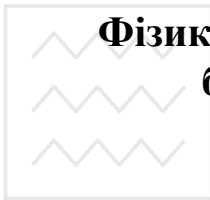




Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Міністерство освіти і науки, молоді  
та спорту України  
Національний університет водного  
господарства та природокористування

**І.Г. Скрипник**



**Фізико-хімічні методи досліджень  
будівельних матеріалів**

**Лабораторний практикум**

*Для студентів напрямку підготовки 6.060101 «Будівництво»*

Рівне - 2011



Національний університет

УДК 691:544.016 (075.8)

ББК 24.46:38.3я73

C45

*Затверджено вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування  
(Протокол №11 від 26.11.2010р.)*

#### **Рецензенти:**

*Дворкін Л.Й.*, доктор технічних наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування;

*Джунь Й.В.*, доктор фізико-математичних наук, професор Міжнародного університету „РЕГІ“ ім. С. Дем'янчука;

*Зачек І.Р.*, кандидат фізико-математичних наук, доцент Національного університету «Львівська політехніка».

#### **Скрипник І.Г.**

**C45** Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів.

Лабораторний практикум. – Рівне: НУВГП, 2011.- 186с.

В практикумі приведено основи експериментальних досліджень, необхідні методичні вказівки до виконання лабораторних робіт, завдання на їх виконання, форми таблиць для отримання результатів досліджень та їх обробки, і передбачає не тільки засвоєння методів випробувань, досліджень, а й виконання певної експериментально-аналітичної роботи, результатом якої є оцінка якісних показників матеріалів і впливу на них різних факторів. Головною метою таких робіт є ознайомлення з напрямками і оволодіння методами покращення властивостей будівельних матеріалів, ресурсозбереження при розробці і виробництві ефективних матеріалів.

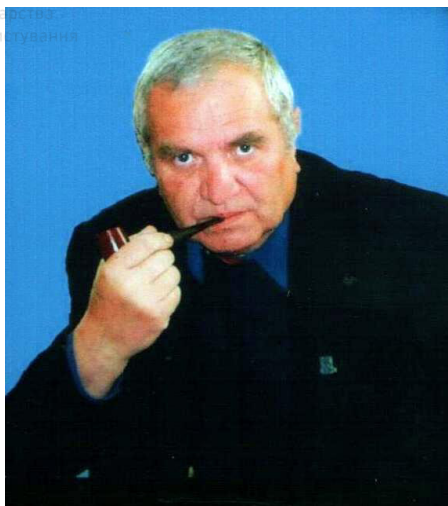
Лабораторний практикум навчально-методичного забезпечення дисципліни розрахований на студентів вищих навчальних закладів бакалаврського рівня підготовки за напрямом 6.060101 «Будівництво», які вивчатимуть дисципліну «Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів» в умовах кредитно-трансферної системи організації навчального процесу.

**УДК 691:544.0.16 (075.8)**

**ББК 24.46:38.3я73**

© Скрипник І.Г., 2011

© НУВГП, 2011



## Скрипник Ігор Гаврилович

Народився 25 листопада 1946 р. в Здолбунові. Закінчив в 1964 р. середню школу №2, а в 1970 р. фізичний факультет Львівського ордена Леніна державний університет ім. Івана Франка. В 1986 р. захистив дисертаційну роботу в Інституті хімії АН УзРСР (Ташкент).

Фізик, кандидат хімічних наук, винахідник СРСР, журналіст, доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства та кафедри екології Національного університету водного господарства та природокористування (Рівне), керівник навчально-науково-виробничого комплексу «ТЕХНОЛОГ» та ряду технічних секцій міської і обласної МАН України, відповідальний з питань інтелектуальної власності та винахідницької роботи. Головний редактор газети «Еврика» та член редакційної колегії науково-виробничого журналу «Енергозбереження Полісся», відповідальний за профорієнтаційну роботу, куратор академічної групи студентів, учасник ліквідації наслідків аварії потягу із жовтим фосфором на перегоні Ожидів-Броди Львівської залізниці (2007 р.), «Людина року – 2004».

Опублікував понад 200 робіт, в тому числі підручник «Технологія полімерних будівельних матеріалів», посібник «Фізико-хімічні і



фізичні методи досліджень будівельних матеріалів», Інтерактивний комплекс та лабораторний практикум з дисципліни «Фізико-хімічні і фізичні методи досліджень будівельних матеріалів». Одержав 28 авторських свідоцтв та патентів на винаходи. Брав участь в 12 Курнаковських читаннях з фізико-хімічного аналізу (Інститут загальної і неорганічної хімії ім. М.С. Курнакова АН СРСР та Росії) та у багатьох Всесоюзних і міжнародних науково-практичних конференціях.

Сфера наукової діяльності: фізико-хімічні і фізичні методи досліджень в технології неорганічних і органічних речовин, матеріалознавстві та техніко-технологічні пристрої (електромагнітні фільтри, установки та апарати, прилади контролю якості матеріалів, електро- та термотехнічні пристрої, зокрема плазмотрон, «АПИОНь»); фізико-хімічні основи технології виробництва аміачної селітри, поліфосфатів і нітратполіфосфатів амонію, амофосу, нітроамофоски, карбомідо-формальдегідних та складних полімерних добрив; полімеризація в низькотемпературній плазмі; очищення дистильованої води, відновлення і зміцнення деталей машин і механізмів методом газополум'яної обробки їх поверхні металевими сплавами, екологія оточуючого середовища; фізико-хімічні і фізичні методи досліджень властивостей матеріалів, технологія полімерних будівельних матеріалів, зокрема, карбамідо-формальдегідного поропласту «Міпора» (Піноізол-Р) та ін..

Вихованці та учні середніх навчальних закладів м. Рівного і області та студенти університету мають патенти України на винаходи і корисні моделі, публікації в наукових журналах та виданнях, займають призові місця і стають переможцями та призерами на міських, обласних, Всеукраїнських та Міжнародних конкурсах-захистах науково-дослідницьких робіт учнів-членів Малої академії наук України, переможці Міжнародної школи-семінару «Спектроскопія молекул і кристалів» (2007 р.) стали «Студентами року – 2007, 2008, 2009» у номінації «Науковець» та «Комп'ютерний геній» і абсолютний переможець Всеукраїнського конкурсу юних раціоналізаторів та винахідників «Природа-людина-виробництво-екологія» (секція «Фізика» (2010 р.), переможець у національному етапі Міжнародного конкурсу науково-технічної творчості школярів Intel ІЕКО – 2010 (категорія «Фізика»), переможець конкурсу фонду



### **Василь Більчук**

Призер конкурсу-захисту науково-дослідницьких робіт учнів Малої академії наук України, нагороджений золотою медаллю після закінчення Здовбицької ЗОШ, срібною медаллю ім. Гулі Корольової навчально-науково-виробничого комплексу «ТЕХНОЛОГ» (2007р.), призер «Студент року - 2008» та переможець «Студент року - 2009» в номінації «Науковець», переможець конкурсу фонду Святослава Вакарчука «Люди майбутнього» в проєкті «Освіта країною - 2010». До творчих здобутків належать 2 патенти України на корисну модель та 9 наукових публікацій.



### **Олександр Вовк**

Пошукач вченого ступеня кандидата технічних наук при кафедрі технології будівельних виробів та матеріалознавства ФБА НУВГП. До творчих здобутків належить 1 патент на винахід та 5 патентів на корисні моделі України і 10 наукових публікацій.



<b>Передмова</b> .....	10
<b>Розділ 1. Основи експериментальних досліджень</b> .....	13
<b>1. Методичні рекомендації до самостійної роботи</b> .....	13
<b>2. Фізичні величини та одиниці вимірювання</b> .....	16
2.1. Основні поняття .....	16
2.2. Системи фізичних одиниць .....	20
2.2.1. Система СГС .....	20
2.2.2. Система МКГСС .....	21
2.2.3. Система МТС .....	22
2.2.4. Абсолютна практична система електричних одиниць .....	22
2.2.5. Позасистемні одиниці .....	23
2.3. Міжнародна система одиниць .....	23
2.4. Основні одиниці системи СІ .....	25
2.5. Похідні одиниці системи СІ .....	26
2.6. Кратні та частинні одиниці .....	26
<b>3. Похибки вимірювань</b> .....	28
3.1. Загальні поняття та визначення .....	28
3.2. Абсолютні, відносні та приведені похибки вимірювань фізичної величини .....	29
3.3. Обчислення похибок прямих вимірювань .....	32
3.4. Уникнення чи врахування систематичних і обчислення випадкових похибок вимірювання фізичних величин .....	34
3.5. Моменти випадкових похибок .....	39
3.6. Оцінка істинного значення вимірюваної величини .....	45
3.7. Математична обробка результатів вимірювань .....	49
3.8. Додавання випадкових і систематичних похибок вимірювання фізичних величин .....	52
3.9. Обчислення похибок непрямих вимірювань фізичних величин .....	54
3.10. Похибки табличних величин .....	57
3.11. Правила наближених обчислень .....	58
3.12. Правила округлення результатів вимірювань і похибок дослідів .....	60
3.13. Графічне зображення результатів експерименту .....	62
3.14. Застосування методу найменших квадратів для обробки результатів вимірювання .....	64



<b>4. Метод математичного планування експерименту</b> .....	67
4.1. Основні положення та визначення .....	68
4.2. Обробка одержаних результатів експериментальних досліджень властивостей матеріалів .....	71
4.2.1. Визначення статистичних характеристик вибірки.....	71
4.2.2. Кореляція і рівняння регресії .....	75
4.2.3. Дослідження технологічних процесів за допомогою регресивного аналізу .....	77
4.3. Побудова математичних моделей .....	80
<b>Розділ 2. Лабораторний практикум</b> .....	88
<b>5. Лабораторні роботи, контрольні запитання, базова література</b> 88	
5.1. Лабораторна робота № 1. Седиментаційний метод визначення дисперсного складу матеріалів.....	88
5.1.1. Седиментаційний метод визначення дисперсного складу матеріалів.....	88
5.1.2. Опис експериментальної установки .....	92
5.1.3. Хід роботи.....	92
5.1.4. Порядок обробки результатів вимірювань .....	93
5.1.5. Контрольні запитання .....	94
5.1.6 Література .....	95
5.2. Лабораторна робота № 2 Визначення питомої поверхні дисперсних матеріалів.....	95
5.2.1. Визначення питомої поверхні дисперсних матеріалів ....	95
5.2.2. Суть методу та опис приладу ПСХ-2. Робоча формула ...	96
5.2.3. Завдання .....	99
5.2.4. Хід роботи.....	99
5.2.5. Контрольні запитання .....	100
5.2.6. Література .....	101
5.3. Лабораторна робота № 3. Визначення густини і пористості твердих тіл.....	103
5.3.1. Визначення густини і пористості твердих тіл .....	103
5.3.2 Визначення істинної густини твердих тіл за допомогою пікнометра .....	106
5.3.3. Хід роботи.....	107
5.3.4. Визначення середньої густини твердих тіл за допомогою гідростатичного зважування.....	108
5.3.5. Хід роботи.....	109
5.3.6. Визначення пористості твердих тіл.....	110



5.3.7. Хід роботи.....	111
5.3.8. Контрольні запитання.....	112
5.3.9. Література.....	112
5.4 Лабораторна робота № 4. Визначення показників пористості матеріалів за кінетикою їх водопоглинання.....	113
5.4.1. Визначення показників пористості матеріалів за кінетикою їх водопоглинання.....	113
5.4.2. Опис експериментальної установки.....	116
5.4.3. Хід роботи.....	116
5.4.4. Порядок обробки результатів вимірювань.....	117
5.4.5. Контрольні запитання.....	118
5.4.6. Література.....	119
5.5. Лабораторна робота № 5. Визначення в'язкості лаків, фарб та модельних розчинів.....	119
5.5.1. В'язкість рідин та метод визначення умовної в'язкості речовин у рідкому стані.....	119
5.5.2. Опис експериментальної установки.....	121
5.5.3. Завдання №1. Хід роботи.....	122
5.5.4. Обробка результатів вимірювань.....	123
5.5.5. Завдання № 2. Хід роботи.....	123
5.5.6. Обробка результатів вимірювань.....	124
5.5.7. Контрольні питання.....	125
5.5.8. Література.....	126
5.6. Лабораторна робота № 6. Дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем.....	126
5.6.1. Дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем.....	126
5.6.2. Опис експериментальної установки.....	129
5.6.3. Варіанти завдань.....	131
5.6.4. Хід роботи.....	132
5.6.5. Обробка результатів вимірювань.....	133
5.6.6. Контрольні запитання.....	134
5.6.7. Література.....	135
5.7. Лабораторна робота № 7. Визначення граничної напруги зсуву формовочних мас конічним пластоміром.....	135
5.7.1. Визначення граничної напруги зсуву формовочних мас конічним пластоміром.....	135
5.7.2. Опис експериментальної установки.....	137





5.7.3. Хід роботи.....	137
5.7.4. Контрольні запитання.....	138
5.7.5. Література.....	138
<b>6. Типові тести.....</b>	<b>139</b>
6.1. Тема: "Седиментаційний метод визначення дисперсного складу матеріалів".....	139
6.2. Тема: "Визначення питомої поверхні дисперсних матеріалів".....	139
6.3. Тема "Визначення густини і пористості твердих тіл".....	140
6.4. Тема: "Визначення показників пористості матеріалів за кінетикою їх водопоглинання".....	141
6.5. Тема: "Визначення в'язкості лаків, фарб та модельних розчинів".....	142
6.6. Тема: "Дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем".....	142
6.7. Тема: "Визначення граничної напруги зсуву формовочних мас конічним пластоміром".....	143
<b>7. Структура звіту виконаної лабораторної роботи.....</b>	<b>144</b>
<b>8. Надання першої допомоги.....</b>	<b>145</b>
8.1. Надання першої допомоги при ураженні електричним струмом.....	145
8.2. Перша допомога при пораненні.....	145
8.3. Перша допомога при опіках кислотами і лугами.....	146
8.4. Перша допомога при опіках.....	146
<b>9. Методичне забезпечення.....</b>	<b>147</b>
<b>10. Рекомендована література.....</b>	<b>147</b>
<b>11. Інформаційні ресурси.....</b>	<b>149</b>
<b>12. Термінологічний словник.....</b>	<b>150</b>
<b>Додатки.....</b>	<b>153</b>
<b>В лабораторії фізико-хімічних і фізичних досліджень властивостей будівельних матеріалів (фотоілюстрації).....</b>	<b>187</b>



## ПЕРЕДМОВА

Приєднання України до Болонського процесу та інтеграція до єдиного європейського простору вищої освіти передбачає приведення стандартів викладання у вітчизняних вищих навчальних закладах у відповідність до сучасних вимог європейської освіти шляхом впровадження Європейської кредитно-трансферної системи.

Інноваційна організація навчального процесу за європейським зразком передбачає навчання студента за індивідуальним планом, розрахованим на його здібності та можливості. Така система включає значний обсяг самостійної роботи, яка повинна мати відповідне методичне забезпечення з кожної навчальної дисципліни.

Розробка технології виготовлення ефективних будівельних конструкцій, виробів і матеріалів передбачає встановлення взаємозв'язку між їх складом, структурою та властивостями, оптимізацію складу вихідної сировини і фізико-хімічних процесів її обробки. Залежно від поставленої мети використовують ті або інші інструментальні фізико-хімічні методи досліджень матеріалів на атомно-молекулярному, субмікроскопічному, мікроскопічному та макроскопічному рівнях.

Використання фізико-хімічних методів досліджень спрямоване на вивчення основних закономірностей, технологічних процесів, складу сировинних сумішей і готових продуктів, що дозволяють прогнозувати експлуатаційні властивості кінцевого продукту і виготовляти у промисловості будівельні матеріали з наперед заданими фізико-механічними і фізико-хімічними властивостями на основі використання ресурсозберігаючих технологій. Дослідження властивостей матеріалів на сучасному науковому рівні ґрунтуються не на даних одного будь-якого методу досліджень, навіть самого сучасного, а на даних комплексу незалежних методів. Тільки такий підхід до вивчення досліджуваного об'єкту виключає однобічність досліджень і гарантує достатню надійність одержаних результатів.

В лабораторному практикумі приведено основи експериментальних досліджень, викладено методи визначення дисперсного складу сипучих матеріалів, питомої їх поверхні, істинної та середньої густини, пористості – відкритої, закритої та загальної, а також показників пористості, умовної в'язкості речовин в рідкому стані та



на прикладі модельних розчинів із використанням методу математичного планування експерименту, дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем, граничної напруги зсуву формовочних мас.

Поглиблене вивчення і творче засвоєння навчального матеріалу дисципліни вирішується при умові засвоєння фундаментальних предметів (теорії, навиків практичних занять, лабораторного практикуму), а саме: фізики, хімії, теоретичних основ будівельного матеріалознавства, як складової частини будівельного матеріалознавства, будівельних матеріалів та інших дисциплін.

В практикумі наведені необхідні методичні вказівки до виконання лабораторних робіт, завдання на їх виконання, форми таблиць для отримання результатів досліджень та їх обробки, і передбачає не тільки засвоєння методів випробувань, досліджень, а й виконання певної експериментально-аналітичної роботи, результатом якої є оцінка якісних показників матеріалів і впливу на них різних факторів. Головною метою таких робіт є ознайомлення з напрямками і оволодіння методами покращення властивостей будівельних матеріалів, ресурсозбереження при розробці і виробництві ефективних матеріалів.

При складанні лабораторного практикуму використаний багаторічний досвід проведення навчально-методичної та науково-дослідницької роботи на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства та кафедри фізики.

Даний практикум базується на навчально-методичних матеріалах, представлених посібником Дворкін Л. Й., Скрипник І. Г. «Фізико-хімічні і фізичні методи досліджень будівельних матеріалів». – Рівне: НУВГП, 2006. - 220с., конспектом лекцій Скрипник І. Г. «Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів». – Рівне: УДАВГ, 1998. – 64с., методичними вказівками до виконання лабораторних робіт Скрипник І. Г. – Рівне: УДАВГ, 1996. – 47с., завдання до виконання контрольної роботи Дворкін Л. Й., Скрипник І. Г. – Рівне: УДАВГ, 1997. – 7с. із даної дисципліни (відповідно № 059-72 і 059-85).

Лабораторний практикум навчально-методичного забезпечення розрахований на студентів вищих навчальних закладів бакалаврського рівня підготовки, які будуть вивчати дисципліну «Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів».



Національний університет

водного господарства

та природокористування

У підготовці лабораторного практикуму брали участь студенти спеціальності «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів» факультету будівництва і архітектури Національного університету водного господарства та природокористування Більчук В.О., Левченко Л. А., Марчук В. П., Шарабура І.А. та Покотилець Т.С., а також випускник за цією спеціальністю, інженер першої категорії Вовк О. В. за що автор висловлює свою вдячність.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



# РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Час відведений навчальним планом на вивчення дисципліни «Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів» передбачає самостійну роботу студентів (СРС), яка включає опрацювання лекційного матеріалу з кожної теми і відповідної рекомендованої літератури для більш ґрунтовного засвоєння найбільш важливих питань із наступним використанням набутих знань для підготовки і виконання лабораторних робіт та здачі змістових модулів. З цією метою після кожної лабораторної роботи приведено контрольні запитання і список рекомендованої літератури. Окремо наведено тести за темами змістових модулів, на що також потрібно звернути увагу.

В методологічному плані постановка і самостійне виконання лабораторних робіт курсу з використанням знань теоретичного матеріалу дозволяє одержати уміння та здатність вирішувати конкретні технологічні задачі, де кожна лабораторна робота є фрагментом експериментальної науково-дослідної роботи із можливістю використання багатofакторних завдань. Крім того, в певних випадках пропонується застосовувати метод математичного планування експерименту на основі використання типових матриць, в яких приводиться набір комбінацій факторів, що симетрично варіюються відносно деякого початку координат або нульового рівня.

Набуті таким чином уміння використання фізико-хімічних методів досліджень спрямовані на вивчення основних закономірностей технологічних процесів, що дозволяє прогнозувати експлуатаційні властивості кінцевого продукту і виготовляти у промисловості будівельні матеріали з наперед заданими фізико-механічними і фізико-хімічними властивостями на основі ресурсозберігаючих технологій.

