Розрізняють механічні коливання і коливання скалярної величини.

Механічні коливання - коливання значень кінематичної або динамічної величини, що характеризує механічну систему.

Коливання скалярної величини - процес почергового зростання і убуття зазвичай в часі значень якої-небудь величини.

Вібрація - рух точки або механічної системи, при якому відбуваються коливання тих, що характеризують його скалярних величин.

Шум - нерегулярне або статистично випадкове вагання.

Хитавиця - вагання об'єкту, при якому його вертикальна вісь відхиляється від вертикалі до земної поверхні. Розрізняють хитавицю бортову (кут нахилу) і вертикальну (періодичне переміщення по вертикалі до земної поверхні).

Перша група - коливання, характеризується тією або іншою мірою повторюваності в часі. Коливання можуть мати різне джерело збудження, відрізнятися мірою повторюваності і прудкістю зміни стану.

До коливань, в першу чергу, необхідно віднести механічні (рух маятників, різних частин машин при їх роботі і ін.). Окремим випадком коливання є вібрація. Вібрація виникає при роботі апаратів. Окрім перерахованих видів коливань, до цієї групи відноситься акустичний шум, що є випадковими механічними коливаннями звукового діапазону в твердих, рідких і газоподібних середовищах.

Друга група - удар.

Підрозділяється на три види:

- механічний удар, удар при вільному падінні і сейсмічний удар;
- гідравлічний удар;
- аеродинамічний удар.

Удар - сукупність явищ, що виникають при зіткненні двох тіл, а також при деяких видах взаємодії твердого тіла з рідиною або газом.

Механічний удар - дія, що є результатом короткочасної механічної дії твердих тіл при їх зіткненні між собою і супутні цьому процесу явища. Механічний удар може бути однократною і багатократною дією.

Удар рідкого струменя об тіло - гідравлічний удар, це результат дії різкого підвищення або пониження тиску рухомої рідини при раптовому зменшенні або збільшенні швидкості потоку.

Аеродинамічний удар - механічна дія ударної хвилі у момент досягнення надзвукової швидкості.

Ударна хвиля - перехідна область, що поширюється з надзвуковою швидкістю, в газі, рідині або в твердому тілі, в якій відбувається різке збільшення щільності, тиску і швидкості середовища.

Третя група - постійне прискорення.

Розрізняють чотири види постійного прискорення:

- лінійне прискорення;
- кутове прискорення;
- доцентрове прискорення.

Постійне прискорення - це векторна величина, що характеризує прудкість зміни з часом вектора швидкості деякої матеріальної точки.

Відповідно до другого закону Ньютона лінійне прискорення матеріальної точки результативній силі, що пропорційно діє на неї, і збігається з цією силою по напрямку. Розкладання прискорення на дві складові, направлені відповідно по дотичній до траєкторії

точки, називається тангенціальним (кутовим) прискоренням, а по головній нормалі до траєкторії точки у бік центру - доцентровим (нормальним) прискоренням.

Четверта група - механічний тиск.

Механічний тиск може бути наступних видів: гідравлічне, пневматичне, тиск світла, тиск газового середовища. Розрізняють два види механічного тиску:

- статичний тиск (гідравлічний, пневматичний, тиск світла, механічна напруга, тиск газового середовища);

- динамічний тиск.

Механічний тиск - тиск, що характеризується інтенсивністю нормальних сил, з якою одне тіло або середовище діють на поверхню іншого тіла або середовища.

Статичний тиск (гідравлічний, пневматичний, тиск світла, механічна напруга, тиск газового середовища) - механічний тиск, інтенсивність, точка додатка і напрям якого змінюються в часі настільки повільно, що сили інерції не враховуються.

Динамічний тиск - механічний тиск, інтенсивність, точка додатка і напрям якого змінюються в часі настільки швидко, що сили інерції враховуються, тобто це тиск, що характеризується швидкою зміною в часі його величини або точки додатка.

П'ята група - сила (момент).

Підрозділяється на шість видів ЗВЧ:

- розтягуюча сила;

- вигинаюча сила;

- стискуюча сила;

- крутячий момент;

- механічний зріз;

- імпульс сили.

Сила (момент) – векторна величина, служить мірою взаємодії тіл.

Момент сили - механічна величина, що характеризує зовнішню дію на тіло (або систему тіл) і визначає зміну обертального руху тіла.

Розтягуюча (стискуюча) сила характеризується напрямом вектора при взаємодії тіл: напрям до тіл - що стискує, від тіл - що розтягує.

Вигинаюча сила - дія зовнішніх сил, лежачих в різних площинах, що викликають вигин, наприклад, бруса.

Крутячий момент - дія сил, що викликають деформацію кручення, виражається твором сили на довжину.

Механічний зріз - руйнування при зрушенні однієї частини матеріалу відносно іншої в результаті дії сили. У найбільш чистому виді зріз здійснюється в поперечних перетинах при крученні порожнистих циліндрів з пластичних матеріалів.

Імпульс сили - векторна величина, що характеризує дію, що надається на тіло якою-небудь силою за деякий проміжок часу.

Шоста група - потік рідини.

Остання - шоста група - потік рідини, має лише один вид: перебіг потоку рідини.

3.5.3 Клас кліматичних і інших природних ЗВЧ

Другий клас - кліматичні та інші природні ЗВЧ включає десять груп, в яких 18 видів.

Перша група - атмосферний тиск і тиск інших газів.

Підрозділяється на два види ЗВЧ:

- тиск (підвищене, знижене);

- зміна тиску.

Атмосферний тиск і тиск інших газів - абсолютний тиск навколоземної атмосфери.

Газова оболонка, що оточує Землю і що обертається разом із Землею, називається атмосферою. Фізична атмосфера (атмосфера - позасистемна одиниця тиску) дорівнює

атмосферному тиску 760 мм рт. ст. і відповідає 101,325 кПа, менший тиск є зниженим, більше - підвищеним; перепад тиску в ту або іншу сторону називається зміною тиску.

Атмосферний тиск і тиск інших газів при величині 101,325 кПа називається нормальним.

Друга група - температура середовища.

Ця група - один з основних параметрів стану, що характеризує тепловий стан системи. Одиниця температури - Кельвін (К).

Дана група ЗВЧ, як і перша, містить два види:

- підвищена (знижена) температура середовища;
- зміна температури.

Тепловий удар - дія різкої зміни температури довкілля.

Третя група - вологість повітря або інших газів.

Підрозділяється як перша і друга на два види ЗВЧ:

- підвищена (знижена) вологість;
- зміна вологості.

Вологість повітря або інших газів - це вміст в повітрі водяної пари.

Вологість характеризується величинами:

- *абсолютна вологість повітря* - відношення маси водяної пари до об'єму повітря (г/м^3);
- *відносна вологість повітря при даній температурі* - відношення фактичної маси водяної пари, що міститься в повітрі, до максимально можливої (що насичує) маси його в даному об'ємі повітря при даній температурі (%).

Для середніх широт атмосфера вологість повітря в земній поверхні вагається в межах від 10 г/м^3 (влітку) до 3 г/м^3 (взимку). Найбільш сприятливі умови в середніх кліматичних зонах - відносна вологість повітря 40-60%. Зменшення або збільшення приведених величин є підвищенням або пониженням вологості повітря для даного періоду, в даній кліматичній зоні, а різниця величин, що характеризують вологість в період часу, є зміною вологості повітря.

Четверта група - атмосферні осідання.

Підрозділяється на два види:

- атмосферні випадні осідання (дош, сніг, град, снігова крупа, мряка);
- атмосферні осідання, що конденсують (роса, іній, паморозь, ожеледь).

Атмосферні випадні осідання - вода в рідкому і твердому стані, випадна з хмар.

Атмосферні осідання, що конденсують, - вода в рідкому і твердому стані, твірна на земній поверхні і на предметах, що знаходяться поблизу від неї, в результаті конденсації водяної пари, що знаходиться в повітрі.

П'ята група - туман.

Туман підрозділяється на міський і морський.

Морський туман - це конденсаційні аерозолі з рідкою дисперсною фазою морської води, що характеризується постійністю сольового складу, в якому масова доля іонів Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Br^- , CO_3^{2-} , F^- , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} складає 99,99%.

Шоста група - пил, пісок.

Шоста група - пил (пісок), аерозоль з твердою дисперсною фазою у виді пилу або піску має два види - статичний стан і динамічне.

Динамічний пил (пісок) надає абразивну дію на вироби і матеріали.

Сьома група - сонячне випромінювання.