При розрахунках, що враховують властивості матеріалів, необхідно добре орієнтуватись в їх розмірностях, що відображають зв'язок з основними величинами системи одиниць виміру. В міжнародній системі одиниць (СІ) в якості основних прийняті наступні одиниці: метр (м) – одиниця довжини; кілограм (кг) – одиниця маси; секунда (с) – одиниця часу; ампер (А) – одиниця сили струму;



градус Кельвіна (К) - одиниця термодинамічної температури; кандела (кд) – сила світла, і моль – кількість речовини. Іноді зручніше застосовувати одиниці більші (кратні) або менші (часткові). Їх утворюють множенням початкових одиниць на число 10 взяте у відповідній степені. Назва одиниць при цьому набуває відповідної приставки (табл.1).

Таблиця 1

Приставка	Позначення	Множник	Приставка	Позначення	Множник
Тера	T	$10^{12}$	Санти	c	$10^{-2}$
Гіга	G	$10^9$	Мілі	m	$10^{-3}$
Мега	M	$10^6$	Мікро	мк	$10^{-6}$
Кіло	k	$10^3$	Нано	н	$10^{-9}$
Гекто	г	$10^2$	Піко	п	$10^{-12}$
Дека	да	$10^1$	Фемто	ф	$10^{-15}$
Деци	д	$10^{-1}$	Ато	а	$10^{-18}$

### Латинський алфавіт

друковані букви		рукописні букви		назва	друковані букви		рукописні букви		назва
A	a	А	a	а	N	n	ℒ	n	ен
B	b	В	b	бе	O	o	О	o	о
C	c	С	c	це	P	p	Р	p	пе
D	d	Д	d	де	Q	q	Q	q	ку
E	e	Е	e	е	R	r	℞	r	ер
F	f	ℱ	f	еф	S	s	S	s	ес
G	g	ℊ	g	ге (же)	T	t	ℤ	t	те
H	h	ℋ	h	ха (аш)	U	u	U	u	у
I	i	ℐ	i	і	V	v	ℴ	v	ве
J	j	ℐ	j	йот (жі)	W	w	ℴ	w	дубль-ве
K	k	℔	k	ка	X	x	ℵ	x	ікс
L	l	ℒ	l	ель	Y	y	ℷ	y	ігрек
M	m	ℓ	m	ем	Z	z	ℸ	z	зет

### Грецький алфавіт

Αα	альфа	Nν	ню (ні)
Ββ	бета	Ξξ	ксі
Γγ	гамма	Οο	омікрон
Δδ	дельта	Ππ	пі
Εε	епсілон	Ρρ	ро
Ζζ	дзета	Σσ	сігма
Ηη	ета	Ττ	тау
Θθ	тега	Φφ	фі
Ιι	йота	Χχ	хі
Κκ	каппа	Υυ	юпсілон (іпсілон)
Λλ	ламбда	Ψψ	пі
Μμ	мю (мі)	Ωω	омега





## 2. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ

Д.І. Менделєєв зазначав, що «Наука починається ... с тех пор, когда начинают измерять; точная наука немыслима без измерений».

### 2.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Об'єкти матеріального світу характеризують фізичними величинами. **Фізична величина** - це значення вимірювальної величини (об'єкту) спільна в якісному відношенні для фізичних систем, їхніх станів і процесів, що в них відбуваються, але в кількісному відношенні індивідуальна для кожного об'єкта. Фізичними величинами є маса, довжина, сила, тиск, температура, теплота тощо. Конкретні реалізації тієї самої величини називають **однорідними величинами**. Однорідні величини відрізняються одна від одної розміром. **Розмір фізичної величини** - це кількісний вміст у даному об'єкті властивості, яка відповідає поняттю "фізична величина". Розміри однорідних фізичних величин різних об'єктів порівнюють між собою, якщо відомі значення цих величин. **Значенням фізичної величини** називається оцінка фізичної величини за допомогою деякого числа прийнятих для неї одиниць. **Одиниця фізичної величини** - це фізична величина, якій за означенням надано числове значення, що дорівнює одиниці. Абстрактне число, яке виражає відношення значення величини до відповідної одиниці цієї фізичної величини, називається **числовим значенням величини**.

Розрізняють істинне та дійсне значення фізичної величини.

**Істинне значення фізичної величини** - це значення величини, яке ідеально відобразило б в якісному та кількісному відношеннях відповідну властивість об'єкта. Істинне значення не залежить від засобів нашого пізнання і є абсолютною істиною до якої наближається спостерігач, намагаючись виразити її як числове значення.

**Дійсне значення фізичної величини**, яке знайдене експериментально і настільки наближається до істинного значення, що для даної цілі може бути використаним замість нього.





Знаходження значень фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів називають **вимірюванням** - це одна з найдавніших операцій, що їх виконує людина в процесі пізнання матеріального світу.

**Засоби вимірювання** - це ті технічні засоби, які використовуються для вимірювань і мають нормовані метрологічні властивості і поділяються на міри, вимірювальні прилади, вимірювальні установки.

**Міра** - це засіб вимірювання, призначений для того, щоб відтворити значення величини заданого розміру. Наприклад: гиря - міра маси, лінійка - міра довжини.

**Вимірювальні прилади:** лінійка, штангенциркуль, мікрометр, терези, нуль-індикатор, амперметр, вольтметр, хімічний циліндр, мірна колба, пікнометр та ін.. Прикладом **вимірювальної установки** можуть бути містки Уїтстона, Кольрауша, Шеринга, Максвелла та ін..

**Виміряти фізичну величину** - це значить порівняти її з однорідною величиною, взятою за одиницю вимірювання. Вимірювання бувають прямі і непрямі.

**Прямі вимірювання** - це вимірювання, які отримуються безпосередньо за шкалою вимірювального приладу. Наприклад: визначити довжину – лінійкою, рулеткою, штангенциркулем; час – годинником, секундоміром; опір - омметром тощо.

**Непрямі вимірювання** - це вимірювання, що визначаються за формулою закону чи іншою встановленою залежністю.

**Розмір фізичної величина** – це кількісний вміст фізичної величини в об'єкті. За характером взаємозалежності фізичні величини поділяються на основні і похідні. Наприклад - Міжнародна система СІ (7 основних, 2 додаткових та багато похідних одиниць).

**Основна фізична величина** - це фізична величина, що входить у систему і умовно прийнята за незалежну від інших величин цієї системи (наприклад: маса – 1 кг, довжина – 1м, час – 1с).

**Похідна фізична величина** - це фізична величина, що входить у систему і визначається через основні величини цієї системи (наприклад: швидкість, м/с; прискорення, м/с<sup>2</sup>; сила, кг·м/с<sup>2</sup>; робота, енергія, теплота, Дж=кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>).

**Розмірність фізичної величини** – це вираз, що відображає її зв'язок з основними величинами системи одиниць.



**Розмірність основної величини** – це умовний символ фізичної величини в одній системі одиниць. Наприклад, розмірність часу записується:  $\dim [t]=T$ ; де  $\dim$  – скорочено **dimension**, розмірність.

**Розмірність похідної величини** - це добуток розмірностей основних величин, піднесених до відповідних ступенів. Наприклад, розмірність швидкості

$$V = \frac{l}{t}; \quad \dim\left[\frac{l}{t}\right] = l \cdot T^{-1}$$

**Розмірна фізична величина** – величина в розмірності якої показник ступеня розмірності хоча б однієї з однакових величин не дорівнює нулю.

**Безрозмірна (відносна) величина** – є відношення даної фізичної величини до однорідної. Застосовується для різного роду характеристик (наприклад, коефіцієнт корисної дії).

**Логарифмічною величиною** називають логарифм відношення фізичної величини до однорідної величини (наприклад, бел, децибел).

Відносні величини виражають наприклад у: відсотках ( $\%$ ,  $1\%=10^{-2}$ ); в проміле ( $\text{‰}$ ,  $1\text{‰}=10^{-3}$ ); в мільйонних долях ( $\text{ppm}$ ,  $1\text{ppm}=10^{-6}$ ) і т.д.

За способом отримання числового значення вимірювальної фізичної величини всі вимірювання діляться на прямі, побічні, сукупні, сумісні.

**Прямі** – це такі вимірювання, коли значення вимірювальної величини знаходять прямо із дослідних значень (порівняння розміру з розміром, або показів вимірювального приладу). Наприклад, вимірювання довжини лінійкою, температури – термометром.

**Побічні** – це такі, при яких значення вимірювальної величини знаходять за проміжним результатом прямих вимірів інших величин, зв'язаних із вимірювальною величиною відомою залежністю. Наприклад, опір  $R = U / I$ , потужність  $P = I \cdot U$  знаходимо за результатами виміру сили струму  $I$  амперметром і напруги  $U$  вольтметром.

**Сукупні** – проводять для декількох однакових фізичних величин, значення яких знаходять методом рішення системи рівнянь. Наприклад, знаходження струмів в складній електричній мережі методом контурних струмів.

**Сумісні** – виконують для двох і більше не однакових фізичних



величин, їх значення знаходять при розв'язанні одного рівняння або системи рівнянь.

В загальному випадку **вимірювання фізичних величин** являє собою багатоступеневий процес, що складається із самої процедури виміру, так і ряду підготовчих і заключних процедур, які необхідно робити до і після виконання самих вимірів. Процес виміру можливо розділити на три основні етапи:

- 1) підготовка і планування вимірювань;
- 2) виконання вимірів;
- 3) обробка і аналіз отриманих даних.

До початку проведення експерименту необхідно вирішити ряд питань підготовки, планування і організації вимірів. Основними з них є:

- мета і завдання вимірів;
- наявність інформації про об'єкт (попередні виміри, діапазон та ін.);
- модель об'єкта і фізичні величини;
- вимірювальні параметри;
- умови вимірювання і величини, які впливають на хід роботи;
- похибки вимірів;
- методики вимірів та ін.

До характеристик вимірів відносимо: принцип вимірювань, методика вимірювань, невизначеність вимірювань, результат вимірювань та характеристику його якості.

**Принцип вимірювань** – фізичне явище або сукупність фізичних явищ, що покладені в основу вимірювань.

**Методика вимірювань** – сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювальної техніки.

**Невизначеність вимірювань** – це оцінка діапазону, в якому знаходиться істинне значення вимірювальної величини.

**Результат вимірювання** – значення фізичної величини, знайдене шляхом її вимірювання.

**Характеристики результату вимірювання (його якості):**

1) **точність вимірювання** – називають характеристику якості вимірювання, що відображає близькість результатів вимірювання до істинного значення вимірювальної фізичної величини.

2) **правильність вимірювань** – характеристика якості вимірю-



вань, що відображає близькість до нуля середнього значення похибок їх результатів.

3) **збіжність вимірювань** – відображає близькість повторних результатів вимірювань однієї величини, виконаних в різних умовах (час, місце, методики).

В багатьох випадках вимірювальні прилади включають в себе міри або градууються за допомогою мір (їх шкали можливо представити як запам'ятовуючі пристрої).

За умовами, що визначають точність результатів, вимірювання поділяються на три класи:

1. **Вимірювання максимально можливої точності**, яка може бути досягнута при існуючому рівні техніки (це еталонні вимірювання, вимірювання фізичних констант).
2. **Контрольно-повірочні вимірювання**, похибки яких не повинні перевищувати заданого значення.
3. **Технічні вимірювання**, в яких похибка результату визначається характеристиками засобів вимірювання.

## 2.2. СИСТЕМИ ФІЗИЧНИХ ОДИНИЦЬ

Історично першою системою одиниць фізичних величин, яка була ухвалена 7 квітня 1795 року Національними зборами Франції була **метрична система мір**. До її складу увійшли одиниці довжини, площі, об'єму та ваги, в основу яких було покладено дві одиниці: метр та кілограм.

У 1882 році вчений К. Гаусс запропонував методику побудови системи величин і одиниць як сукупності основних та похідних. Він побудував систему величин, у якій за основу були прийняті три довільні, незалежні одна від одної величини: довжина, маса та час. Решта величин визначалась за допомогою вибраних трьох. Цю систему величин, що відповідним чином пов'язана з трьома основними величинами (довжиною, масою і часом), К. Гаусс назвав **абсолютною системою**. Основними одиницями він запропонував увести міліметр, міліграм і секунду.

З подальшим розвитком науки і техніки виникли інші системи одиниць фізичних величин.

### 2.2.1. Система СГС

У 1881 році Першим Міжнародним конгресом електриків була



прийнята система одиниць фізичних величин СГС, до складу якої основними одиницями увійшли: сантиметр — одиниця довжини; грам — одиниця маси і секунда — одиниця часу, а також похідні: дина — одиниця сили та ерг — одиниця роботи. Для вимірювання потужності у системі СГС була прийнята одиниця — ерг за секунду, для вимірювання кінетичної в'язкості — стокс, динамічної в'язкості — пуаз.

Вимірювання тиску в системі СГС прийняте у динах на квадратний сантиметр.

Для механічних і магнітних вимірювань сьогодні є чинними сім видів СГС, із яких найпоширенішими є такі: СГСЕ, СГСМ, СГС (симетрична) та ін.

Значна кількість фізичних констант і нині виражаються у одиницях СГС.

### 2.2.2. Система МКГСС

Наприкінці XVIII ст. кілограм було прийнято за одиницю ваги. Використання кілограма як одиниці ваги, а пізніше як одиниці сили наприкінці XIX ст. обумовило формування нової системи одиниць фізичних величин з трьома одиницями: метр — одиниця довжини, кілограм-сила (кгс) — одиниця сили і секунда — одиниця часу (система МКГСС). Кілограм-сила — це сила, яка надає тілу масою в один кілограм прискорення  $9,80665 \text{ м/с}^2$  (нормальне прискорення вільного падіння).

Система МКГСС набула значного поширення у механіці та техніці і неофіційно називалася "технічною". Однією з причин широкого використання системи виявилася зручність подання сили в одиницях ваги і розмір основної одиниці сили — кілограм-сила. Проте незважаючи на поширення МКГСС дедалі більше виявляються її недоліки, зумовлені використанням її як головної одиниці сили, а не маси.

Першим недоліком системи є те, що одиниця маси є похідною від одиниці сили і дорівнює  $9,80665 \text{ кг}$ , а це порушує метричний принцип десятковості мір. Другий недолік полягає у назві одиниці сили — кілограм-сила та метричної одиниці маси — кілограм, що часто призводить до заплутаності у назвах. (Деякі держави ввели нову назву кілограм-сили — кілонойд.) Третім недоліком системи МКГСС є неузгодженість її з одиницями електричних та механічних величин. Одиницею роботи й енергії у системі



МКГСС прийнято кілограм-сила-метр, у системі практичних електричних одиниць робота і енергія вимірюються джоулями, що змушує вдаватися до використання перехідних коефіцієнтів при розрахунках.

Крім того, виникає велика заплутаність при визначенні маси. За одиницю маси у системі МКГСС прийнята маса тіла, якому надається прискорення  $1 \text{ м/с}^2$  під дією прикладеної сили в  $1 \text{ кгс}$ . Цю одиницю — кілограм-сила-секунда у квадраті на метр ( $\text{кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}$ ) інколи називають технічною одиницею маси (т.о.м.), або інертною, хоча такі визначення не прийняті у техніці.  $1 \text{ кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м} \approx 9,81 \text{ кг}$  ( $1 \text{ кг}$  — одиниця маси у системі СІ). Проте в техніці широко використовувалися такі міри системи МКГСС, як одиниця роботи і енергії — кілограм-сила-метр ( $\text{кгс}\cdot\text{м}$ ) і одиниця потужності — кілограм-сила-метр за секунду ( $\text{кгс}\cdot\text{м/с}$ ).

### 2.2.3. Система МТС

Основними одиницями системи МТС є: одиниця довжини — метр, одиниця маси — тонна і одиниця часу — секунда. Система вперше була прийнята у 1919 році у Франції.

Прийняття тонни за основну одиницю маси здавалося вдалим, бо забезпечувало відповідність між одиницями довжини та об'єму і одиницею маси: одна тонна відповідала одному кубічному метру води. Крім того, одиниця роботи і енергії у цій системі (кілоджоуль) і одиниця потужності (кіловат) збігалися з відповідними кратними практичними електричними одиницями.

У системі МТС за одиницю сили прийнято стен (сн), що дорівнює силі, яка надає масі в одну тонну прискорення  $1 \text{ м/с}^2$ , а за одиницю тиску — п'єза ( $\text{сн/м}^2$ ).

Проте у нашій країні ця система не знайшла практичного застосування і не увійшла до держстандарту, а в 1961 році була законодавче відмінена й у Франції.

### 2.2.4. Абсолютна практична система електричних одиниць

Абсолютна практична система електричних одиниць була ухвалена у 1881 році Першим Міжнародним конгресом електриків як похідна від системи СГСМ і призначалась для практичних вимірювань електричних та магнітних величин. Електричні й магнітні одиниці системи СГС виявилися досить незручними для практич-



ного використання, бо одні були надто великими, інші — надто малими. В абсолютній практичній системі електричні й магнітні одиниці були утворені із відповідних одиниць системи СГСМ перемноженням їх на 10 у відповідній степені.

Одними із перших були прийняті практичні електричні одиниці:

- практична одиниця електричного опору, яка дорівнює  $10^9$  одиницям опору СГСМ (пізніше дістала назву "ом");
- практична одиниця електрорушійної сили, яка дорівнює  $10^8$  одиницям електрорушійної сили СГСМ (з назвою "вольт");
- практична одиниця сили струму ампер, яка дорівнює  $10^{-1}$  електромагнітної одиниці сили струму СГСМ;
- практична одиниця електричної ємності фарада, яка дорівнює  $10^{-9}$  одиниці електричної ємності СГСМ.

Кожна з наведених практичних електричних одиниць мала відповідні обґрунтування, які з часом змінювалися і вдосконалювалися з урахуванням досягнень науки і техніки.

### 2.2.5. Позасистемні одиниці

Поряд із системними одиницями фізичних величин у практиці вимірювання використовувалися одиниці, які не входили до складу жодної із систем — так звані позасистемні одиниці. Значного поширення набули одиниці тиску: атмосфера, бар, міліметр ртутного стовпа, міліметр водяного стовпа. Позасистемними одиницями часу є хвилина, година; одиницями довжини — ангстрем, світловий рік, парсек; одиницями площі — ар, гектар; одиницями електричної енергії — електрон-вольт, кіловат-година; одиницями акустичних величин — децибел, фон, октава та ін.

Проте при уніфікації одиниць і ухваленні єдиної системи одиниць кількість позасистемних одиниць має бути скорочена до мінімуму. До того ж багато позасистемних одиниць є кратними системі СІ і можуть використовуватися для практичних вимірювань (тонна, міліметр, мікрон та ін.).

## 2.3. МІЖНАРОДНА СИСТЕМА ОДИНИЦЬ

Наявність численних систем одиниць фізичних величин, а також значної кількості позасистемних одиниць спричинило багато незручностей при переході від однієї системи одиниць в іншу, а



отже, потрібно було якнайшвидше уніфікувати одиниці вимірювання. Необхідна була єдина система одиниць фізичних величин, яка була б зручною для практичних вимірювань у різних галузях вимірювань та зберігала б принцип когерентності.

Так, система МКГСС успішно використовувалася у механіці та прикладних науках, але не узгоджувалась з практичними електричними одиницями. Розміри одиниць системи СГС широко використовувалися у фізиці, але були занадто незручні для використання у техніці.

У 1954 році X Генеральна конференція з мір і ваги встановила шість основних одиниць (метр, кілограм, секунда, ампер, градус Кельвіна, кандела) практичної системи одиниць для міжнародних відносин. На цей час членами Метричної конференції стали близько 40 найрозвинутіших держав. Одночасно Міжнародний комітет з мір і ваги створив комісію щодо розробки єдиної Міжнародної системи одиниць. Система одержала назву **Міжнародної системи одиниць**, скорочено **СІ** (**SI** — початкові букви французької назви **Systeme International**).

Ухвалення Міжнародної системи у 1960 році XI Генеральною конференцією з мір і ваги було важливим прогресивним актом, який закріпив велику багаторічну роботу з цього питання і узагальнив досвід роботи наукових організацій з метрології, стандартизації, фізики й електротехніки.

Міжнародна система одиниць прийнята Міжнародним союзом фізиків, Міжнародною електротехнічною комісією та іншими міжнародними організаціями. Організація об'єднаних націй з освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) закликала усі країни ухвалити Міжнародну систему одиниць. Сьогодні 115 держав приєдналися до Метричної конвенції, і в більшості країн система СІ визнана чинною законодавчо.

У 1981 році в СРСР уведено в дію стандарт ГОСТ 8.417—81 "Одиниці фізичних величин", у якому за основу взято Міжнародну систему одиниць, і затверджено до обов'язкового виконання.

У 1997 році Держстандарт України ухвалив постанову про введення у державі Міжнародної системи одиниць ДСТУ 3651.097 "Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні назви, положення та позначення".





Перевагами Міжнародної системи одиниць СІ слід визначити такі:

- універсальність, що забезпечує її використання в науці, техніці і господарстві;
- уніфікованість одиниць для всіх видів вимірювання. Так, замість кількох одиниць тиску (атм., мм. рт. ст., мм. вод. ст., бар та інші) у СІ визнана єдина одиниця тиску — паскаль (Па); замість кількох одиниць роботи й енергії ухвалена одиниця — джоуль (Дж);
- когерентність (узгодженість) системи: коефіцієнти про- порційності у фізичних рівняннях для визначення похідних величин дорівнюють одиниці;
- використання зручних для практичних вимірювань основних та похідних одиниць;
- чітке розмежування одиниць маси (кілограм) і сили (ньютон);
- спрощений запис рівнянь і формул завдяки відсутності перехідних коефіцієнтів при переведенні з однієї системи в іншу;
- позбавлення необхідності визначати всі системи одиниць;
- сприяння розвитку міждержавних науково-технічних та економічних зв'язків.

## 2.4. ОСНОВНІ ОДИНИЦІ СИСТЕМИ СІ

У 1954 році X Генеральна конференція з мір і ваги затвердила основні одиниці Міжнародної системи одиниць, які мають охоплювати всі галузі науки і техніки, бути основою для утворення похідних одиниць, забезпечувати зручність для практичних вимірювань і відтворюватися за допомогою установок і еталонів з найбільшою точністю.

У 1971 році XIV Генеральна конференція з мір і ваги затвердила сьому основну одиницю кількості речовини — моль.

Основні одиниці системи СІ зі скороченими позначеннями українськими та латинськими буквами наведені у табл. 2.1.

**Визначення основних одиниць** відповідно до рішення Генеральної конференції з мір і ваги:

**метр** — довжина, яка дорівнює  $1\ 650\ 763,73$  довжини хвилі у вакуумі випромінювання, що відповідає переходу між рівнями  $2p$  і



### Основні одиниці системи СІ

Величина	Одиниця вимірювання	Скорочені позначення одиниць	
		Українські	Латинські
Довжина	метр	м	m
Маса	кілограм	кг	kg
Час	секунда	с	s
Сила електричного струму	ампер	А	A
Термодинамічна температура	кельвін	К	K
Сила світла	кандела	кд	cd
Кількість речовини	моль	моль	mol

5d (оранжева лінія) атома криптону 86;

**кілограм** — одиниця маси, що дорівнює масі Міжнародного прототипу кілограма;

**секунда** — 9 192 631 770 періодів випромінювання переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133;

**ампер** — сила постійного струму, який, проходячи через два паралельних прямолінійних провідники нескінченної довжини і за надто малого круглого перерізу, що розміщені на відстані метра один від одного у вакуумі взаємодіють між собою з силою в  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на кожний метр довжини;

**кельвін** — одиниця термодинамічної температури —  $1/273,16$  частини термодинамічної температури потрійної точки води;

**кандела** — сила світла, що випромінюється з площі у  $1/600\,000$  м<sup>2</sup> перерізу повного випромінювача у перпендикулярному до цього перерізу напрямку при температурі затвердіння платини та тиску  $101\,325$  Па;

**моль** — кількість речовини, яка вміщує стільки ж молекул (атомів, частинок), скільки вміщується атомів у нукліді вуглецю-12 масою в  $0,012$  кг.

## 2.5. ПОХІДНІ ОДИНИЦІ СИСТЕМИ СІ

Крім основних одиниць СІ є велика група похідних одиниць, які визначаються за законами взаємозв'язків між фізичними величинами або ж на основі визначення фізичних величин. Відповідні

похідні одиниці СІ виводяться із рівнянь зв'язку між величинами. Залежно від наукового напрямку утворені похідні одиниці для простору, часу, механічних, теплових, електричних, магнітних, акустичних, світлових величин та величин іонізуючого випромінювання (додаток 1).

Поряд з основними та похідними одиницями Міжнародної системи СІ є ще позасистемні одиниці (додаток 2). Вони широко застосовуються у повсякденному житті. Крім названих, є ще позасистемні одиниці тимчасового використання (морська миля, яка дорівнює — 1852 м, гектар —  $10\,000\text{ м}^2$ , ар —  $100\text{ м}^2$ , бар —  $10^5\text{ Па}$  та ін.), а також відносні та логарифмічні величини.

## 2.6. КРАТНІ ТА ЧАСТИННІ ОДИНИЦІ

Найпрогресивнішим способом утворення кратних та частинних одиниць є прийнята у метричній системі мір десяткова кратність між великими і малими одиницями. Десяткові кратні та частинні одиниці від одиниць СІ утворюються шляхом використання множників та приставок від  $10^{+18}$  до  $10^{-24}$  (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Множники і приставки для утворення кратних та частинних одиниць

Множник	Приставка		
	Назва	Позначення	
		Українське	Міжнародне
1	2	3	4
$1000000000000000000 - 10^{18}$	екса	Е	Е
$1000000000000000 = 10^{15}$	пета	п	р
$100000000000000 = 10^{12}$	тера	Т	Т
$1000000000 = 10^9$	гіга	Г	Г
$1000000 = 10^6$	мега	М	М
$1000 = 10^3$	кіло	к	к
$100 = 10^2$	гекто	г	h
$10 = 10^1$	дека	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санти	с	с
$0,001 = 10^{-3}$	мілі	м	m
$0,000001 = 10^{-6}$	мікро	мк	μ
$0,000000001 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,000000000001 = 10^{-12}$	піко	п	p
$0,000000000000001 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,000000000000000001 = 10^{-18}$	атто	а	a
$0,00000000000000000001 = 10^{-21}$	зенто	зп	z
$0,0000000000000000000001 = 10^{-24}$	йокто	й	y



### 3. ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ

#### 3.1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

В проведенні експериментальних досліджень одержуються значення, які є наближеною оцінкою величини, що вимірюється. При цьому допускаються систематичні і випадкові похибки та промахи.

Причиною **систематичних похибок** є недоліки конструкції приладу, зміщення «нуля» шкали, недосконалість вибраної методики виміру. Наприклад, лінійка не починається з «0», сила струму в електричному колі вимірюється амперметром, але при відсутності якого стрілка чи інший покажчик вимірювальної величини не знаходились на «0», вимірювальний прилад проградуйований неточно та не пройшов метрологічної перевірки. Систематичні похибки можна врахувати чи уникнути, якщо прилад відрегулювати точніше, вибрати більш досконалу методику досліджень. Оцінку систематичних похибок експериментатор проводить, аналізуючи особливості вибраного методу досліджень, паспортну готовність приладів і зробивши контрольні досліди на еталонних зразках. Тому є підстави вважати, що систематичні похибки є досить малими і всі похибки зводяться до випадкових.

**Випадкові похибки** з'являються під дією не очікуваних (випадкових) причин, наприклад, при проведенні досліджень відбувся струс фундаменту будинку, зміна в приміщенні температури, вологості, тиску повітря. При наявності випадкових похибок повторні вимірювання дають дещо різні результати. Застосовуючи закони теорії імовірності, дані похибки можна визначити і врахувати.

Чутливий гальванометр, що вимірює силу струму  $10^{-11}$  А, може показати різні значення. Вимірювання тиску, температури, вологості повітря – дають також різні значення. Недосконалість органів чуття експериментатора (зору, слуху) впливає на випадкові похибки.

**Промахи (грубі похибки вимірювань)** – це похибки вимірювань, які істотно перевищують похибку, очікувану при даних умовах. Вони зумовлені неухважністю експериментатора, який неправильно зробив вимір або невірно його записав. При підсумковій оцінці результатів вимірювань такі помилкові дані слід відкинути та привести повторні, так звані, контрольні вимірювання.



Особливий клас похибок складають **приладові похибки**. Вони визначаються за паспортом та інструкцією по експлуатації приладу. Допустимі похибки засобів вимірювання встановлюються і регулюються державним стандартом. Це також відноситься і до еталонів. Якщо відомості про допустиму похибку відсутні, то за похибку вимірювань можна брати половину найменшої ціни поділки вибраної шкали чи індикатора приладу.

Наприклад, для **міліметрової лінійки** з ціною поділки 1 мм приладова похибка  $\Delta x_0 = 0,5$  мм; для **штангенциркуля** з ціною поділки 0,1 мм  $\Delta x_0 = 0,05$  мм; з ціною поділки 0,05 мм  $\Delta x_0 = 0,025$  мм; для **мікрометра** з ціною поділки 0,01 мм приладова похибка  $\Delta x_0 = 0,005$  мм.

Для приладів вимірювання часу, в яких значення змінюється стрибком (**секундомір**) приладова похибка дорівнює величині стрибка. Наприклад, для механічного секундоміра  $\Delta t_0 = 0,2$  с або 0,1 с, для електронних мілісекундомірів  $\Delta t_0 = 0,01$  с або  $\Delta t_0 = 0,001$  с.

По особливому визначається похибка для **важільних аналітичних терез**. Вона дорівнює половині маси найменшої різноважки, яка ледь помітно виводить терези із положення рівноваги.

При використанні приладів з багатомезовими шкалами слід також підбирати межі вимірювального приладу, щоб стрілка чи показчик відхилилась більше, ніж за половину шкали (0,7-0,9 всієї її довжини).

Якщо випадкова похибка більша за приладову, то потрібно збільшити число вимірювань, щоб її зменшити.

**Методичні похибки** – це складові похибки вимірювання, джерелом яких є недосконалість вибраних методів вимірювання та обрахунків, обмеженість точності певних фізичних констант.

### **3.2. АБСОЛЮТНІ, ВІДНОСНІ ТА ПРИВЕДЕНІ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ ФІЗИЧНОЇ ВЕЛИЧИНИ**

За способом вираження, змістом і критерієм оцінки точності вимірювань похибки поділяють на абсолютні та відносні.

В результаті вимірювання одержують значення які є наближеною оцінкою величини, що вимірюється. Метою вимірювання є не тільки одержання наближеного значення фізичної величини, а й оцінка результату вимірювань. Оцінюють відхилення наближеного



значення від дійсного шляхом знаходження абсолютної та відносної похибок.

Модуль різниці (відхилення) між виміряним і дійсним значенням величини називають **абсолютною похибкою** вимірювання:

$$\Delta x = |x - x_0| \quad (3.1.)$$

**Істинне значення** фізичної величини  $x_{icm}$  - це значення, що ідеально відображає властивості об'єкту як у кількісному так і в якісному відношеннях і його значення не залежить від засобів нашого пізнання та є **абсолютною істиною** до якої наближається спостерігач, експериментатор, намагаючись виразити її як числове значення.

Під **дійсним значенням**  $x_0$  слід розуміти значення фізичної величини, знайдене експериментально, яке настільки наближається до істинного, що його можна використовувати у вимірюванні замість істинного. В якості дійсних значень використовують розрахункові значення, обчислені за відповідними формулами, покази еталонів, зразкових приладів і точніших технічних засобів вимірювання.

**Результат вимірювання** є наближеною оцінкою значення шуканої величини і залежить від методів вимірювання, технічних засобів, властивостей органів чуття спостерігача, зовнішнього середовища й самих фізичних величин.

**Похибка результатів вимірювання** – це число, що показує можливі межі невизначеності значення вимірювання величини.

Знання абсолютної похибки не є достатнім для того, щоб оцінювати якість та точність проведених вимірювань. Тому вводиться ще **відносна похибка**, яка дорівнює відношенню абсолютної похибки до значення вимірювальної величини  $\varepsilon_x = \Delta x / x$ . Відносну похибку виражають у відсотках:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (3.2.)$$

В більшості випадків для характеристики точності електровимірювальних приладів користуються **приведеною похибкою**  $\varepsilon_n$  - це відношення абсолютної похибки до граничного значення вимірювальної величини:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta x}{x_{\max}} \quad (3.3)$$



**Клас точності приладу** чисельно дорівнює приведеній похибці, вираженій у відсотках.

**Абсолютна похибка приладу** не залежить від значення виміральної величини:

$$\Delta x = \varepsilon_n x_{\max} \quad (3.4)$$

**Відносна похибка вимірювання** змінюється при зміні виміральної величини  $x$  :

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\varepsilon_n x_{\max}}{x} \quad (3.5)$$

Вона найменша при  $x = x_{\max}$  і дорівнює приведеній похибці. При зменшенні величини  $x$  ця похибка збільшується і коли  $x \rightarrow 0$ , то  $\varepsilon \rightarrow \infty$ . Звідси видно, що для підвищення точності вимірювань, потрібно підбирати такий електровимірвальний прилад, щоб при вимірюванні стрілка його відхилилась майже на всю шкалу. Якщо використовується багатомежовий прилад, то спочатку його треба включити на найбільшу межу, щоб покази приладу були мінімальними. Після підключення кола перемикач меж ставиться в таке положення, щоб стрілка знаходилась в другій половині шкали.

Крім того, при виборі електровимірвального приладу потрібно враховувати його опір. Включення приладу в схему вимірювань не повинно приводити до порушення режиму роботи електричного кола.

Так **амперметр**, який включається в коло послідовно, повинен мати малий опір в порівнянні з іншими частинами кола.

**Вольтметр** включається паралельно ділянці кола, тому повинен мати великий опір в порівнянні з опором ділянки кола.

Важливим елементом електричних кіл є **магазин опорів**, що являє собою набір котушок дроту з певним опором, які можуть перемикатись, тобто в електричне коло включається той чи інший калібрований опір.

Конструкція магазину опорів може бути різною, але найчастіше використовуються декадні магазини опорів, де кожна котушка має опір  $10^n$  Ом, а кожен перемикач має 10 положень. Опір, який набирається кожним перемикачем дорівнює добутку показу перемикача на відповідний множник, а загальний опір магазину дорівнює сумі опорів, набраних всіма перемикачами.

Похибка опору магазину опорів визначається його класом точності. **Клас точності магазину** – це відносна похибка, виражена у



відсотках. **Відносна похибка магазину опорів** не залежить від величини опору. Тому **абсолютна похибка магазину** збільшується зі збільшенням величини вимірювального опору за співвідношенням:

$$\Delta R = \varepsilon R \quad (3.6)$$

### 3.3. ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

**Прямими вимірюваннями** називають такі, коли шукана величина знаходиться безпосередньо за допомогою вимірювального приладу.

В процесі вимірювань виникають як **випадкові**, так і **систематичні** похибки. Для оцінки випадкової похибки потрібно провести декілька вимірювань (на практиці 3-5). Більша кількість вимірювань зменшує значення випадкової похибки, тому, перш за все, проводиться оцінка систематичної похибки. Для зменшення систематичної похибки, потрібно дотримуватись таких порад:

- ✓ засоби вимірювання встановлюються до використання строго за приписом в інструкції або на шкалі приладу і вимірювання проводяться в нормальних для даного засобу умовах;
- ✓ бути уважним у процесі вимірювання.

При *досить великому числі вимірювань* середнє арифметичне дає найкраще наближення до справжнього значення вимірювальної величини. Таке твердження доводиться в теорії імовірності. **Імовірність (P)** являє собою відносну частоту появи даного явища, коли число дослідів прямує до нескінченності. *На практиці виконується декілька вимірювань*, які дали такі значення величини  $x$ :  $(x_1, x_2, x_3, x_4 \dots x_n)$ . Знаходять **середнє арифметичне (середнє вибіркове)** значення від результатів  $n$  вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.7)$$

і абсолютну похибку кожного вимірювання:

$$\Delta x_1 = |x_1 - \bar{x}|, \Delta x_2 = |x_2 - \bar{x}|, \dots, \Delta x_n = |x_n - \bar{x}|. \quad (3.8)$$

**Середню арифметичну абсолютну похибку** шукаємо як середнє арифметичне модулів (абсолютних величин) абсолютних похибок кожного вимірювання, розширюючи числовий інтервал, в який





повинні потрапляти значення  $x$ . В такий спосіб збільшуємо імовірність того, що величина  $x$  потрапляє в інтервал  $(\bar{x} - \Delta\bar{x}, \bar{x} + \Delta\bar{x})$ , де:

$$\Delta\bar{x} = \frac{(\pm\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n)}{n} = \pm \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (3.9)$$

Знак « $\pm$ » показує, що відхилення може бути як в бік зростання, так і в бік зменшення  $x$  (рис.3.1). Значення  $x_1 = \bar{x} - \Delta\bar{x}$ ;  $x_2 = \bar{x} + \Delta\bar{x}$  визначають той **довірчий інтервал**, в який повинно попасти точне значення вимірювальної величини  $x$  з певною імовірністю (надійністю).

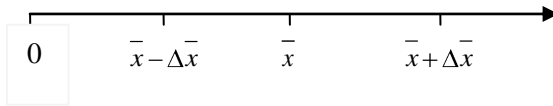


Рис. 3.1. Довірчий інтервал визначення вимірювальної величини

$$x : \bar{x} - \Delta\bar{x} \leq x \leq \bar{x} + \Delta\bar{x}$$

Величина  $\Delta\bar{x}$  є **абсолютною похибкою**, що встановлює границі довірчого інтервалу. Отже, абсолютна похибка на основі теорії імовірності – це половина довірчого інтервалу.

**Відносна похибка** визначається як  $\varepsilon = \frac{\Delta\bar{x}}{x}$  і тоді **остаточний результат** записується у вигляді:

$$x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta\bar{x}}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

Цей запис означає, що шукана величина  $\bar{x}$  знаходиться в межах  $\bar{x} - \Delta\bar{x} \leq x \leq \bar{x} + \Delta\bar{x}$  або графічно на числовій осі (рис. 3.1.). Вихід вимірювальної величини за вказані межі можливий, але імовірність такого виходу невелика.

Покажемо на прикладі, як обрахувати **середню вибірккову похибку**. Нехай вимірюємо відстань  $S$ , яку проходить кулька за час між двома послідовними ударами метронома і отримуємо наступні результати:  $S_1 = 5.6 \text{ см}$ ;  $S_2 = 6.2 \text{ см}$ ;  $S_3 = 5.4 \text{ см}$ .

Середнє значення похибки вимірювань пройденого кулькою шляху буде:



$$\bar{S} = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3} = \frac{5.6 + 6.2 + 5.4}{3} = 5.7 \text{ (см)}$$

Похибки кожного вимірювання становлять:

$$\Delta S_1 = |S_1 - \bar{S}| = |5.6 - 5.7| = 0.1 \text{ (см)}$$

$$\Delta S_2 = |S_2 - \bar{S}| = |6.2 - 5.7| = 0.5 \text{ (см)}$$

$$\Delta S_3 = |S_3 - \bar{S}| = |5.4 - 5.7| = 0.3 \text{ (см)}$$

Середня випадкова обчислюється так:

$$\Delta \bar{S} = \pm \frac{\Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3}{3} = \pm \frac{0.1 + 0.5 + 0.3}{3} = \pm 0.3 \text{ (см)} = 3 \text{ (мм)}$$

Для вимірювання довжини шляху  $S$ , пройденого кулькою, використовувалась міліметрова лінійка, для якої приладова похибка рівна половині ціни поділки, тобто 0,5 мм, то середня випадкова похибка в 3 мм майже на порядок буде більшою за приладову. Тому потрібно збільшити число вимірювань, щоб зменшити випадкову похибку вимірювань довжини шляху  $S$ , пройденого кулькою, за певних однакових умов проведення дослідження характеру її руху.