Сонячне випромінювання підрозділяється на інтегральне і ультрафіолетове випромінювання. Основні характеристики сонячного випромінювання:

- довжина хвилі (спектру) випромінювання (мкм);
- щільність потоку випромінювання (Вт/м^2);
- кут нахилу сонячних променів до опромінюваної поверхні (...°).

Інтегральне сонячне випромінювання - випромінювання, відповідне всьому спектру частот (довжин хвиль) в межах від нуля до безкінечності.

Восьма група - потік повітря.

Вітер - потік повітря, рухомий з швидкістю вище 6 м/с.

Основні характеристики вітру:

- середнє значення швидкості вітру (м/с);
- максимальнє значення швидкості вітру (м/с);
- швидкість вітру в земної поверхні [м/с (бали)];
- швидкісний натиск вітру (Па);
- тривалість дії вітру (ч, доба);
- напрям дії вітру (...°) і ін.

Дев'ята група - середовище з корозійно-активними агентами.

Підрозділяється на три види ЗВЧ:

- атмосфера з корозійно-активними агентами;
- водне середовище з корозійно-активними агентами;
- ґрунтове середовище з корозійно-активними агентами.

Корозійно-активний агент доквілля - речовина, що знаходиться в атмосфері і наводить до прискорення процесів руйнування виробу за рахунок корозії. До таких речовин відносяться, наприклад, сірчистий газ, хлориди, нітрати, сульфати, і т.д.

Корозійно-активний агент ґрунтового середовища - речовина, що знаходиться в ґрунті і наводить до прискорення процесів руйнування об'єкту за рахунок корозії. До таких речовин відносяться, наприклад, хлориди, нітрид, сульфати, карбонати, гумус, продукти метаболізму і ін.

Ґрунт - породи землі, що є об'єктом інженерно-будівельної діяльності людини.

Десята група - льодово-снігове середовище.

Підрозділяється на два види:

- *лід*, який характеризується товщиною льоду (м), згуртованістю льоду (бал), здатністю льоду (Па), що несе, і тривалістю дії льоду (ч, доба);
- *сніговий покрив* - основні характеристики: товщина снігового покриву (см, м), середня щільність снігового покриву (кг/м³), тривалість дії снігового покриву (ч, доба).

3.5.4 Клас біологічних зовнішніх впливаючих чинників

Біологічний ЗВЧ - це організми або їх співтовариства, що надають зовнішні дії і зухвалі порушення справний і працездатний стани виробу.

Клас біологічних ЗВЧ підрозділяється на три групи.

Перша група - рослини (бактерії, гриби плісеневі, дріжджі, гриби дереворуйнівні, водорості, лишайники, вищі рослини).

Бактерії - мікроорганізми, що володіють клітинною оболонкою, але що не мають клітинного ядра, розмножуються простим діленням і сприяють руйнуванню об'єкту.

Гриби плісеневі - мікроорганізми, що розвиваються на металах, оптичних стеклах і інших матеріалах у виді оксамитового нальоту, виділяють органічні кислоти, сприяють руйнуванню об'єкту.

Друга група - безхребетні тварини (губки, черв'яки, моховатки, молюски, членистоногі, голкошкірі).

Третя група - хребетні тварини (плазуни, птиці, ссавці).

Обростателі - це організми, які селяться на кам'яних і технічних спорудах, усередині поверхні водяних систем, водозабірних труб, на підводних кабелях і тому подібне, що зменшують струм води у водопроводах, що знижують ефективність пристроїв, що охолоджують, і сприяють корозії металевих і бетонних споруд.

3.5.5 Клас радіаційних зовнішніх впливаючих чинників

Четвертий клас радіаційних ЗВЧ має одну групу - іонізуючі випромінювання, яка підрозділяється на чотири види:

- альфа- і бета-випромінювання;
- гамма-випромінювання і рентгенівське випромінювання;
- нейтронне, електронне і протонне випромінювання;

- випромінювання багатозарядних часток.

Перший вид іонізуючого випромінювання - це альфа- і бета- випромінювання.

Другий вид іонізуючих випромінювань - квантове (електромагнітне) випромінювання. До цього виду відносяться гамма-промені і рентгенівські промені. Гамма-промені мають дуже коротку довжину хвилі (менше 0,1 нм), що випускаються при радіоактивних перетвореннях і ядерних реакціях. Рентгенівські промені - короткохвильове електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі від 10^{-7} до 10^{-12} м. Рентгенівські промені можна отримати при бомбардуванні швидкими електронами позитивного електроду рентгенівської трубки (електровакуумний прилад), крім того, джерелом рентгенівських променів можуть бути деякі радіоактивні ізотопи, синхротрони і накопичувачі електронів. Ці промені викликають люмінесценцію (свічення) деяких речовин, володіють великою проникаючою здатністю.