Отриманий результат можна записати як:

$$(5.7 - 0.3) \text{ см} \leq S \leq (5.7 + 0.3) \text{ см},$$

а **кінцевий результат вимірювання** слід записати у вигляді:

$$S = 5.7 \pm 0.3 \text{ см}, \quad (3.11)$$
$$\varepsilon = 5\%$$

Точніше випадкову похибку можна знайти, застосувавши теорію імовірності, яка дозволяє визначити довірчий інтервал, в який з певною імовірністю, або надійністю потрапляє точне значення вимірюваної величини. Половина цього довірчого інтервалу є абсолютною похибкою, яка реально може бути знайдена на практиці. Для того, щоб застосувати цю теорію без глибокого її пояснення, при виконанні лабораторного практикуму стисло подаємо основні поняття і алгоритм обрахунку похибок прямих вимірювань.

#### 3.4. УНИКНЕННЯ ЧИ ВРАХУВАННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ І ОБЧИСЛЕННЯ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

В проведенні експериментальних досліджень у процесі визначення фізичної величини з урахуванням дії багатьох чинників про-



являються як випадкові  $\delta$ , так і систематичні  $\theta$  похибки вимірювань:

$$\Delta = \delta + \theta \quad (3.12)$$

Оцінку систематичних похибок експериментатор проводить, аналізуючи особливості вибраного методу досліджень, паспортну точність приладів і проводячи контрольні досліди. Вважатимемо, що систематичні похибки є досить малими і всі похибки зводяться до випадкових.

Систематичні похибки  $\theta$  зазвичай визначаються і виключаються із результатів вимірювань, які називаються **відкоригованими результатами  $\bar{X}$ -вимірювань**. Випадкова похибка при цьому дорівнює різниці між відкоригованим результатом вимірювання та істинним або ж дійсним значенням шуканої величини:

$$\delta = \bar{X} - Q; \quad \text{або} \quad \delta = \bar{X} - A, \quad (3.13)$$

При виключенні систематичної похибки вимірювана величина складається із коригованого значення результату вимірювання  $\bar{X}$  і випадкової похибки  $\delta$ , а саме вимірювальна величина  $A$  стає випадковою величиною:

$$A = \bar{X} \pm \delta \quad (3.14)$$

Раніше вважали, що число вимірювань, хоч і скінченне, але *досить велике*. Насправді ж число вимірювань у переважній більшості *невелике* і часто в техніці та в наукових дослідженнях користуються результатами, які дістали з *двох-трьох вимірювань*.

Теорію похибок вимірювання властивостей досліджуваного об'єкту створив німецький математик К.Ф.Гаусс у першій половині XIX ст. і вона справедлива, коли кількість вимірювань безмежно велика.-

Класична теорія похибок, в основі якої лежить нормальний розподіл, непридатна для обробки таких результатів вимірювань, що утворюють **малу вибірку**.

Для визначення імовірності того, що **істинне значення вимірювальної величини** лежить в межах вибраного надійного інтервалу, при малих вибірках існує метод, який ґрунтується на **розподілі Стьюдента (Госсета)**. На початку XX ст. англійський математик і хімік В.С.Госсет опублікував свої роботи під псевдонімом «Стюдент» — студент.

Наочним є опис результатів спостережень властивостей дослі-



джуваного об'єкту і випадкових похибок при цьому за допомогою диференціальної функції розподілу ймовірностей. Вона позначається через  $P_x(x)$  і відповідно  $P_\delta(\delta)$ . Диференціальна функція розподілу є похідною від інтегральної  $F_x(x)$  за своїм аргументом:

$$P_x = \frac{F_x(x)}{dx}; \quad P_\delta = \frac{F_\delta(x)}{d\delta} \quad (3.15)$$

Під інтегральною функцією розподілу результатів спостережень слід розуміти залежність ймовірності того, що результат спостереження  $X_i$  в  $i$ -му досліді буде меншим деякого значення  $X'$  від самої величини  $x$ :

$$F_x(x) = P \left\{ X_i \leq x \right\} = \int_{-\infty}^x P \left\{ \infty < X_i \leq x \right\} \quad (3.16)$$

Результати окремих спостережень  $X_i$  як випадкові точки на осі  $Ox$  можуть наближатись до величини  $Q$  з лівого боку (рис.3.2, а) або ж розміщуватись навколо величини  $Q$  (рис.3.3, а).

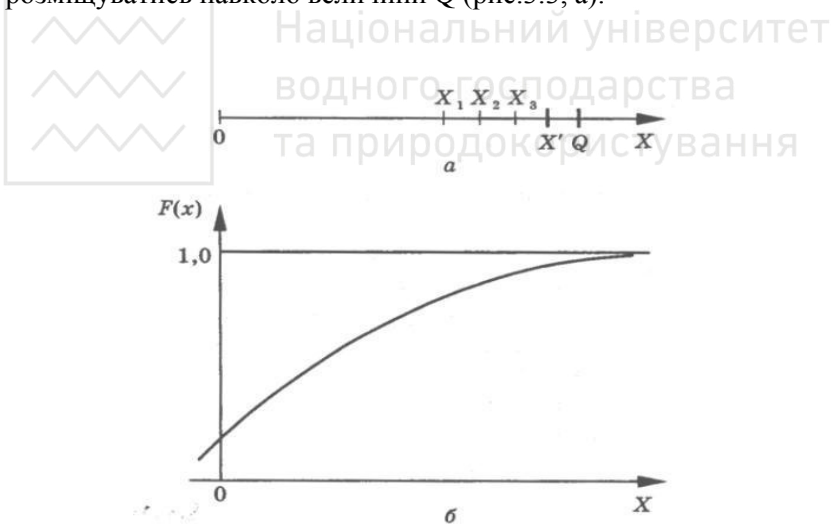


Рис.3.2. Асиметричне розміщення результатів спостережень:  
а – на осі  $Ox$ ; б – інтегральна функція

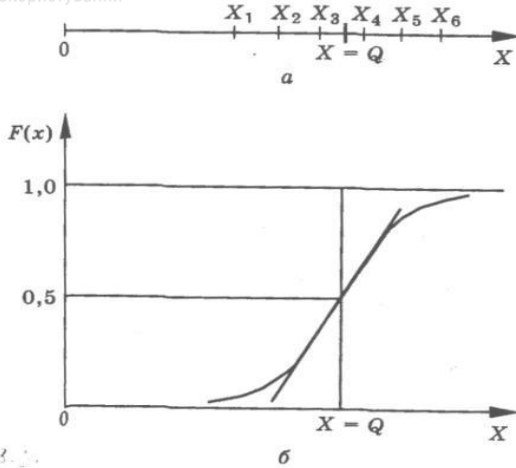


Рис.3.3. Симетричне розміщення результатів спостережень:  
а – на осі OX; б – інтегральна функція

При переміщенні точки  $X'$  праворуч по осі  $O_x$  ймовірність того, що в результаті вимірювання точки  $X_i$  розташуються лівіше від точки  $X'$ , зростає, а інтегральна функція асимптотично наближається до 1 (рис. 3.2, б).

При  $X' = Q$ , коли результати вимірювань розміщені з правого та лівого боків від  $Q$  (рис. 3.3, б), інтегральна функція має точку перегину, тобто розподіл результатів відносно істинного значення шуканої величини буде симетричним. Таким чином, інтегральна функція дає уявлення про розміщення результатів вимірювання  $X_i$ , відносно істинного значення вимірюваної величини  $Q$ .

Графік диференціальної функції розподілу, який називається **кривою розподілу**, має дзвоноподібну форму з максимумом при  $X = Q$  і відповідно при  $\delta = 0$  (рис.3.4,а) (рис.3.4,б).

Оскільки інтегральна функція  $F_x(+\infty) = 1$ , справедлива рівність

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P_x(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} P_\delta(\delta) d\delta = 1 \quad (3.17)$$

Таким чином, площа, обмежена кривою диференціальної функції розподілу і віссю абсцис, дорівнює 1, а ймовірність попадання результату спостереження і випадкової похибки у заданий інтервал дорівнює цій площі.

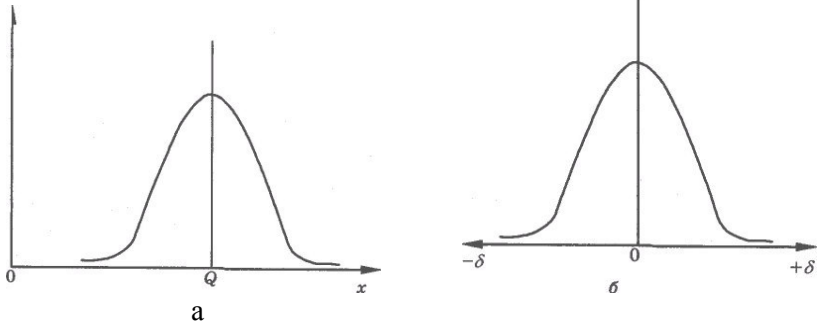


Рис.3.4. Диференціальні функції розподілу:  
а – результатів спостережень; б – випадкових похибок

Вирази  $P_{\delta}(\delta)d\delta$  і  $P_x(x)dx$  називаються **елементами ймовірності**. Вони дорівнюють ймовірностям того, що випадкові величини  $\delta$  і  $X$  можуть прийняти деяке значення в інтервалах  $d\delta$  і  $dx$ , тому по формі кривої розподілу можна сказати про те, які інтервали значень випадкових похибок більш чи менш імовірні. Для кривої розподілу випадкових похибок, показаної на рис.3.4., більш імовірні малі значення похибок, які лежать навколо  $\delta = 0$ . Ймовірність великих похибок значно менша.

Таким чином, результати спостережень сконцентровані навколо істинного значення вимірюваної величини, і в міру наближення до нього елементи ймовірності їх виникнення зростають. Це дає право прийняти за оцінку істинного значення вимірюваної величини координату центру тяжіння фігури, утвореної кривою розподілу і віссю абсцис, названої **математичним сподіванням результатів спостережень**:

$$M [X] = m_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x P_x dx. \quad (3.18)$$

Виходячи з виразу математичного сподівання, можна зробити чіткіше визначення систематичної та випадкової похибок.

**Систематичною похибкою** називається різниця між математичним сподіванням результатів спостережень та іс-



стинним значенням вимірюваної величини:

$$\theta = M[X] - Q \quad (3.19)$$

**Випадкова похибка** — різниця між результатом одиничного спостереження і математичного сподівання результатів:

$$\delta = X_i - M[X] \quad (3.20)$$

Виходячи з наведених визначень можна вивести істинне значення вимірюваної величини:

$$Q = M[X] \pm \theta \pm \delta \quad (3.21)$$

### 3.5. МОМЕНТИ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК

Функція розподілу результатів вимірювань чи похибок є універсальним способом опису розміщення випадкових похибок навколо істинного значення. Проте для визначення функцій розподілу необхідно виконати досить копітке наукове дослідження і складні обчислення. Тому цю роботу доцільно виконувати при розробці та дослідженні нових технічних засобів вимірювальної техніки.

Значно частіше випадкові похибки характеризуються за допомогою обмеженого числа спеціальних величин, які називаються **моментами**.

**Початковим моментом  $k$ -го порядку результатів спостережень** називається інтеграл виду

$$a_k[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k P_x(x) dx = M[X^k], \quad (3.22)$$

що є математичним сподіванням степені  $X^k$ . З виразу видно, що початковий момент збігається з математичним сподіванням результатів спостережень.

**Центральним моментом  $k$ -го порядку результатів спостережень** називається інтеграл виду

$$\mu_k[X] = \int (x - m_x)^k P_x(x) dx = M[(X - m_x)^k], \quad (3.23)$$

який є математичним сподіванням величини  $(X - m_x)$ , тобто у випадкової похибки  $k$ -ї степені.

Обчислимо перший **центральний момент**:



$$\mu_1[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^k p_x dx = \int_{-\infty}^{\infty} x p_x dx - m_x \int_{-\infty}^{\infty} p_x(x) dx = m_x - m_x = 0. \quad (3.24)$$

Таким чином, перший центральний момент результатів спостережень дорівнює нулю.

Поряд з математичним сподіванням результатів спостережень велике значення має другий центральний момент — **дисперсія** розподілу результатів спостережень та похибок вимірювань, яка позначається  $D[X]$  і  $D[\delta]$ :

$$\begin{aligned} D[X] &= D[\delta] = M[(X - m^2)] = M[\delta^2] = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 P_x(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta^2 P_\delta(\delta) d\delta \end{aligned} \quad (3.25)$$

**Дисперсія розподілу випадкових похибок** дорівнює дисперсії розподілу результатів спостережень і характеризує їх розсіювання відносно математичного сподівання. Дисперсія розподілу зростає зі збільшенням елементів ймовірності  $P_\delta(\delta)dx$ , виникненням великих значень випадкових похибок, тобто зі збільшенням розсіювання результатів спостережень.

Якщо математичне сподівання результатів спостережень у механічній інтерпретації можна розглядати як абсцису центру тяжіння фігури, обмеженої кривою розподілу та віссю абсцис, то дисперсію — як момент інерції цієї фігури відносно вертикальної осі, яка проходить через центр тяжіння.

Дисперсія розподілу має розмірність квадрата вимірюваної величини, тому вона незручна для користування. Значно частіше в розрахунках використовується позитивне значення квадратного кореня з дисперсії, яке називається **середнім квадратичним відхиленням результатів спостережень**:

$$\sigma_x = \sqrt{D[X]} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_i^2)} \quad (3.26)$$

Для характеристики розсіювання результатів спостережень найчастіше використовується математичне сподівання та дисперсія, оскільки вони визначають найважливіші ознаки розподілу: положення центру розподілу і степінь розсіювання результатів вимірювань відносно істинного значення вимірюваної величини.

У практиці вимірювань застосовуються різні закони розподі-





лу випадкових похибок: трикутний, трапецієподібний, прямокутний, симетричний, нормальний. Проте найбільше значення має нормальний закон розподілу (закон Гаусса). Головна особливість нормального закону розподілу полягає в тому, що він є *граничним* законом, до якого наближаються інші закони розподілу при типових для вимірювання умовах, при  $n \rightarrow \infty$ . Теорією ймовірностей доводиться, що густина ймовірностей суми незалежних малих складових при необмеженому збільшенні їх числа наближається до нормального закону розподілу незалежно від того, які закони розподілу мали ці складові. Якщо врахувати, що випадкова похибка є результатом дії великої кількості випадкових чинників, роль кожного з яких при точних вимірюваннях невелика, то стає зрозумілим значення нормального закону в теорії вимірювань.

Найчастіше при вивченні випадкових похибок використовується нормальний закон розподілу, диференціальна функція якого описується рівнянням:

$$P_{\delta}(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.27)$$

На рис. 3.4 подано графік нормального розподілу випадкових похибок  $P_{\delta}$ . Крива розподілу має дзвоноподібну форму і симетрична відносно осі  $OP(\delta)$ . Максимальна величина ймовірностей дорівнює  $1/\sigma\sqrt{2\pi}$  і досягається у точці  $O$ . В міру віддалення від точки  $O$  (вліво чи вправо) ймовірність  $P(\delta)$  зменшується і асимптотичне наближається до нуля, а ймовірність великих випадкових похибок зростає.

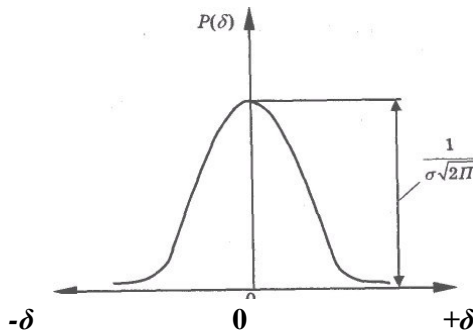


Рис.3.5. Крива нормального розподілу випадкових похибок



Для диференційної функції розподілу результатів спостережень це рівняння набуває більш загального вигляду:

$$P_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (3.28)$$

де  $m_x$  — математичне сподівання;

$\sigma_x$  — середнє квадратичне відхилення результатів спостережень.

Для зручності обробки результатів експериментальних вимірювань слід використовувати диференціальну функцію нормованого нормального розподілу:

$$P_x(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2}. \quad (3.29)$$

У додатках наведені значення диференціальної функції нормованого нормального розподілу (додаток 3) та інтегральної функції цього розподілу (додаток 4), яка визначається такою залежністю:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}t^2} dt. \quad (3.30)$$

Значне поширення нормального розподілу похибок у практиці вимірювань пояснюється центральною граничною теоремою теорії ймовірностей, яка є однією з визначних математичних теорем, розроблених видатними математиками: А. де Муавром, П. де Лапласом, К.Ф. Гауссом, П.Л. Чебишевим, А.М. Ляпуновим та ін.

**Центральна гранична теорема** стверджує, що розподіл випадкових похибок буде близьким до нормального кожного разу, коли результати спостережень формуватимуться під впливом великої кількості незалежних чинників, кожен з яких справляє лише незначний вплив порівняно із сумарним впливом інших.

Диференційні функції при нормальному законі розподілу результатів спостережень мають дзвоноподібну симетричну форму і забезпечують добре уявлення про розсіювання результатів вимірювань та випадкових похибок.

При зменшенні середнього квадратичного відхилення  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$  межі розподілу результатів звужуються (рис.3.5), а вершина дзвону диференціальної функції піднімається вгору. Ймовірність виникнення малих похибок збільшується, а великих — зменшується, тобто зменшується розсіювання результатів вимірювання відносно дійсної величини і зростає точність вимірювання. Чим точніше



виконано вимірювання, тим вище підійматиметься крива розподілу випадкових похибок і зменшуватиметься значення середнього квадратичного відхилення.

Для повного уявлення про точність вимірювань та надійність оцінки випадкових відхилень результатів вимірювань, особливо при обмеженій кількості значень вимірюваної величини, необхідно задатися довірчими межами, довірчим інтервалом та довірчою ймовірністю.

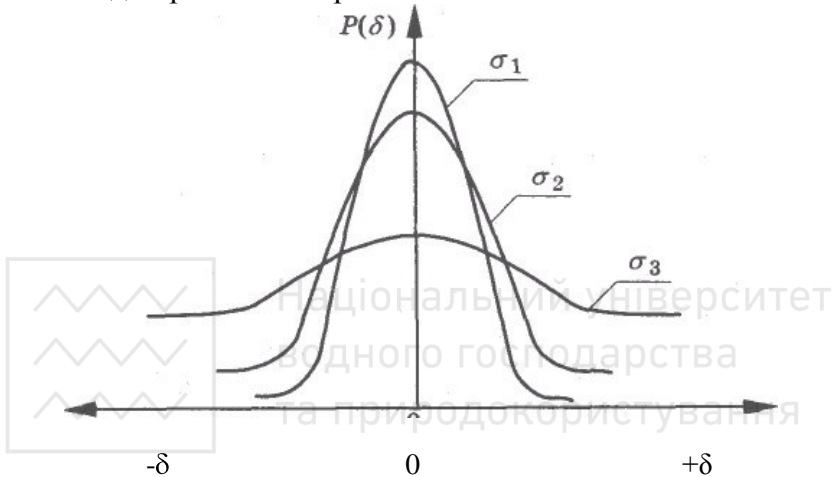


Рис.3.6. Криві нормального розподілу випадкових похибок при різних значеннях середнього квадратичного відхилення  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$

**Довірчі межі випадкових похибок** — це верхня та нижня межі інтервалу, в які похибки потрапляють із заданою ймовірністю  $P_3$ . Величина  $P_3$  називається **довірчою ймовірністю**. Для визначення довірчих меж похибок необхідно знати густину розподілу похибок та ймовірність потрапляння похибок у довірчі межі. Якщо не ввести обмеження, то задача матиме множину розв'язків.

При відомому середньому геометричному значенні  $\sigma$  довірчі межі ставляться за нижньою межею  $-\sigma$  і верхньою межею  $+\sigma$ . Довірчий інтервал має вигляд

$$I_p = (m_x - \sigma; m_x + \sigma), \quad (3.31)$$

де  $m_x$  — середнє арифметичне значення результатів вимірювань.

Залежно від мети та точності вимірювань довірчі межі на-



даються  $-t_p \sigma$  або  $m_x - t_p \sigma$  і  $+t_p \sigma$  або  $m_x + t_p \sigma$ . Довірчий інтервал значення вимірюваної величини має вигляд

$$I_p = (m_x - t_p \sigma; m_x + t_p \sigma). \quad (3.32)$$

Значення коефіцієнта  $t_p$  визначається шляхом зворотного інтегрування інтегральної функції  $\Phi(t)$  для вибраних довірчих ймовірностей при  $n \rightarrow \infty$  наведені у табл. 3.1

Таблиця 3.1

$p$	0,683	0,90	0,95	0,98	0,99	0,995	0,9973
$t_p$	1,00	1,645	1,96	2,33	2,58	2,80	3,00

Так, при нормальному розподілі похибок з ймовірністю 0,68, випадкові похибки  $\delta$  знаходяться у довірчих межах  $\pm 1\sigma$ ; з ймовірністю 0,95 — у межах подвійної середньої квадратичної похибки  $\pm 2\sigma$ ; з ймовірністю 0,9973 — у межах  $\pm 3\sigma$  (рис. 3.6).

Для звичайних технічних вимірювань, коли не вимагається високий ступінь надійності та точності, довірна ймовірність береться у межах 0,9—0,95.

Виходячи з нормального закону розподілу, можна розраховувати ймовірність виникнення випадкових похибок з різними значеннями.

Припустимо, що  $\delta = k\sigma$ , і визначимо ймовірності  $P$  їх виявлення для таких значень  $k$ : 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; ...

За даними табл. 3.2, загальна сума результатів спостережень з випадковими похибками до  $\delta \leq 3\sigma$  дорівнює 99,73 %. Звідси виникає **правило 3 $\sigma$** , за яким при нормальному розподілі результати спостережень, випадкові похибки яких більші або рівні  $\delta \leq 3\delta$ , можна виключити з ряду результатів, оскільки ймовірність їх появи дуже мала.

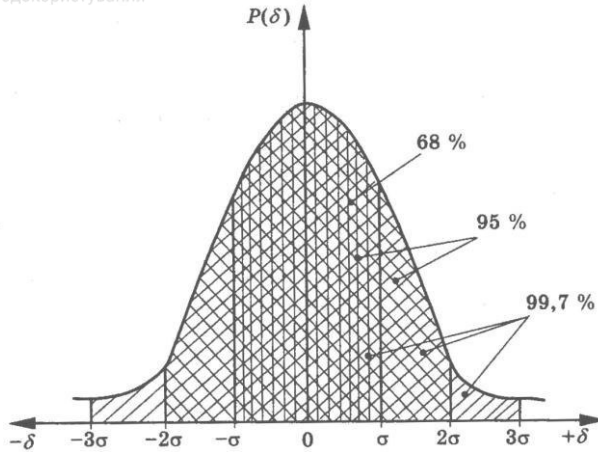


Рис. 3.7. Довірчі межі та довірчі ймовірності при нормальному законі розподілу випадкових похибок  $P(\delta)$

Таблиця 3.2

$\kappa$	0,5	1	2	3	4	5
$P$	0,635	0,317	0,045	0,0027	0,0001	0,000001
%	63,5	31,7	4,5	$\approx 0,03$	0,0001	0,000001

### 3.6. ОЦІНКА ІСТИННОГО ЗНАЧЕННЯ ВИМІРЮВАНОЇ ВЕЛИЧИНИ

Одним із важливих завдань в процесі експериментальних вимірювань є встановлення істинного значення вимірюваної величини. Це завдання є окремим випадком статистичної задачі визначення оцінок параметрів функції розподілу випадкової величини на основі вибірки ряду значень цієї величини, одержаних в  $n$  незалежних дослідах.

Оцінку параметра називають **кінцевою**, якщо вона виражається одним числом. Будь-яка кінцева оцінка, обчислена за дослідними даними, є їх функцією, а тому і сама вона в випадковою величиною з розподілом, залежним від розподілу вихідної випадкової величини та від кількості вимірювань  $n$ .

Одержана в результаті багаторазових вимірювань інформація



про істинне значення вимірюваної величини і розсіювання результатів окремих вимірювань складається з ряду вимірювань  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , де  $n$  — кількість вимірювань.

**За цих умов за оцінку істинного значення вимірюваної величини природно прийняти середнє арифметичне значення одержаних результатів вимірювання, як  $n$  незалежних випадкових величин.**

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (3.33)$$

Проте середнє арифметичне є лише оцінкою математичного сподівання результатів вимірювань і може стати оцінкою істинного значення вимірюваної величини за відсутності систематичних похибок.

Середнє арифметичне, обчислене за обмеженою кількістю вимірювань, і саме є випадковою величиною. Обчислимо його математичне сподівання:

$$m_x = M \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M [X_i] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M [X] = M [X]. \quad (3.34)$$

Слід зауважити, що дисперсія середнього арифметичного в  $n$  разів менша, ніж дисперсія результатів вимірювань, а вираз його середнього геометричного матиме вигляд

$$\sigma_{m_x} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \quad (3.35)$$

У зв'язку зі збільшенням кількості вимірювань ( $n \rightarrow \infty$ )  $\sigma_{m_x}$  наближається до нуля. Це означає, що середнє арифметичне низки вимірювань наближається за ймовірністю до математичного сподівання і є його обґрунтованою оцінкою.

**Логічним наслідком оцінки істинного значення вимірюваної величини за допомогою середнього арифметичного значення ряду вимірювань є оцінка значень випадкових похибок між результатами і середнім арифметичним:**

$$\delta_i = X_i - m_x. \quad (3.36)$$

У міру збільшення числа вимірювань розподіл випадкових відхилень  $\delta_i$  асимптотичне наближається до розподілу випадкових похибок. **Середнє квадратичне відхилення результатів вимірю-**



$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - m_x)^2}. \quad (3.37)$$

Одержані оцінки (формули (3.31) — (3.37)) дають змогу написати результат вимірювання таким чином:

$$Q = m_x \pm S_x \quad (3.38)$$

Інтервал, який визначається правою частиною цього рівняння, "накриває" істинне значення вимірюваної величини, але не зрозуміло з якою ймовірністю.

Для уточнення довірчих ймовірностей розглянемо оцінки параметрів за допомогою довірчих інтервалів, у межах яких перебуває істинне значення вимірюваної величини з відповідною ймовірністю.

Припустимо, що розподіл результатів спостережень нормальний, відома дисперсія, середнє геометричне значення і значення довірчого інтервалу  $m_x - t_p \sigma_x$ ;  $m_x + t_p \sigma_x$ . Необхідно визначити ймовірність потрапляння істинного значення  $Q$  вимірюваної величини. Систематичні похибки при цьому відсутні. За допомогою інтегральної функції  $\Phi(z)$  визначається ймовірність з такою залежністю:

$$P \ m_x - t_p \sigma_x \leq Q \leq m_x + t_p \sigma_x \ \frac{1}{2} 2\Phi(t_p) - 1. \quad (3.39)$$

Це означає, що істинне значення  $Q$  з довірчою ймовірністю  $p = 2\Phi(t_p) - 1$  знаходиться у межах довірчого інтервалу  $m_x - t_p \sigma_x$ ;  $m_x + t_p \sigma_x$ .

Половина довжини довірчого інтервалу називається довірчою межею випадкових відхилень результатів спостережень при довірчій ймовірності  $p$ . Для визначення довірчої межі необхідно встановити ступінь ймовірності, визначити значення інтегральної функції і за таблицями (додатки 4 і 5) знайти значення коефіцієнта  $i$   $t_p$  і  $t_p \sigma_x$ .

Знайдений довірчий інтервал, одержаний за допомогою середнього арифметичного значення результатів  $n$  спостережень, у  $\sqrt{n}$  разів коротший, ніж інтервал, розрахований за результатами одного спостереження, і називається довірчою межею похибки результатів спостережень:



$$\delta_{\text{ім}} = t_p \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}, \quad (3.40)$$

де  $\delta_{\text{ім}}$  — ймовірна похибка;

$t_p$  — коефіцієнт Стьюдента, який залежить від  $p$ ;

$n$  — кількість вимірювань.

**Істинне значення  $Q$  вимірюваної величини можна записати таким виразом:**

$$Q = m_x \pm \delta_p = m_x \pm t_p \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}; \text{ при } p = 0,9 - 0,997. \quad (3.41)$$

Формула (3.41) показує, що результат вимірювання знаходиться у певних межах  $\pm \delta_p$ , і кількість значень вимірюваної величини — множина. Необхідно уточнити межі відхилення дисперсії та середнього квадратичного відхилення за допомогою  $\chi^2$ -розподілу Пірсона з  $k = n - 1$  ступенями свободи (додаток 7):

$$\chi^2_k = \chi^2_{n-1} = \frac{(n-1)S_x^2}{\sigma_x^2} \quad (3.42)$$

Диференціальна функція цього розподілу описується формулою

$$P_{\chi^2_k}(\xi) = \frac{1}{\left(\frac{k}{2} - 1\right)! 2^{\frac{k}{2}}} (\xi)^{\frac{k}{2}-1} e^{-\frac{1}{2}\xi} \xi, \quad (3.43)$$

де  $k = n - 1$  — кількість ступенів свободи;

$S_x$  — оцінка дисперсії результатів вимірювання;

$\xi$ , — інтервал чисел (1, 2, 3, ...);

$e$  — основа натурального логарифма ( $e = 2,71823$ ).

Значення  $\sigma_x$  середнього квадратичного відхилення результатів вимірювань лежить в інтервалі ( $S_{x1}; S_{x2}$ ), межі якого визначаються за формулами

$$S_{x1} = \frac{\sqrt{n-1} S_x}{\chi_{k; \frac{1}{2}q}}; \quad S_{x2} = \frac{\sqrt{n-1} S_x}{\chi_{k; -\frac{1}{2}q}}; \quad (3.44)$$

де  $q$  — мінімальна ймовірність, яка знаходиться у межах 0,003—0,1





для вимірювань з ймовірністю 0,9—1. Значення розподілу Пірсона знаходиться за таблицею (додаток 7).

### 3.7. МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

*Прямими* називаються вимірювання, в результаті яких встановлюють безпосередньо шукане значення величини.

Результати спостережень  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , одержані за прямими вимірюваннями фізичної величини  $Q$ , називаються *рівнорозсіяними*, якщо вони є незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами. Рівнорозсіяні результати одержують при вимірюваннях, які проводяться одним або групою експериментаторів за допомогою однакових технічних засобів вимірювання та у незмінному зовнішньому середовищі.

Результати опрацьовуються по-різному, залежно від того, мало ( $n < 40$ ) чи багато ( $n \geq 40$ ) проведено спостережень.

При малій кількості результатів обробка їх проводиться у такій послідовності.

1. Визначається точкова оцінка істинного значення вимірювальної величини — середнє арифметичне значення результатів спостережень:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (3.45)$$

2. Обчислюються випадкові відхилення результатів спостережень та їх квадрати:

$$\delta_i = X_i - m_x; \quad \delta_i^2 = (X_i - m_x)^2. \quad (3.46)$$

3. Визначається середнє квадратичне відхилення результатів спостережень:

$$\sigma_x = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \delta_i^2}. \quad (3.47)$$

4. Перевіряється нормальність розподілу результатів спостережень.

5. Визначається наявність грубих похибок, які відповідають відношенню  $\delta \geq 3\sigma$ . Результати з грубими помилками опускають і проводять обчислення для меншого числа спостере-



жень з попередньою послідовністю.

6. Встановивши значення довірчої ймовірності залежно від точності вимірювань визначається значення ймовірності випадкової похибки:

$$\delta_{\text{ім}} = t_p \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}. \quad (3.48)$$

7. Результат дійсного значення записується у такому вигляді:

$$A_o = m_x \pm \delta_{\text{ім}}; \text{ при } P = 0,9 - 0,9973$$

або

$$A_o = m_x \pm t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \text{ при } P = 0,9 - 0,9973 \quad (3.49)$$

**Приклад.** Визначити істинне значення вимірної температури в апараті за низкою результатів спостережень (табл. 3.3) при заданій ймовірності  $p = 0,95$ .

Таблиця 3.3

№	$t^{\circ}\text{C}$		$\delta_t, ^{\circ}\text{C}$		$\delta_t^2$	
	1	123,5		+0,09	+0,05	0,0081
2	123,8		+0,39	+0,35	0,1521	0,1225
3	123,6		+0,19	+0,15	0,0361	0,0225
4	123,7		+0,29	+0,25	0,0841	0,0625
5	123,9		+0,49	+0,45	0,2401	0,2025
6	123,0		-0,41	-0,45	0,1681	0,2025
7	123,4		-0,01	-0,05	0,0001	0,0025
8	123,2		-0,21	-0,25	0,0441	0,0625
9	123,1		-0,31	-0,35	0,0961	0,1225
10	123,3		-0,11	-0,15	0,0121	0,0225
11	101,2		-22,21	—	493,284	—
12	145,2		+21,79	—	474,804	—
$\Sigma$	$n = 12$	$n = 10$	$n = 12$	$n = 10$	$n = 12$	$n = 10$
	1480,9	1234,5	-0,12	0,0	968,92	0,825
$m_t$	123,41	123,45			$\sigma_t = 8,9858$	$\sigma_t = 0,3$

1. Визначаємо точкову оцінку істинного значення вимірюваної величини, тобто середнє арифметичне даних спосте-



режень (графа 2 табл. 3.3):

$$m_x = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} t_i = 123,575^{\circ}\text{C}.$$

Одержане числове значення середнього арифметичного округляємо так, щоб випадкові відхилення не були більшими за дві-три значущі цифри при точних вимірюваннях. Отже, округляємо до значення  $t = 123,41^{\circ}\text{C}$ .

2. Визначаємо, відхилення результатів спостережень (графа 3 табл. 3.3). Сума дорівнює 0,12, хоча повинна дорівнювати нулю. Проте два останніх спостереження мають значні відхилення, тому перевіряємо їх щодо наявності грубих відхилень за відношенням  $\delta \geq 3\sigma$ .

3. Визначаємо середнє квадратичне відхилення результатів спостережень:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{12-1} \sum_{i=1}^{12} \delta_i^2} = \sqrt{\frac{1}{12-1} 9689211} = 8,9858$$

Згідно з правилом  $\delta \geq 3\sigma$  два останніх спостереження, відхилення яких наближаються до  $3\sigma$ , відносяться до результатів з грубими похибками і їх можна опустити з ряду спостережень, залишивши в ньому перші 10 спостережень. Повторюємо обробку результатів для 10 спостережень.

1. Визначаємо середнє арифметичне значення результатів спостережень:

$$m'_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} t_i = \frac{1}{10} 12345 = 1234,5^{\circ}\text{C}.$$

2. Визначаємо відхилення результатів 10 спостережень:

$$\delta_1 = +0,05; \delta_2 = +0,35; \delta_3 = +0,15; \delta_4 = +0,25; \delta_5 = +0,45;$$

$$\delta_6 = -0,45; \delta_7 = -0,05; \delta_8 = -0,25; \delta_9 = -0,35; \delta_{10} = -0,15.$$

Їх сума дорівнює 0. Значних відхилень результатів спостережень не виявлено.

3. Визначаємо середнє геометричне відхилення результатів спостережень:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{10} \delta_i^2} = \sqrt{\frac{1}{9} 0,825} = 0,3$$



4. Виходячи з довірчої ймовірності 0,95 при 10 спостереженнях, знаходимо значення коефіцієнта Стьюдента (додаток 5)  $t_p = 2,228$ .

5. Визначаємо довірчі межі відхилення вимірюваної величини:

$$\delta_{\text{ім}} = \pm t_p \frac{\sigma_t}{\sqrt{n}} = \pm 2,228 \frac{0,3}{\sqrt{10}} = \pm 0,2^\circ\text{C}.$$

6. Визначаємо результат істинного значення вимірюваної температури, довірчі межі та відносну похибку:

$$A_{\text{д}} = m'_x + \delta_{\text{ім}} = (1235 \pm 0,2)^\circ\text{C}$$
$$\varepsilon = \frac{\delta_{\text{ім}}}{m'_x} \cdot 100\% = 0,2\%. \quad (3.50)$$

### 3.8. ДОДАВАННЯ ВИПАДКОВИХ І СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

В реальних дослідах присутні як випадкові  $\delta$  так і систематичні  $\theta$  похибки. Завчасно немає можливості стверджувати, що систематична похибка буде додаватись до випадкової чи відніматись від неї. Проте, можна стверджувати, що **повна похибка вимірювання**  $\Delta_{\text{повн}}$  знаходиться в межах  $|\delta - \theta| \leq \Delta_{\text{повн}} \leq \delta + \theta$ . Природно оцінити точність проведення експерименту і в цьому випадку за допомогою деякої середньої похибки вимірювань фізичної величини.

В теорії ймовірності показується, що **очікуване середнє значення**  $\Delta_{\text{повн}}$  слід вираховувати за формулою

$$\Delta_{\text{повн}} = \sqrt{\delta^2 + \theta^2}. \quad (3.51)$$

Спосіб одержання  $\Delta_{\text{повн}}$  з  $\delta$  і  $\theta$  зображено на рис.3.7, з якого видно, що  $\Delta_{\text{повн}}$  дорівнює гіпотенузі трикутника, катетами якого є  $\delta$  і  $\theta$ .

Тому із врахуванням систематичних похибок слід писати **остаточний результат досліджень** у вигляді (3.52) або, як зазначалось (3.14) і (3.50)



$$x = \bar{x} \pm \Delta_{\text{повн}},$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{\text{повн}}}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (3.52)$$

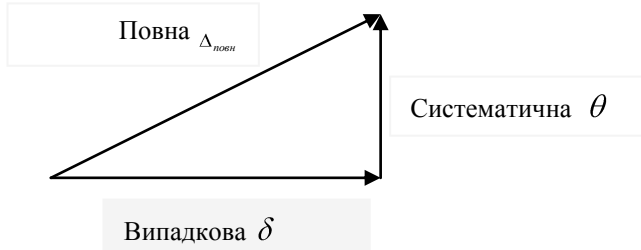


Рис. 3.8. Додавання похибок

Як вже зазначалось, **точність дослідів прийнято характеризувати** не максимальною (і не мінімальною), а **середньоквадратичною похибкою**. Тому вірно розрахована похибка повинна бути меншою суми  $\delta + \theta$  і більшою їх різниці  $|\delta - \theta|$ . Легко побачити, що  $\Delta_{\text{повн}}$ , визначена формулою (3.51), задовольняє цю умову. Справді,  $\Delta_{\text{повн}}$ ,  $\delta$ ,  $\theta$  - величини позитивні. Тому

$$\Delta_{\text{повн}}^2 = \delta^2 + \theta^2 \leq \delta^2 + 2\delta\theta + \theta^2 = (\delta + \theta)^2. \quad (3.53)$$

Знак рівності виникає тільки в тому випадку, коли одна з похибок дорівнює нулю. Аналогічно маємо:

$$\Delta_{\text{повн}}^2 \geq \delta^2 - \theta^2 \leq \delta^2 - 2\delta\theta + \theta^2 = (\delta - \theta)^2. \quad (3.54)$$

Формула (3.51) показує, що при наявності як випадкової, так і систематичної похибки повна похибка дослідів більша, ніж кожна з них окремо, що також є цілком природним.

Звернемо увагу на важливу особливість формули (3.51). Нехай одна з похибок, наприклад  $\delta$  в 2 рази менша іншої – в нашому випадку  $\theta$ , тоді

$$\Delta_{\text{повн}} = \sqrt{\delta^2 + \theta^2} = \sqrt{5/4}\theta \approx 1,12\theta \quad (3.55)$$

Похибку рідко вдається оцінити з точністю кращою за 20%. В



нашому прикладі вона визначена із точністю 20 % і  $\Delta_{повн} = \theta$ .

Отже, в тому випадку, коли похибка досліду виявляється хоча б вдвічі меншою за систематичну, немає змісту проводити багатократні вимірювання, оскільки повна похибка при цьому практично не зменшується. Вимірювання досить провести 2-3 рази, щоб переконатись у тому, що випадкова похибка дійсно мала, а в якості повної похибки  $\Delta_{повн}$  потрібно вказати величину систематичної похибки  $\theta$ .

### 3.9. ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

При непряму вимірюванні шукана величина  $x$  не вимірюється приладом безпосередньо, а визначається за відомою формулою через величини, які вимірюються безпосередньо. Так для вимірювання середньої густини матеріалу  $\rho_0$  потрібно визначити його масу в сухому стані  $m$  та об'єм  $V_0$ , який він займає у натуральному вигляді і підставити у відоме співвідношення:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}. \quad (3.56)$$

або, наприклад, розраховуючи об'єм тіла циліндричної форми користуємось формулою:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H, \quad (3.57)$$

де  $D$ - діаметр циліндра;  $H$ - його висота.