Третій вид іонізуючих випромінювань - нейтронні, електронні і протонні.

Нейтрон - електрична нейтральна елементарна частка. Протон - стабільна елементарна частка з одиничним позитивним елементарним електричним зарядом. Протони є основним компонентом первинних космічних променів. Нейтрони і протони входять до складу всіх атомних ядер. Нейтрони викликають різні ядерні реакції, зокрема, ланцюгові. Електрон - стабільна елементарна частка з одиничним негативним елементарним електричним зарядом. Електрони входять до складу всіх атомних ядер і молекул і грають найважливішу роль в будові і властивостях речовин. Випромінювання, що несуть потоки протонів і інших часток, - це корпускулярне іонізуюче випромінювання.

3.5.6 Клас ЗВЧ електромагнітних полів

Клас ЗВЧ електромагнітних полів складається з двох груп і семи видів.

Перша група - електромагнітне поле.

Підрозділяється на чотири види:

- електричне поле, магнітне поле;
- низькочастотне поле;
- високочастотне, надвисокочастотне і лазерне випромінювання;
- електромагнітний імпульс.

Електромагнітне поле - одне з фізичних полів, за допомогою якого здійснюється взаємодія електрично заряджених часток або часток, що володіють магнітним моментом. Окремі випадки електромагнітного поля - чисте електричне поле, що створюється електричними зарядами, і чисте магнітне поле, що створюється нерухожими провідниками з постійними струмами або постійними магнітами. Електричне і магнітне поля є першим видом групи - електромагнітне поле.

Другий і третій вид групи розрізняють залежно від частоти поля - низькочастотне і високочастотне, включаючи лазерне випромінювання.

Лазерне випромінювання - електромагнітне хроматичне випромінювання видимого інфрачервоного і ультрафіолетового діапазону, засноване на вимушеній емісії випромінювання атомів і молекул.

Вимушене випромінювання - когерентне електромагнітне випромінювання, що виникає при вимушених переходах (співпадаюче по напрямку, частоті, фазі і поляризації з вимушеним випромінюванням).

Друга група - електричний струм.

Група містить види:

- *постійний струм*, не змінний в часі ні по силі, ні по напрямку;
- *змінний струм*, що періодично змінюється по силі і напрямку;
- *електричний імпульс струму* - короткочасна зміна електричної напруги або сили струму.

3.5.7 Клас ЗВЧ спеціальних середовищ

Шостий клас - ЗВЧ спеціальних середовищ - це середовище (окрім повітря) зовнішнє по відношенню до об'єкту або заповнюючи його внутрішній об'єм. Клас містить чотири групи.

Спеціальне середовище - неорганічні і органічні з'єднання, масла, мастила, розчинники, палива, робочі розчини, робочі тіла, зовнішні по відношенню до об'єкту, які викликають або можуть викликати обмеження або втрату працездатного стану об'єкту в процесі експлуатації.

Перша група - кислотно-лужне і нейтральне середовища.

Містить один вид: неорганічні і органічні хімічні сполуки.

Неорганічні хімічні з'єднання - будь-які хімічні елементи і їх з'єднання, без з'єднань вуглецю (окрім деяких найбільш простих), до їх числа відносяться кислоти, солі, оксиди, сульфідні, нітриди, карбідні, галогенідні та інші.

Органічні хімічні з'єднання - це з'єднання вуглецю, що має здатність з'єднуватися з більшістю елементів і утворювати молекули самого різного складу і будови, зокрема, це різні кислоти, спирти, синтетичні фарбники і т.д.

Друга група - масла і мастила.

Містить один вид: масла і мастила на основі нафтопродуктів і синтетичні, отримувані синтезом з органічних сполук.

Третя група - палива.

Має два види:

- палива на основі нафтопродуктів (бензин, лігроїн, гас і ін.) і спирти;

- компоненти ракетного палива (рідкий водень, тетроксид азоту, рідкий кисень і т.д.).

Четверта група - спеціальні середовища.