Знову теорія ймовірності дає відповідь, як знайти похибку для  $\rho_0$  чи  $V$  якщо похибки вимірювання  $m$ ,  $V_0$ ,  $D$ ,  $H$  взяті із певною точністю, а для  $\pi$  відома. Існує три можливих випадки та способи обрахунку похибок при цьому.

#### І-й випадок.

Нехай значення шуканої фізичної величини  $x$  знаходиться шляхом додавання декількох інших величин:

$$x = A + B + C \dots \quad (3.58)$$

Найкраще значення  $x$  знаходиться при цьому шляхом додавання



найкращих значень  $A, B, C \dots$  за формулою (3.58), а стандартна похибка  $x$ , яку позначено через  $\Delta x$ , пов'язана із стандартними похибками при вимірюванні доданків:  $\Delta A, \Delta B, \Delta C$  та ін. формулою:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2 + \Delta C^2 + \dots} \quad (3.59)$$

Стандартні похибки  $\Delta A, \Delta B, \Delta C$  та ін. можуть бути при цьому або одержані із досліду, якщо значення  $A, B, C$  та ін. безпосередньо виміряні, або знайдені шляхом розрахунків, коли значення  $A, B, C$  та ін. самі одержані внаслідок розрахунків.

### II-й випадок.

Нехай шукана величина  $x$  пов'язана із іншими величинами  $A, B, C$  та ін. за допомогою формули:

$$x = A^\alpha \cdot B^\beta \cdot C^\gamma \dots, \quad (3.60)$$

де  $\alpha, \beta, \gamma$  - числа, цілі або у вигляді дроби, додатні чи від'ємні.

Теорія ймовірності показує, що найкраще значення  $x$  знову виходить за допомогою (3.60) через найкращі значення  $A_{сер} = \bar{A}, B_{сер} = \bar{B}, C_{сер} = \bar{C}$  та ін., тобто:

$$x_{сер} = \bar{x} = \bar{A}^\alpha \cdot \bar{B}^\beta \cdot \bar{C}^\gamma \dots = \bar{A}^\alpha \cdot \bar{B}^\beta \cdot \bar{C}^\gamma \dots, \quad (3.61)$$

а похибка вимірювання знаходиться за формулою:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x}{x_{сер}} = \frac{\Delta x}{\bar{x}} &= \sqrt{\alpha^2 \cdot \frac{\Delta A^2}{A_{сер}^2} + \beta^2 \cdot \frac{\Delta B^2}{B_{сер}^2} + \gamma^2 \cdot \frac{\Delta C^2}{C_{сер}^2} + \dots} = \\ &= \sqrt{\alpha^2 \cdot \frac{\Delta A^2}{A^2} + \beta^2 \cdot \frac{\Delta B^2}{B^2} + \gamma^2 \cdot \frac{\Delta C^2}{C^2} + \dots} \end{aligned} \quad (3.62)$$

Як і в попередньому випадку, при цьому байдуже, одержано величини  $\Delta A, \Delta B, \Delta C$  та ін. безпосередньо з досліду чи знайдені шляхом розрахунку із інших, вже безпосередньо виміряних величин.

Розглянемо, як приклад, формулу (3.56) для знаходження середньої густини матеріалу  $\rho_0$ . За допомогою співвідношення (3.62) знаходимо, що:



$$\frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} = \sqrt{\frac{\Delta m^2}{m^2} + \frac{\Delta V_0^2}{V_0^2}}. \quad (3.63)$$

Зауважимо, що формули (3.59) і (3.62) дуже схожі одна на одну – додаються завжди квадрати похибок. Проте, у тому випадку, коли шукана величина одержується з вимірюваних шляхом додавання або віднімання, додавати потрібно квадрати абсолютних похибок  $A, B, C$  та ін., а коли шукана величина є добутком чи дробом безпосередньо вимірюваних, - додаються квадрати відповідних похибок  $\frac{\Delta A}{A}, \frac{\Delta B}{B}, \frac{\Delta C}{C}$  та ін.

### Загальний випадок.

Нехай шукана величина  $x$  виражається у вигляді деякої функції від величин  $A, B, C$  та ін., або  $x_1, x_2, x_3 \dots$  та ін., які вимірюються безпосередньо так, що:

$$x = f(A, B, C, \dots) = f(x_1, x_2, x_3 \dots) \quad (3.64)$$

Оскільки величини  $A, B, C$  та ін., або  $x_1, x_2, x_3 \dots$  та ін. вимірюються з похибками, то величина  $x$  також буде знайдена з похибкою. Коли вимірювання величини  $x_i$  проводиться кілька разів, то найкращим наближенням до точного значення  $x_0$  буде те, яке отримується при підстановці середніх вибірових значень  $\bar{x}_{i0}$ :

$$\bar{x} = f(\bar{x}_{10}, \bar{x}_{20}, \bar{x}_{30}, \dots, \bar{x}_{n0}). \quad (3.65)$$

Похибку  $\Delta x$  (відхилення від точного значення  $x_0$ ), зумовлену відхиленням  $\bar{x}_{i0}$  від  $\bar{x}_{i0}$ , можна знайти як диференціал і, оскільки, похибки величини малі, то:

$$\Delta x_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i. \quad (3.66)$$

Якщо вважати, що всі  $x_i$  статистично незалежні, то при однаковій надійності похибка  $\Delta x$  визначається як:





$$\begin{aligned}\Delta x &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 \Delta A^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2 \Delta B^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\right)^2 \Delta C^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2} = \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \Delta x_i^2}\end{aligned}\quad (3.67)$$

де  $\frac{\partial f}{\partial A}$  частинна похідна  $f$  по  $A$  та ін., а  $\Delta A, \Delta B, \Delta C$  та ін. чи  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3 \dots$  та ін. – стандартні похибки для величин  $A, B, C$  та ін., чи  $x_1, x_2, x_3 \dots$  та ін.

Частинні похідні вираховуються при найкращих значеннях  $A, B, C$  та ін., чи  $x_1, x_2, x_3 \dots$  та ін.

Дана формула використовується для визначення похибок непрямих вимірювань. Величина  $\Delta x$  буде знайдена з тією ж самою надійністю, з якою визначені всі  $\Delta x_i$ . Похибка  $\Delta x$  визначає довірчий інтервал, у який за даною надійністю потрапляє точне значення вимірювальної величини:

$$\bar{x} - \Delta x < x_0 < \bar{x} + \Delta x. \quad (3.68)$$

Для прикладу знайдемо формулу абсолютної похибки для обчислення об'єму циліндра (3.57), яка буде:

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{D^2}{4} \cdot H \Delta \pi\right)^2 + \left(\frac{\pi D}{2} \cdot H \Delta D\right)^2 + \left(\frac{\pi D^2}{4} \cdot \Delta H\right)^2} \quad (3.69)$$

Враховується те, що у формулу для об'єму циліндра (3.57) підставляється не точне значення числа  $\pi$ , а заокруглене.

### 3.10. ПОХИБКИ ТАБЛИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Часто при непрямих вимірюваннях використовують табличні величини, які підставляють у робочі формули заокругленими. В такому випадку **таблична величина визначається з абсолютною похибкою, яка дорівнює половині одиниці того найменшого десяткового розряду, до якого заокруглена дана таблична вели-**



**чина.** Наприклад, використовується значення числа  $\pi = 3,14$ , то заокруглення здійснюється до 0,01. Тому абсолютна похибка при такому заокругленні  $\Delta\pi = 0,01/2 = 0,005$  та визначена з такою ж надійністю ( $P = 0,997$ ), як і приладова похибка.

Наведемо ще приклади:

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2; \Delta g = 0,05 \text{ м/с}^2. \quad g = 9,81 \text{ м/с}^2; \Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2.$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2; \Delta g = 0,5 \text{ м/с}^2.$$

$$\pi = 3,14; \Delta\pi = 0,005. \quad \pi = 3,142; \Delta\pi = 0,0005$$

$$\pi = 3,1; \Delta\pi = 0,05.$$

### 3.11. ПРАВИЛА НАБЛИЖЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Практично всі обрахунки, які виконуються при математичній обробці результатів вимірювання фізичних величин є **наближеними**.

При наближених обчисленнях часто доводиться **округлювати числа**. Округлюються числа за відомими правилами з математики. Округлити число до деякого розряду означає відкинути всі цифри, які стоять справа від цього розряду. При округленні остання збережена цифра залишається без зміни, якщо старша з відкинутих цифр менша 5. Остання збережена цифра збільшується на одиницю, якщо старша з відкинутих цифр більша, або рівна 5.

Будь-яке число можна записати за допомогою десяти цифр. **Значущими цифрами в записаному числі** називають всі цифри від 1...9 і нулі, що стоять в середині і в кінці числа, крім нулів, що стоять на початку і в степені  $10^n$ .

*Наприклад*, в числі 23,4009 шість значущих цифр, в числі 0,1023 чотири значущі цифри, в числі 0,0004 одна значуща цифра 4, в числі 130 три значущі цифри 1, 3 і 0.

Для кращого розуміння подамо приклади, де визначено кількість всіх цифр і кількість значущих цифр.



Числа	Кількість цифр	Кількість значущих цифр
3,1416	5	5
$450 \cdot 10^{-2}$	3	3
0,0789	5	3
0,30890	6	5
0,00503980	9	6

**Виконуючи математичні операції над наближеними числами, слід дотримуватися таких правил:**

1. Наближені числа треба округлювати перед виконанням відповідних математичних операцій. Округлювати числа слід за правилом до розряду найменш точного числа, залишаючи в числах одну або дві запасні цифри. Це дає змогу правильно округлити кінцевий результат. У кінцевому результаті ці "запасні" цифри відкидають.

2. При додаванні і відніманні наближених чисел кінцевий результат слід округлити так, щоб у ньому не було значущих цифр у тих розрядах, яких немає хоча б в одному з наближених чисел. *Наприклад:*

$$12.73 + 3.6381 = 16.3681 \approx 16.37$$

$$5.962 + 2.49 + 7.18376 + 6.1468 \approx$$

$$\approx 5.962 + 2.49 + 7.184 + 6.147 = 21.783 \approx 21.78$$

$$8.1956 - 2.3 = 5.8956 \approx 5.9$$

3. При множенні і діленні наближених чисел у кінцевому результаті слід залишати стільки значущих цифр, скільки їх є в наближеному числі з найменшою кількістю значущих цифр. *Наприклад:*

$$9.54 \cdot 7.6 = 70.591 \approx 71$$

$$0.73 \cdot 5.3 = 3.869 \approx 3.9$$

$$3.624 \cdot 2.4 \cdot 5.1127 \approx 3.62 \cdot 2.4 \cdot 5.11 = 8.688 \approx 8.7$$

$$4.17 + 1.6 = 2.60625 \approx 2.6$$

4. При піднесенні до степеня в кінцевому результаті слід залишати стільки значущих цифр, скільки їх має наближене число, яке підноситься до степеня. *Наприклад:*

$$1.81^2 = 3.276 \approx 3.28$$

$$1.23^2 = 1.513 \approx 1.51$$

5. При добуванні коренів у кінцевому результаті слід залишити стільки значущих цифр, скільки їх має підкореневе



наближене число. *Наприклад:*

$$\sqrt{2.29} \approx 1.513 \approx 1.51$$

$$\sqrt{3.48 \cdot 10^{-6}} = 1.865 \cdot 10^{-3} \approx 1.86 \cdot 10^{-3}$$

6. Знаходячи логарифми наближеного числа, потрібно брати з таблиць для мантиси стільки значущих цифр, скільки їх має це число. *Наприклад:*

$$\lg 77.23 \approx 2.8878 \approx 2.888$$

Правильне і обернене твердження: число, яке знаходять за логарифмом, повинно мати стільки значущих цифр, скільки їх у мантисі (при довільній характеристиці).

7. Якщо кут складає ціле число градусів, то в тригонометричній функції потрібно зберегти дві значущі цифри і, навпаки, коли значення тригонометричної функції містить не менше двох значущих цифр, то значення відповідного кута виражають цілим числом градусів.

8. Слід пам'ятати:

Стандартним видом числа  $a$  називається його запис у вигляді  $a \cdot 10^n$ , де  $1 < a < 10$ ,  $a$   $n$ - ціле число. Число  $n$  називають порядком числа (ступінь 10). *Наприклад:*

$$73000 = 7.3 \cdot 10^4;$$

$$0.0026 = 2.6 \cdot 10^{-3}.$$

9. Розрахунки слід вести в одній системі, а кінцевий результат слід записати в СІ

### 3.12. ПРАВИЛА ОКРУГЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ І ПОХИБОК ДОСЛІДУ

Похибки, допущені при вимірюванні, загальному правилу округлення не підлягають. Розраховуючи значення похибок, особливо при використанні електронного калькулятора, одержують значення з великим числом знаків. Проте кінцеві дані для розрахунків завжди вказуються з однією чи двома значущими цифрами. Дійсно, клас точності приладу на його шкалі вказується не більше ніж з двома значущими цифрами, а середнє квадратичне відхилення не має змісту записувати з більш ніж двома значущими цифрами. Отже, в кінцевому результаті обрахованої похибки повинно бути залишено лише одна або дві значущі цифри.



При цьому слід враховувати наступне. Якщо отримане число починається з цифри 1 або 2, то відкидання другого знака приводить до великої похибки (30-50%). Це недопустимо.

Прийнято наступні правила округлення розрахункового результату похибки і одержаного результату вимірювання:

1. Похибка результату вимірювання вказується двома значущими цифрами, якщо перша з них рівна 1 або 2, однією, - якщо перша цифра 3 і більше.

*Наприклад:*

$$а) \Delta x_1 = 0.21; \quad \Delta x_2 = 0.12; \quad \Delta x_3 = 0.11$$

$$б) \Delta x_4 = 0.73 = 0.8; \quad \Delta x_5 = 0.54 = 0.6$$

2. Середнє значення виміряної величини округлюється до того самого десяткового розряду, яким закінчується округлене значення похибки.

*Наприклад*, якщо похибка вимірювання  $\Delta x = 0,001$  мм, то результат  $x = 1,07005$  округлюється до  $1,070$ . **Сумнівною цифрою числа** називається цифра, розряд якої співпадає з розрядом обрахованої похибки.

3. Відносну похибку, виражену у відсотках, достатньо записати двома значущими цифрами.

4. Округлення проводиться лише в кінцевому результаті, а всі попередні обрахунки можуть бути з однією-двома лишніми цифрами.

5. Кінцевий результат повинен мати такий запис:

а) абсолютна похибка повинна бути подана однією або двома значущими цифрами згідно правила заокруглення;

б) розряд абсолютної похибки повинен співпадати з найменшим розрядом числа;

в) число має бути записане так, що спільна десятка у відповідній степені обов'язково виноситься за дужки;

г) після дужок і десяти у відповідному степені обов'язково ставиться розмірність.

*Приклад округлення чисел і похибок.*

$$a \pm \Delta a = 3,75 \pm 0,217; \text{ записується або } 3,75 \pm 0,22; \text{ або } 3,8 \pm 0,3,$$

$$c \pm \Delta c = 4,569 \pm 0,417; \text{ записується або } 4,57 \pm 0,42; \text{ або } 4,6 \pm 0,5.$$



### 3.13. ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Результати вимірювань часто зображують графічно. Перевага графіків в тому, що вони наочно показують досліджувану залежність між фізичними величинами, дають змогу швидко визначити деякі величини (наприклад, максимальне чи мінімальне значення функції). Графіки креслять на міліметровому папері, використовуючи прямокутну (декартову) систему координат. Вісь абсцис і ординат проводять суцільними лініями з нанесенням масштабу.

Значення функції (залежної величини) відкладають по осі ординат, а значення аргументу (величини, від якої залежить функція) - по осі абсцис (рис.3.11).

Масштаби вибирають довільно, незалежно один від одного, але так, щоб графік не був надто малим або розтягнутим по одній із осей. Інколи інтервал, в якому лежать значення аргумента або функції, знаходиться далеко від нуля. В цьому випадку варто починати поділки на осі не з нуля, а з деякого значення, лише дещо меншого за найменше значення, яке потрібно відкласти на цій осі (Рис. 3.10.). На кінцях осі ставлять стрілки, які показують напрям зростання величини. Біля кінців осі пишуть позначення і розмірність тих величин, які відкладають.

Точки на графіку наносяться у вигляді кружечків, хрестиків, трикутників, квадратиків, ромбів. Похибку на графіку можна вказувати для аргументу знаком  $\pm$  , для функції

ком  $\pm$  або одночасно для аргумента і функції  $\pm$  , а  $\pm$  їх наносять лише в тих випадках, коли в цьому є необхідність. Криву на графіку слід проводити не просто, з'єднуючи точку одна з одною, а вибираючи, так званий переважний напрям, тенденцію. Вона має бути плавною і проходити таким чином, щоб приблизно однакове число точок знаходилось над нею і під нею (Рис. 3.11). Якщо на графіку нанесені величини похибок у вигляді відрізків, то крива повинна лежати в межах цих відрізків (рис.3.9).

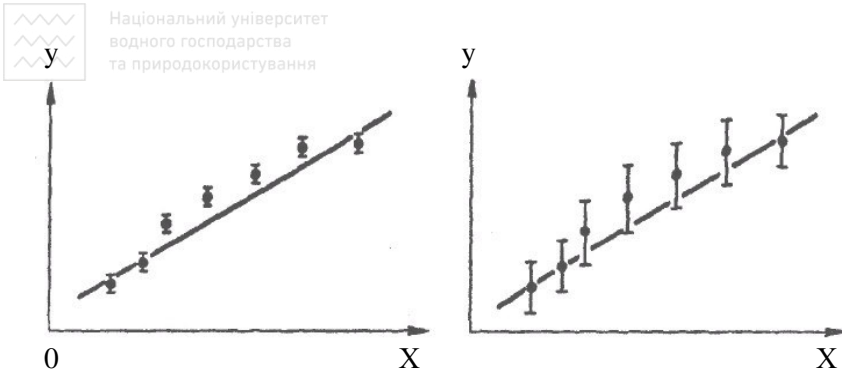


Рис.3.9. Приклад побудови графіків

При побудові графіків потрібно раціонально вибирати масштаби абсциси і ординати так, щоб вимірні значення, а відповідно ним вибрані позначення, наприклад точки, кружечки тощо розміщувались на всій площі листа. На рис. 3.10.-а експериментальні точки займають нижню праву частину рисунка, а щоб цього уникнути, потрібно вибрати більший масштаб по осі ординат і змістити нуль на осі абсцис, як це приведено на рис. 3.10.-б.

Поруч із закінченнями осей ординати і абсциси потрібно вказувати одиниці вимірювань вибраного масштабу. Для більшої зручності при аналізі графічного представлення одержаних експериментальних даних доцільно на одному рисунку приводити декілька залежностей (рис.3.11.).