Група «Спеціальні середовища» (назва аналогічно найменуванню класу) містить п'ять видів:

- випробувальні середовища, робочі середовища і середовища заповнення;

- робочі розчини (дезінфікуючі, дегазуючі, такі, що дезактивують і стерилізують);

- робочі тіла;

- отруйливі речовини;

- радіоактивні аерозолі.

Перший вид - це випробувальні середовища, робочі середовища і середовища заповнення, тобто середовища, що впливають на об'єкт при проведенні випробувань, а також службовці для заповнення об'єму в якому він експлуатується. До спеціальних середовищ в можна віднести гальмівні рідини, антифризи і ін.

Випробувальне середовище - спеціальне середовище, що впливає на об'єкт при проведенні контрольних випробувань.

Середовище заповнення - середовище, використовуване для заповнення об'єму, в якому експлуатується об'єкт.

До *другого виду* відносяться робочі розчини - спеціальні середовища, що є розчином органічних або неорганічних речовин, вживаних для дезінфекції, дезактивації, стерилізації і дегазації.

Третій вид - робочі тіла - це спеціальні середовища для передачі енергії або перетворення одного виду енергії в іншу.

Робоче тіло - газоподібна або рідка речовина, за допомогою якої здійснюється перетворення якої-небудь енергії при здобутті холоду, тепла або механічної роботи.

Четвертий вид - отруйливі речовини, тобто отруйні (токсичні) з'єднання, що викликали масове ураження живої сили і руйнування об'єкту, що наводять до прискорення процесів, за рахунок корозії. Це можуть бути отруйливі речовини: отруйні, шкіряно-навивні, задушливої, дратівливої, хімічної дії.

П'ятий вид - радіоактивні аерозолі.

Аерозоль - колоїдна система, що складається з газового середовища, в якому зважені тверді або рідкі частки. Радіоактивний аерозоль - аерозоль, до складу дисперсної фази якого входять радіонукліди. Радіоактивні аерозолі утворюються при техногенних катастрофах на атомних станціях.

3.5.8 Клас термічних зовнішніх впливаючих чинників

Сьомий клас - термічні ЗВЧ - містить дві групи:

- тепловий удар;
- нагріваючи.

Тепловий удар - це дія різкої зміни температури довкілля на об'єкт, яке може привести до високої температурної напруги, що викликає деформацію і руйнування.

Перша група - тепловий удар має один вид ЗВЧ - світлове випромінювання вибуху. Відомо, що вибух - процес звільнення великої кількості енергії в обмеженому об'ємі за короткий проміжок часу. В результаті вибуху речовина, що заповнює об'єм, перетворюється на сильно нагрітий газ з дуже високим тиском, при цьому в довкіллі утворюється і поширюється хвиля, що несе і тепловий удар.

Друга група - нагріваючи - складається з чотирьох видів:

- аеродинамічний нагрів;
- нагріваючи тертям;
- нагріваючи тепловим потоком;
- полум'я.

Перший вид - аеродинамічний нагрів - нагріваючи поверхні об'єкту при русі в атмосфері. Аеродинамічний нагрів особливо помітний при русі з надзвуковою швидкістю і є наслідком переходу кінетичної енергії об'єкту, гальмівного атмосферою, в теплову енергію газу, оточуючого об'єкт.

Аеродинамічний нагрів - нагрівання об'єкту газом поверхні тіла, рухомого в газовому середовищі з великою швидкістю за наявності конвективного, а при ультразвукових швидкостях і радіаційного теплообміну з газовим середовищем в пограничному або ударному шарі.

Радіаційне розігрівання - підвищення температури конструктивних елементів об'єкту, що опромінюються іонізуючим випромінюванням, в результаті перетворення поглиненою матеріалами цього об'єкту енергії випромінювання в теплову енергію.

Електричне розігрівання - підвищення температури конструктивних елементів об'єкту під впливом електричного поля, в результаті перетворення електричної енергії на теплову енергію.

Ультразвукове розігрівання - підвищення температури конструктивних елементів об'єкту під впливом ультразвуку, в результаті перетворення енергії ультразвукових коливань на теплову енергію.

Другий вид - нагріваючи тертям, тобто нагріваючи із-за зовнішньої механічної взаємодії між твердими тілами, яка виникає в місцях їх зіткнення. Кінематичне тертя, а інакше тертя між рухомими деталями апарата, викликає нагрів частин механізму, що труться.

Третій вид - тепловий потік - це потік енергії (тепловий), що переноситься в процесі теплообміну (променистого або конвективного).