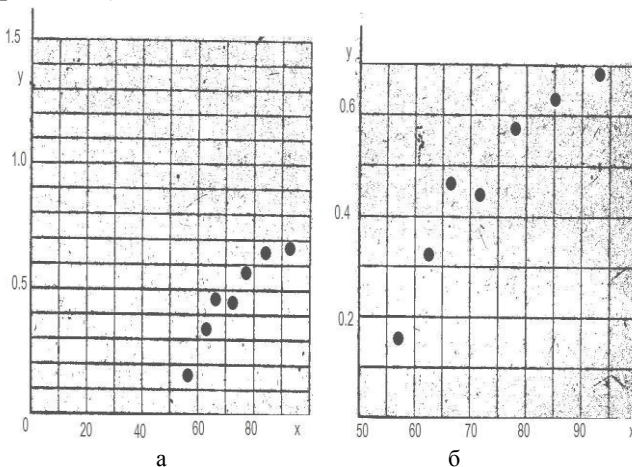


Рис.3.10. Вибір масштабу і початку відліку при побудові графіків

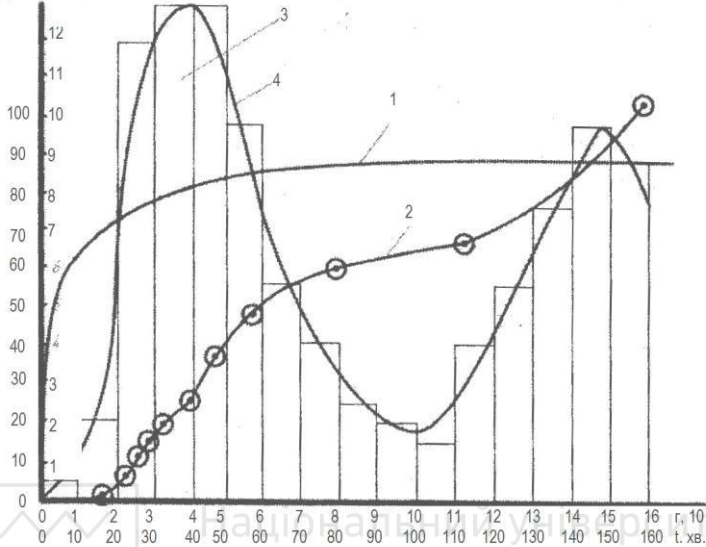


Рис.3.11. Результати використання седиментаційного методу досліджень дисперсного складу базальтового туфу: 1 – крива осаджування частинок суспензії; 2, 3, 4 – інтегральна крива, гістограма і диференціальна крива розподілу частинок суспензії за розміром

### 3.14. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ ДЛЯ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ

Нехай між двома фізичними величинами  $x$  та  $y$  існує лінійна залежність

$$y = ax + b \quad (3.58)$$

де  $a$  і  $b$  – параметри цієї залежності. Графічно вона зображена прямою 1 на рис.3.12.

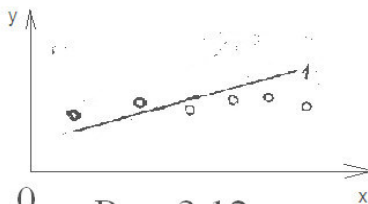


Рис. 3.12

Експериментально виміряємо величини  $x$  і  $y$ , а результати відкладемо на графіку. Внаслідок наявності випадкових похибок точки не точно ляжуть на пряму 1, але будуть групуватись біля неї.

Як насправді провести пряму, яка визначає лінійну залежність





між величинами  $x$  і  $y$  за експериментально визначеними точками?

При наявності випадкових похибок виміряні значення  $x$  і  $y$  є випадковими величинами. Незважаючи на це між ними є певний зв'язок. Цей зв'язок проявляється в тому, що випадкові величини  $x$  і  $y$  приймають такі значення, що не дуже відрізняються від значень, які задовольняють (3.58). При цьому деякому значенню величини  $x$  відповідає певний розподіл ймовірностей значень величини  $y$ . **Залежність подібного вигляду називається кореляційною. Функція  $y = ax + b$  називається функцією регресії випадкової величини  $y$  від величини  $x$ .** Функція регресії при лінійній кореляції є лінійною. Можуть бути випадки, коли функцією регресії будуть більш складні залежності.

Кореляційна залежність між випадковими величинами  $x$  та  $y$  характеризується **коефіцієнтом кореляції:**

$$r = \frac{Mxy - MxMy}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.59)$$

де  $Mxy$  - математичне очікування добутку  $x$   $y$ ,  $\sigma_x, \sigma_y$  - середньо-квадратичні відхилення величин  $x$  та  $y$ .

**Якщо кореляційний зв'язок між величинами  $x$  та  $y$  відсутній (тобто вони незалежні), то  $Mxy = MxMy$  і  $r = 0$ . Якщо ж між величинами  $x$  та  $y$  строго виконується залежність (3.58), то  $r = 1$ .**

На практиці випадкові величини  $x$  та  $y$  характеризуються **емпіричними середніми величинами:**

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \quad (3.60)$$

**та емпіричними дисперсіями:**

$$\left. \begin{aligned} S_x^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\bar{x})^2 n \right]; \\ S_y^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\bar{y})^2 n \right]; \end{aligned} \right\} \quad (3.61)$$

**і емпіричним коефіцієнтом кореляції:**



$$r = \frac{1}{S_x S_y (n-1)} \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y} \right). \quad (3.62)$$

Пряма 1 буде наближатися до області експериментальних точок, якщо середньоквадратичне відхилення цих точок від прямої буде мінімальним. З цієї умови знаходять коефіцієнти  $a$  і  $b$  лінійної залежності (3.58):

$$b = r \frac{S_y}{S_x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n (\bar{x})^2}, \quad (3.63)$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x}. \quad (3.64)$$

**Довірчий інтервал при певній надійності  $P$  визначається величинами:**

$$\Delta b = t_c \frac{S_y}{S_x} \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}}, \quad (3.65)$$

$$\Delta \bar{y} = t_c \frac{S_y}{\sqrt{n}} \sqrt{1-r^2}, \quad (3.66)$$

де  $t_c$  - коефіцієнт Стьюдента, який визначається при  $k = n - 2$ .

Абсолютні похибки, які визначають з формул (3.65) і (3.66) не враховують наявності приладових похибок, що допускаються при вимірюванні величин  $x$  та  $y$ . Цю похибку можна було б врахувати слідуючим чином. Абсолютні приладові похибки величин  $x_i$  та  $y_i$  вважають рівними  $3\sigma_{np}$  і на основі цього можна знайти абсолютні похибки  $x_{inp}$ ,  $y_{inp}$  з тією самою надійністю  $P$ , з якою за формулами (3.65) і (3.66) знайдені  $\Delta b$  і  $\Delta \bar{y}$ , викликані наявністю приладових похибок, можна знайти з формул (3.60) і (3.63) як похибки непрямих вимірювань, вважаючи, що відхилення всіх величин  $x_i$ ,  $y_i$  від точних значень незалежні. Оскільки відхилення, зумовлені випадковою і приладовою похибками також незалежні, то загальну похибку величин  $b$  і  $\bar{y}$  при тій же надійності  $P$  можна знайти як середнє геометричне обох відхилень. Але досвід показує, що вплив приладових похибок на величини  $\Delta b$  і  $\Delta \bar{y}$  малий, тому практично їх можна визначити за формулами (3.65) і (3.66).



## 4. МЕТОД МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Під **методом математичного планування експерименту** (МПЕ) розуміють постановку дослідів по завчасно складеній схемі, якій притаманні оптимальні властивості з точки зору об'єму експериментальних робіт і статистичних вимог до одержання вимірювальних величин.

В основу теорії МПЕ **покладено положення ймовірнісно-статистичних методів досліджень властивостей матеріалів**, які дозволяють теоретично і обґрунтовано встановити мінімальне необхідне число та склад експериментальних дослідів, а також порядок їх проведення для одержання кількісних залежностей між **досліджуванним параметром** (властивістю) і впливаючими на нього **факторами** (умовами).

Так, використання методу МПЕ, в технології бетону дозволяє значно скоротити об'єм експериментальних робіт при вивченні і керуванні багатофакторними залежностями, наприклад:

- для встановлення і регулювання складу бетону при змінюванні тих або інших факторів (активність цементу, цементно-водне відношення Ц/В, модуль крупності піску та ін.);
- для оптимізації складу бетону з метою забезпечення заданих вихідних параметрів (рухливості і жорсткості бетонної суміші, міцності, морозостійкості, водонепроникності бетону та ін.);
- для оптимізації складу багатокомпонентних добавок-регуляторів властивостей бетонної суміші і параметрів технологічного режиму (підготовка і формування бетону);
- при техніко-економічному аналізі для оцінки ефективності технологічних рішень;
- при розробці математичних моделей показників властивостей нових видів бетону;
- з метою одержання кількісних залежностей для автоматичних систем управління технологіями виробництва бетону та ін.

Вагомий вклад у вирішенні зазначених питань з використанням методу МПЕ зроблено професорами кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства (ТБВіМ) факультету будівництва та архітектури Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП) Дворкіним Л.Й. і Дворкіним О.Л..



## 4.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

- Результативність використання методів МПЕ залежить від **правильної постановки задачі**. При цьому експериментатор повинний вміти чітко визначити об'єм і зміст інформації, яку необхідно одержати дослідним шляхом, а також доцільність і можливість використання методу МПЕ для конкретних умов.
- **Планування експерименту** передбачає вибір найбільш істотних факторів і діапазону їх варіювання для визначення вихідних параметрів, а також проведення дослідів за певним статистичним оптимальним планом (**матрицею планування**), вигляд якого визначається характером прогнозованої залежності між досліджуваним параметром і впливаючими на нього факторами (**моделі**).
- Метод МПЕ дозволяє одночасно варіювати декількома значеннями незалежних змінних за спеціальними таблицями (матрицями), в яких закодовані значення факторів, а також на основі дослідних і розрахункових даних одержати **математичну модель** досліджуваних залежностей.
- Найбільш зручною формою запису кількісних залежностей між досліджуваним параметром і впливаючими на нього факторами є **рівняння у вигляді поліному першого чи другого порядку** (в залежності від постановки задачі) або **рівняння з неповними квадратичними залежностями**.
- При плануванні експерименту важливим етапом є **вибір основних факторів**, що істотно впливають на вихідний параметр і **рівнів їх варіювання**. Значення факторів, які увійшли в план експерименту, приймаються постійними. Наприклад, для визначення ступеня впливу модуля крупності піску на властивості бетонної суміші і бетону пробні заміси готують на піску з різним модулем крупності при використанні цементу одного заводу однієї активності, а також щебеню постійної якості.
- Важливою вимогою до факторів є їх **некорелюємість**. Проте, це не значить, що між факторами не повинно бути ніякого зв'язку. Необхідно і достатньо, щоб зв'язок не був прямий. Наприклад, при дослідженні бетонної суміші не можна одночасно планувати осадку конуса і витрати води, оскільки при інших однакових умовах для кожного значення осадки конуса витрата води є величина стала.



- При виборі факторів потрібно враховувати **ступінь їх керованості і можливість збереження заданого рівня варіювання**. Бажано, щоб досліджувані фактори мали кількісну оцінку, проте можна планувати і за їх якісними показниками.
- При будь-якому співвідношенні факторів **рівні варіювання повинні забезпечувати можливість проведення експериментальних досліджень** та вимірювання вихідного параметру. Наприклад, якщо вихідним параметром є рухливість бетонної суміші, то доля піску в суміші заповнювачів, вміст води, кількість добавки повинні забезпечувати одержання однорідної бетонної суміші, інакше необхідно звузити інтервал варіювання або вирішити поставлену задачу по частинам.
- Після вибору факторів необхідно встановити рівні їх варіювання. Сукупність всіх значень, які може приймати фактор в межах експерименту, називається **областю його варіювання**. В матриці планування фактори подаються у **кодованому вигляді**. При цьому за **основний рівень варіювання** приймають центральну, так звану нульову точку і позначають її  $x_{i0}$ , а **інтервал варіювання**  $\Delta x_i$ . Шляхом додавання або віднімання значення інтервалу варіювання від значення фактору, що знаходиться на основному рівні, одержується відповідно **верхній**, який позначається (+1), або (+) чи **нижній**, який позначається (-1) або (-) рівень фактору.
- **Взаємозв'язок між натуральними  $X_i$  і кодованими значеннями факторів  $x_i$**  визначається за формулою:

$$\Delta x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (4.1.)$$

- **Вибір інтервалу варіювання** залежить від мети і можливостей досліджень, а також від конкретних умов виробництва. Інтервали варіювання для лінійних і неповних квадратичних залежностей приймаються, як правило, меншими, ніж для повних квадратичних залежностей між досліджуваним параметром і впливовими на нього факторами. Чим ширший діапазон досліджуваного фактору, тим менш ймовірний характер залежності від нього вихідного параметру.
- **Умови планування експерименту** потрібно зводити в табл. 4.1.



Типовий вигляд таблиці планування експерименту

№ з/п	фактори		Рівні варіювання кодіваних факторів			Інтервал варіювання кодіваних факторів
	Натуральний вигляд одиниці вимірювань	Кодований вигляд	-1	0	+1	
$i$	$X_i$	$x_i$	$x_i - \Delta x_i$	$x_i$	$x_i + \Delta x_i$	$\Delta x_i$

- Для одержання лінійних, а також неповних і повних квадратичних залежностей досліди проводять згідно прийнятому плану. Для побудови лінійних залежностей використовують дворівневі, а для квадратичних – трьохрівневі плани і плани з більшим числом рівнів.
- Для зменшення впливу систематичних похибок і для рівномірного розподілу випадкових похибок, які некеровано впливають на експериментальні дослідження (коливання температури і відносної вологості повітря, стомленості експериментатора, незначні зміни зернового складу заповнювачів для бетону та ін.) досліди проводять не по порядку, вказаному в матриці планування експерименту, а в деякій випадковій (рандомізованій) послідовності. Так, наприклад, спочатку можна виконати четвертий дослід, потім перший, третій і т.п.

Послідовність проведення дослідів можна встановити за таблицями випадкових чисел або в залежності від конкретних умов. Генератором випадкових чисел може бути запропоноване проф. Джунем Й.В. і студентом факультету кібернетики МЕНУ (РЕГІ ім. С.Дем'янчука) Олександром Валецьким (Рівне, 2005р.) число  $\pi$ , що набагато краще відтворює рівномірно розподілені випадкові числа, ніж всевітньо відомі таблиці Персона і Хартлі, які були видані Кембриджським університетом в 1956 р. Також може бути число  $e$ , гравітацій стала  $G$  та ін. числові значення фізичних констант.



## 4.2. ОБРОБКА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

### 4.2.1. ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБІРКИ

При визначенні властивостей будівельних матеріалів криві розподілу випадкових похибок наближаються за характером до **нормальної кривої Гаусса**, яка відповідає рівній ймовірності появи як додатніх, так і від'ємних відхилень від центру. Для характеристики певної вибірки одержаних результатів експериментальних досліджень властивостей матеріалів, що включає  $n$  спостережень, використовують середні величини – середнє арифметичне значення вимірювальної величини  $\bar{x}$  і середнє квадратичне відхилення  $S$ .

**Середнє арифметичне** визначається за формулою

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4.1)$$

де  $\sum_{i=1}^n x_i$  – сума вимірювальних величин;  $n$  – число спостережень.

**Середнє квадратичне відхилення (стандарт)** показує границі зміни досліджуваної властивості, тобто степінь розкиду окремих його значень відносно середнього

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4.2)$$

де  $n-1=f$  – **число степенів вільності**, під яким розуміють число вільно варійованих членів сукупності.

При  $n > 25$  у формулі (4.2) замість  $n-1$  можна приймати  $n$ .

Якщо середнє квадратичне відхилення  $S$  характеризує абсолютну зміну властивості, то для виразу відносної зміни існує **коефіцієнт варіації**

$$c_v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (4.3)$$



Для того, щоб по середньому арифметичному даної обмеженої вибірки характеризувати більш точно середню величину вимірювальної властивості, знаходять **середню похибку середнього арифметичного**:

$$m = \pm \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (4.4)$$

Відношення абсолютної величини середньої похибки середнього арифметичного до величини середнього арифметичного називають **показником точності вимірювань**:

$$\varepsilon = \frac{|m|}{x} \cdot 100\%. \quad (4.5)$$

Статистична обробка результатів випробувань, крім визначення зміни вимірювального показника якості і точності дослідження властивості будівельного матеріалу, передбачає оцінку довірчої ймовірності 1-Р або рівня значимості Р одержаного результату.

**Рівнем значимості Р** називають кількість або відсоток таких малоймовірних випадків, в яких дослідник ризикує помилитись, визнавши одержаний результат вірним.

Кількість або відсоток достовірних (не викликаючи сумніву) значень визначаємої властивості називається **довірчою ймовірністю 1-Р**.

Зазвичай у дослідницькій практиці вивчення властивостей будівельних матеріалів використовують два пороги довірчої ймовірності: 0,95 (95%) чи 0,99 (99%) та відповідні їм рівні значимості: 0,05 (5%) чи 0,04 (1%). **Величина довірчої ймовірності або рівень значимості встановлюється дослідником в залежності від ступеня точності, з якого проводиться дослідження, і відповідальності висновків, що випливають з нього.**

Число спостережень, необхідних для одержання достатньо надійних і достовірних результатів визначається за формулою

$$n = \frac{c_v^2 \cdot t^2}{\varepsilon^2}, \quad (4.6)$$

де  $t$  – критерій Стюдента, який знаходиться при відповідній довірчій ймовірності і числі степенів вільності  $f$  за табл.4.1.





Таблиця 4.1

Значення t-критерія Стьюдента при числі вільності f для рівня значимості P=1 і 5%

Рівень Значимості P, %	Значення t-критерія Стьюдента при числі степенів вільності f													
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30	60	120	∞
1	63,659	9,925	5,841	4,604	4,032	3,707	3,355	3,169	2,747	2,845	2,75	2,66	2,617	2,576
5	12,706	4,303	3,182	2,776	2,571	2,447	2,306	2,228	2,131	2,086	2,042	2,0	1,980	1,96

Для достовірного використання статистичних оцінок необхідно виключити можливі грубі помилки експерименту, тобто перевірити **однорідність спостережень**. З цією метою використовують **величину максимального відносного відхилення**:

$$\tau = \frac{|x - \bar{x}|}{s} \quad (4.7)$$

де: x – крайній елемент вибірки, який підлягає перевірці.

Якщо величина максимального відхилення у досліджуваній вибірці більша типової величини (**т-критерія**) при заданій довірчій ймовірності чи рівні значимості (табл. 4.2), то крайнє значення x відкидається як грубо помилкове.

Таблиця 4.2

Значення т-критерія при числі спостережень n для рівня значимості p=1 і 5%

Рівень Значимості P, %	Значення т-критерія при числі спостережень n											
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
1	1,41	1,96	2,27	2,46	2,61	2,71	2,80	2,87	2,93	2,98	3,03	3,07
5	1,41	1,87	2,09	2,24	2,34	2,43	2,49	2,55	2,60	2,64	2,68	2,72

Приклад 1. Знайти середню загальну пористість матеріалу, її зміну і точність визначення, якщо одержано наступні результати

випробувань, %: 4,1; 3,8; 3,5; 4,0; 3,9; 3,8; 3,7; 3,6; 3,2; 3,4. Оцінити однорідність одержаних результатів досліджень при рівні значимості 5%.

Розрахунок проводимо за формулами 4.1-4.7, та результатами характеристик пористості матеріалу  $\Pi_i$  або  $x_i$ , які приведено в табл.4.3.

Таблиця.4.3

Результати досліджень та обрахунку відхилень від середнього значення пористості матеріалу

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\Sigma$
Характеристика випробувань											
$x_i, \%$	4,1	3,8	3,5	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,2	3,4	37,0
$x_i - \bar{x}, \%$	0,4	0,1	-0,2	0,3	0,2	0,1	0	-0,1	-0,5	-0,3	0
$(x_i - \bar{x})^2, (\%)^2$	0,16	0,01	0,04	0,09	0,04	0,01	0	0,01	0,25	0,09	0,7

Середнє арифметичне загальної пористості матеріалу:

$$\bar{x} = \frac{37,0\%}{10} = 3,7\% \text{ пористості .}$$

Середнє квадратичне відхилення (стандарт):

$$S = \sqrt{\frac{0,7(\%)^2}{10-1}} = 0,28\% \text{ пористост}$$

Коефіцієнт варіації:

$$c_v = \frac{0,28\%}{3,7\%} \cdot 100\% = 7,57\%.$$

Середня похибка середнього арифметичного:

$$m = \pm \frac{0,28\%}{\sqrt{10}} = \pm 0,089\% \text{ пористост}$$

Показник точності вимірювань:



$$\varepsilon = \frac{0,089\%}{3,7\%} \cdot 100\% = 2,4\%.$$

Для оцінки однорідності спостережень визначимо величину максимального відносного відхилення:

$$\tau = \frac{3,2\% - 3,7\%}{0,28\%} = 1,78.$$

Табличне значення  $\tau$ -критерія визначене за табл.4.2 при  $P=5\%$  і  $n=10$  дорівнює  $\tau_{\text{табл}}=2,29$  і тому значення пористості  $x=3,2\%$  не відкидається, оскільки не є грубо помилковим, а всі 10 випробувань однорідні.

Приклад 2. Визначити кількість зразків, необхідних для випробування бетону при стиску при коефіцієнті варіації  $c_v = 8\%$ , довірчій ймовірності  $1-P=0,95$  (95%) і показнику точності вимірювань  $\varepsilon = 5\%$ .