Четвертий вид - полум'я - видимий результат горіння. Горіння - складне швидкопротікаюче хімічне перетворення, що супроводиться виділенням теплоти і світла.

Питання для самоперевірки

1. Що розуміється під зовнішнім впливаючим чинником?
2. Який вплив ЗВЧ роблять на працездатність і стан об'єкту?
3. Яке значення ЗВЧ називається нормальним, а яке - номінальним?
4. Поясніть термін «граничне робоче значення ЗВЧ».
5. Що розуміється під терміном «ефективне значення ЗВЧ»?
6. Яким показником характеризується властивість об'єкту зберігати працездатний стан в час і після дії на нього певного ЗВЧ протягом всього терміну служби в межах заданих значень?
7. Що характеризує показник «стійкість об'єкту до ЗВЧ»?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

Основна література

1. Грушко И.М., Сиденко В.М.. Основы научных исследований. - Харьков: Вища школа, 1983. - 224 с.
2. Основы научных исследований / Глущенко И.М., Пинскер А.Е., Полянчиков О.И., Трикило А.И. / Под ред. И.М. Глущенко. - Киев: Вища школа, 1983. - 158 с.
3. Основы научных исследований в черной металлургии / Под ред. Ю.Н. Яковлева. – Киев-Донецк: Вища школа, 1985. - 205 с.
4. Основы научных исследований: Теплоэнергетика / Дикий Н.А., Халатов А.А.; под ред. Г.М. Доброва. - К.: Вища школа, 1985. - 223 с.
5. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. - 670 с.
6. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. - М.: «Наука», 1978. - 352 с.
7. Зайченко Ю.П., Шумилова С.А. Исследование операций: Сборник задач. – 2-е изд., перераб. и доп. - К.: Вища школа, 1990. - 239 с.
8. Конаков П.К. Теория подобия и ее применение в теплотехнике. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 208 с.
9. Турчак Л.И. Основы численных методов: Учеб. пособие. - М.: Наука, 1987. - 320 с.
10. Безуглый В.Ю., Беляев Н.М. Численные методы теории конвективного теплообмена. - М.-Киев-Донецк: Вища шк., 1984. - 176 с.
11. Семененко М.П. Методы обработки и анализа измерений в научных исследованиях. - Киев; Донецк: Вища школа, 1983. - 240 с.
12. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - М.: Наука, 1968.
13. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. - М.: Мир, 1980.
14. Закс Ш. Теория статистических выводов. - М.: Мир, 1975.
15. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия. - М.: Финансы и статистика, 1982.
16. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. - М.: Наука, 1968.
17. Шальгин А.С., Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования. - М.: Машиностроение, 1986.
18. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. - М.: Наука, 1980.

Додаткова література

19. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. - М.: Логос, 2001.
20. Аронов И.З., Бурдасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1987.
21. Беляев Ю.К. Статистические методы обработки результатов испытаний на надежность. - М.: Знание, 1982.
22. Городецкий В.И. Элементы теории испытаний и контроля технических систем. - Л.: Энергия, 1978.
23. ДСТУ 16504-81. Испытание и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

24. ДСТУ 25051.2-82. СГИП. Представление, обработка, оценка точности и оформление результатов испытаний. Общие требования.
25. ДСТУ 8.061-80. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
26. ДСТУ 8.401-80. Классы точности средств измерений. Общие требования.
27. Испытательная техника. Справочник: В 2 кн. / Под ред. В.В. Ключева. - М.: Машиностроение, 1982.
28. Макгомери Д.И. Планирование эксперимента и анализ данных. - Л.: Судостроение, 1980.
29. Надежность и эффективность в технике. Справочник: В 10 т. Т. 6: Экспериментальная отработка и испытания / Под ред. Р.С. Судакова и О.И. Тескина. - М.: Машиностроение, 1989.
30. Натурный эксперимент / Под ред. Н. И. Баклашева. - М.: Радио и связь, 1982.
31. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. - М.: Наука, 1971.
32. Судаков Р.С. Избыточность и объем испытаний технических систем и их элементов // Испытания технических систем и их элементов. - М.: Знание, 1980.
33. Судаков Р.С. Теория испытаний. - Киев: Изд-во МО СССР, 1985.
34. Судаков Р.С. Испытания технических систем. - М.: Машиностроение, 1988.
35. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / Под ред. Р. М. Юсупова. - Л.: Энергия, 1978.