Скористаємось формулою 4.6. Значення  $t$ -критерія Стюдента знайдемо з табл.4.2:  $t=1,96$  ( $f=\infty$ ). Тоді:

$$n = \frac{8\%^2 \cdot 1,96}{5\%^2} = 9,83$$

і при заданих умовах досліджень достатньо взяти для випробувань 10 зразків.

## 4.2.2. КОРЕЛЯЦІЯ І РІВНЯННЯ РЕГРЕСІЇ

При проведенні експериментально-дослідницьких робіт виникає потреба у знаходженні кількісної залежності між вимірювальною властивістю (вихідним параметром  $y$ ) і технологічними факторами ( $x$ ). Така залежність може бути функціональною або кореляційною.

В першому випадку залежні змінні (функція і аргумент) пов'язані між собою строго і однозначно. Так, наприклад, існує функціональний зв'язок між загальною пористістю матеріалу  $P$ , його середньою густиною  $\rho_0$  в природному стані з врахуванням пор і пустот та істинною густиною  $\rho$  в ущільненому стані:



$$П = f(\rho_0, \rho) \text{ або } П = (1 - \frac{\rho_0}{\rho}) \cdot 100\%. \quad (4.8)$$

Певним значенням аргументів  $\rho$  і  $\rho_0$  відповідає лише одне значення функції  $П$ .

Проте однозначні або функціональні зв'язки між вихідним параметром  $y$  і технологічними факторами  $x_i$  в області технології будівельних матеріалів зустрічаються далеко не завжди.

Мають місце випадки, коли одному значенню незалежної змінної ( $x$ ) може відповідати кілька значень вихідного параметру ( $y$ ) і навпаки.

Такого роду залежність між змінними і вихідним параметром називається **кореляцією**. По напрямку кореляція буває додатною або прямою і від'ємною або зворотною; по формі – лінійною (прямолінійною) і нелінійною (криволінійною). **При додатній кореляції групові середні однієї ознаки зростають із збільшенням значення іншої ознаки, а при від'ємній зменшуються. Кореляція називається лінійною, коли напрямок зв'язку між ознаками графічно і аналітично визначається прямою лінією, в протилежному випадку називається нелінійною.**

При прямолінійній кореляції степінь залежності виражається коефіцієнтом кореляції  $\tau_{xy}$  який може знаходитись в інтервалі  $-1 \dots +1$ .

**Чим вища абсолютна величина коефіцієнта, тим щільніший зв'язок і навпаки.** Знак коефіцієнта показує характер зв'язку: «+» - пряма, тобто із збільшенням  $x$  зростає  $y$ , «-» - зворотня. Граничні значення коефіцієнта ( $\pm 1$  і  $0$ ) вказують на те, що між змінними існує відповідно чітко лінійний зв'язок або вони лінійно не корелювані.

**Коефіцієнт кореляції** знаходять із формули:

$$\tau_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (4.4)$$

Як правило рахують, коли  $\tau \leq 0,3$ , то це вказує на слабкий зв'язок, при  $0,3 \leq \tau \leq 0,5$  - зв'язок помірний, якщо  $0,5 \leq \tau \leq 0,7$  -



кореляція рахується значною, а при  $0,7 \leq \tau \leq 0,9$  - сильною при  $\tau \geq 0,9$  - дуже сильною, близькою до функціонального зв'язку.

Для перевірки гіпотези про наявність чи відсутність кореляції необхідно порівняти вибірковий коефіцієнт кореляції  $\tau_{xy}$  із табличним  $\tau_{1-P/2}$  (табл.4.4). Коефіцієнт кореляції буде значущим, якщо задовольняється нерівність:

$$|\tau_{xy}| > \tau_{1-P/2} \quad (4.5)$$

В табл.4.4 приведено значення  $\tau_{1-P/2}$  для двох рівнів значимості при різних числах степенів вільності  $f$ .

Таблиця 4.4

Значення коефіцієнта кореляції  $\tau_{1-P/2}$  для двох рівнів значимості  $P=1$  та  $5\%$  при різних числах степенів вільності  $f$

Рівень значимості P, %	Значення $\tau_{1-P/2}$ при числі степенів вільності $f$															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30...40	60	100
1	1,000	0,990	0,959	0,917	0,874	0,834	0,798	0,765	0,735	0,708	0,661	0,606	0,537	0,393	0,325	0,252
5	0,997	0,950	0,878	0,811	0,754	0,707	0,666	0,632	0,602	0,576	0,534	0,482	0,423	0,304	0,250	0,195

### 4.2.3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕГРЕСИВНОГО АНАЛІЗУ

Задачею дослідження технологічних процесів є не тільки встановлення зв'язку між факторами, але і одержання кількісних залежностей. Ця задача розв'язується за допомогою регресивного аналізу.

Для виразу кількісного зв'язку між досліджуваним вихідним параметром  $y$  і впливаючими факторами  $x_i$  встановлюють вид рівнянь на основі вивчення характеру експериментальних кривих і



Залежність між середніми значеннями досліджуваного вихідного параметру  $y$  від впливаючих факторів  $x_i$  називається **регресією**, а статистичний аналіз регресії одержав назву **регресивного аналізу**.

В загальному випадку поставлена задача така: за даною вибіркою  $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$  знайти рівняння наближеної регресії і оцінити допущену при цьому помилку. Найпростішим виглядом **рівняння регресії** є лінійне рівняння, яке виражається залежністю:

$$\hat{y} = \alpha + \beta x, \quad (4.6)$$

де:  $\alpha$  і  $\beta$  - параметри рівняння, для визначення числових значень яких використовується **принцип найменших квадратів**, який в загальному вигляді має формулювання: **найкраще рівняння наближеної регресії дає функція із розглядуваного класу, для якої сума квадратів має найменше значення:**

$$S = \sum_{i=1}^N \left[ y_i - f(x_i) \right]^2 \quad (4.7)$$

Для обрахунку коефіцієнтів рівняння наближеної регресії  $\alpha$  і  $\beta$  знаходять і розв'язують систему нормальних рівнянь із умови мінімізації величини  $S$ :

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0 \text{ і т.д.} \quad (4.8)$$

Наприклад для лінійної регресії (4.6) нормальні рівняння приймають вигляд системи (4.9), яку розв'язують і знаходять коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  (4.10, 4.11):

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n (\alpha + \beta x_i) &= 0, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n (\alpha + \beta x_i) x_i &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

$$\beta = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (4.10)$$



$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \beta \sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - \beta \bar{x}. \quad (4.11)$$

Якщо відомо коефіцієнт кореляції  $\tau_{x,y}$ , то можемо коефіцієнт  $\beta$  знайти з формули:

$$\beta = \tau_{x,y} \frac{S_y}{S_x}, \quad (4.12)$$

де  $S_y$  і  $S_x$  - середні квадратичні відхилення:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (4.13)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

Підставивши (4.11) в (4.6), одержимо:

$$\hat{y} = \alpha + \beta x = \bar{y} - \beta \bar{x} + \beta x = \bar{y} + \beta(x - \bar{x}), \quad (4.14)$$

а підставивши (4.12) в (4.14) матимемо, що:

$$\hat{y} = \bar{y} + \tau_{x,y} \frac{S_y}{S_x} (x - \bar{x}), \quad (4.15)$$

де  $\hat{y}$  - вихідний параметр, одержаний із рівняння регресії, а  $\bar{y}$  - вирахований за експериментальними даними.

Наступне завдання полягає у перевірці **адекватності** одержаного за експериментальними даними рівняння регресії і виконується за **критерієм Фішера (F-критерієм)**:

$$F = \frac{S_{\text{зл}}^2}{S_y^2}, \quad (4.16)$$

де  $S_{\text{зл}}^2$  - **залишкова дисперсія**, що характеризує розсіяння експериментальних даних відносно лінії регресії:

$$S_{\text{зл}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k-1}, \quad (4.17)$$

де  $\hat{y}_i$  - розрахункові значення залежної змінної, k- число незалеж-



змінних,  $S_y^2$  – дисперсія фактичних значень  $\bar{y}$  або дисперсія відтворення, яка вираховується з формули:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}. \quad (4.18)$$

**Гіпотеза про адекватність лінійного рівняння регресії приймається, якщо розрахункове значення F-критерію не перевищує табличного (табл.4.5) з певного (зазвичай з 95%-ою) достовірною ймовірністю 1-P.**

*Таблиця 4.5*

Значення критерію Фішера (F-критерію) із рівнем значимості P=5% при числі ступенів вільності максимальної дисперсії  $f_1$  і мінімальної дисперсії  $f_2$

Значення F-критерію (p=5%) при числі ступенів вільності											
Максимальна дисперсія $f_1$	Мінімальної дисперсії $f_2$										
	1	2	3	4	5	6	8	10	20	50	$\infty$
1	161	200	216	225	230	234	239	224	248	252	254
2	18,5	19	19,1	19,2	19,3	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4	19,5
3	10,1	9,5	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,78	8,66	8,58	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,96	5,8	5,7	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,06	4,95	4,82	4,74	4,56	4,44	4,36
6	5,99	5,14	4,46	4,07	4,39	4,28	4,15	4,06	3,87	3,75	3,87
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,35	3,15	3,08	2,98
10	4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,98	2,77	2,64	2,54
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,9	2,79	2,64	2,54	2,33	2,18	2,07
20	4,35	3,49	3,1	2,87	2,71	2,6	2,45	2,35	2,12	1,96	1,84
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,08	1,84	1,66	1,51
100	3,94	3,09	2,7	2,46	2,3	2,19	2,03	1,92	1,68	1,48	1,28
100	3,84	2,99	2,6	2,37	2,21	2,09	1,91	1,57	1,57	1,35	1

### 4.3. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Досліджуючи вплив декількох технологічних факторів (k) на властивості будівельного матеріалу доцільно використовувати математичні методи планування експерименту, які дозволяють при мінімально можливій кількості дослідів вирішувати задачу побудови математичної моделі фізичної, фізико-хімічної чи технологічної властивості у вигляді рівняння регресії.

Експеримент планується у відповідності із типовою матри-





**цею**, тобто таблицею з  $n$  стрічок і  $m$  стовбців, в який наводяться комбінації факторів, симетрично варійованих відносно деякого початку координат або нульового (основного) рівня. Допустима область варіювання факторів (**факторний простір**) вибирається на основі попереднього вивчення об'єкту досліджень у відповідності із поставленою метою.

Для спрощення запису умов експерименту і обробки одержаних результатів досліджень **верхній рівень факторів кодується +1, нижній -1, а основний відповідає 0 – (мулевному рівню).**

**Взаємний зв'язок між натуральними  $X_i$  та кодованими значеннями факторів  $x_i$  визначається за формулою 4.1. слідуочим чином:**

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \tag{4.19}$$

де  $X_{i0}$  - натуральне значення фактора на нулевому (основному) рівні;  $\Delta X_i$  - крок (інтервал) варіювання фактора.

**Умови планування експерименту потрібно записувати в табличній формі**, прикладом якої може бути форма запису завдання побудови математичної моделі проектної міцності пропареного бетону в залежності від 5-ти технологічних факторів  $k$ , а саме: від витрати води ( $x_1$ ), цементно-водного відношення ( $x_2$ ), активності цементу ( $x_3$ ), температури ізотермічного прогріву ( $x_4$ ) та тривалості теплової обробки ( $x_5$ ) при певних зазначених вихідних даних (табл. 4.6.).

*Таблиця 4.6*

**Умови планування експерименту**

№ з/п	Фактори		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
	натуральний	кодований	-1	0	+1	
1	2	3	4	5	6	7
1	Витрата води, кг	$X_1$	160	185	210	25
2	Цементно-водне відношення	$X_2$	1,4	2,0	2,6	0,6
3	Активність цементу, МПа	$X_3$	38,8	45,3	51,8	6,5
4	Температура ізотермічного прогріву, $^{\circ}\text{C}$	$X_4$	65	80	95	15
5	Тривалість теплової обробки, год	$X_5$	10	14	18	4



Для побудови і вивчення лінійних і неповних квадратичних залежностей (рівнянь регресії) використовують **повний факторний експеримент** (ПФЕ), планування якого здійснюють на двох рівнях – верхньому (+1) і нижньому (-1). Цей план дозволяє реалізувати всі неповторні варіанти дослідів на вказаних рівнях для різного числа технологічних факторів  $x$ . при цьому число дослідів  $N$  залежить від числа факторів  $k$  та для двох рівнів варіювання визначається із співвідношення:

$$N = 2^k. \quad (4.20)$$

Наприклад, для 2-х факторів  $N=2^2=4$ , для трьох факторів  $N=8$ , для чотирьох  $N=16$ , для п'яти факторів  $N=32$  і т.д.

В табл. 4.7 приведена матриця планування двох, трьох- і чотирьохфакторного експерименту ( $k=2, 3$  і  $4$ ).

Таблиця 4.7

Матриця планування для кількохфакторного експерименту  $k=2, 3$  і  $4$

Точки плану	фактори			
	X1	X2	X3	X4
1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1
3	-1	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1
5	+1	+1	-1	+1
6	+1	-1	-1	+1
7	-1	+1	-1	+1
8	-1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1
10	+1	-1	+1	-1
11	-1	+1	+1	-1
12	-1	-1	+1	-1
13	+1	+1	-1	-1
14	+1	-1	-1	-1
15	-1	+1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1

В табл. 4.8 приведена матриця планування для 5-ти технологічних факторів ( $x_1, x_2, x_3, x_4$  та  $x_5$ ), які впливають на міцність пропареного бетону та результати експериментальних досліджень ( $y_1, y_2, y_3$ ) впливу витрат води, цементно-водного відношення, активності



цементу, температури ізотермічного прогріву та тривалості теплової обробки.

Для уникнення систематичних похибок і з метою рівномірного розподілу чи усунення некерованого впливу на весь експеримент досліди проводять не по порядку, вказаному в матриці, а в деякій випадковій (рандомізованій) послідовності. Наприклад, спочатку можна виконати четвертий дослід, потім перший, третій і т.д. Послідовність проведення дослідів можна встановити за таблицею випадкових чисел в залежності від конкретних умов. Генератором випадкових чисел може бути запропоноване проф. Джуном Й.В. число  $\pi$ .

Результати дослідів обробляють за допомогою методів математичної статистики, одержуючи залежність між досліджуваною властивістю і впливаючими на неї факторами у вигляді лінійних або неповних квадратичних рівнянь регресії для:

- однофакторного експерименту:

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta x_i \quad (4.20)$$

- двофакторного експерименту:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 \cdot x_2 \quad (4.21)$$

- трьохфакторного експерименту:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 \cdot x_2 + b_{13} x_1 \cdot x_3 + b_{23} x_2 \cdot x_3 \quad (4.22)$$

- чотирьохфакторного експерименту:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 \cdot x_2 + b_{13} x_1 \cdot x_3 + b_{14} x_1 \cdot x_4 + b_{23} x_2 \cdot x_3 + b_{24} x_2 \cdot x_4 + b_{34} x_3 \cdot x_4 \quad (4.23)$$

**В загальному випадку для  $k$  факторів рівняння регресії можна скорочено записати у вигляді:**

$$\hat{y}_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (4.24)$$

**Вільний член рівняння  $b_0$**  визначають за формулою:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^{N_1} y_u - \bar{y}_u}{N_1} \quad (4.25)$$

де:  $N_1$  - число точок плану;  $\bar{y}_u$  - середнє арифметичне значення



вихідного параметру  $y_u$  (при дублюванні дослідів) розраховують за формулою:

$$\bar{y}_u = \frac{\sum_{i=1}^r y_{ui}}{r} = \frac{y_{u1} + y_{u2} + \dots + y_{ur}}{r}, \quad (4.26)$$

де:  $r$  - число повторних дослідів у рядку матриці.

Таблиця 4.8

Матриця планування та експериментальні дані

Точка плану	фактори					Проектна міцність, МПа		
	X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3
1	+	+	+	+	+	49,0	50,0	51,0
2	-	+	+	+	+	53,0	55,0	56,0
3	+	-	+	+	+	22,0	24,0	25,0
4	-	-	+	+	+	27,0	28,0	29,0
5	+	+	-	+	+	36,0	38,0	39,0
6	-	+	-	+	+	45,0	46,0	47,0
7	+	-	-	+	+	14,0	15,0	16,0
8	-	-	-	+	+	22,0	23,0	24,0
9	+	+	+	-	+	52,0	52,0	51,0
10	-	+	+	-	+	50,0	53,0	47,0
11	+	-	+	-	+	24,0	26,0	25,0
12	-	-	+	-	+	26,0	27,0	27,0
13	+	+	-	-	+	39,0	41,0	37,0
14	-	+	-	-	+	41,0	39,0	39,0
15	+	-	-	-	+	16,0	17,0	17,0
16	-	-	-	-	+	19,0	20,0	18,0
17	+	+	+	+	-	48,0	50,0	51,0
18	-	+	+	+	-	55,0	57,0	54,0
19	+	-	+	+	-	23,0	25,0	25,0
20	-	-	+	+	-	29,0	33,0	30,0
21	+	+	-	+	-	37,0	38,0	39,0
22	-	+	-	+	-	48,0	47,0	47,0
23	+	-	-	+	-	16,0	16,0	15,0
24	-	-	-	+	-	24,0	25,0	26,0
25	+	+	+	-	-	37,0	35,0	38,0
26	-	+	+	-	-	37,0	38,0	39,0
27	+	-	+	-	-	14,0	15,0	16,0
28	-	-	+	-	-	15,0	16,0	17,0
29	+	+	-	-	-	27,0	24,0	24,0
30	-	+	-	-	-	27,0	28,0	29,0
31	+	-	-	-	-	9,0	7,0	6,0
32	-	-	-	-	-	11,0	12,0	11,0



**Коефіцієнти для лінійних членів рівняння  $b_i$  визначають за формулою:**

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} x_{ui} \cdot y_u}{N_1}, \quad (4.28)$$

де:  $x_{ui}$  - значення  $i$ -го фактору рядка матриці в  $n$ -му досліді («+1» чи «-1»).

**Коефіцієнти парних взаємодій  $b_{ij}$  визначаються за формулою:**

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u}{N_1}, \quad (4.29)$$

де:  $x_{ju}$  - значення  $j$ -го технологічного фактору рядка матриці в  $n$ -му досліді («+1» чи «-1»).

**Слідуючим обов'язковим етапом при проведенні досліджень є статистичний аналіз, основною метою якого постає оцінка значимості коефіцієнтів рівняння і перевірка адекватності рівнянь.**

Для оцінки значимості коефіцієнтів рівняння знаходять розрахункове значення  $t_p$ - критерію Стьюдента для кожного коефіцієнта рівняння регресії:

$$t_p \ b_0 \approx \frac{|b_0|}{S \ b_0} \quad (4.30)$$

$$t_p \ b_i \approx \frac{|b_i|}{S \ b_i} \quad (4.31)$$

$$t_p \ b_{ij} \approx \frac{|b_{ij}|}{S \ b_{ij}} \quad (4.32)$$

Для лінійних і неповних квадратичних рівнянь при дублюванні дослідів середньоквадратичні похибки при визначенні коефіцієнтів  $S \ b_0$ ,  $S \ b_i$  і  $S \ b_{ij}$  будуть:

$$S \ b_0 = S \ b_i = S \ b_{ij} = \frac{S \ x_u}{\sqrt{N_1}}, \quad (4.33)$$



де:

$$S_{\hat{y}_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (y_{ii} - \bar{y})^2}{N_1 - 1}} \quad (4.34)$$

Коефіцієнти вважають значущими, якщо розрахункові значення критерію Стьюдента  $t_p$  будуть більшими за табличні значення  $t_r$  (табл.4.1), визначені в залежності від заданого рівня значимості та числа ступенів вільності.

Незначимі коефіцієнти рівняння регресії відкидаються без перерахування інших коефіцієнтів рівняння.

**Потім перевіряють адекватність рівняння регресії за допомогою критерію Фішера F.**

Розрахункове значення критерію Фішера  $F_p$  визначають за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ag}^2}{S^2_{\hat{y}_i}} \quad (4.35)$$

Дисперсія адекватності визначається з формули:

$$S_{ag}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N_1} (y_u - \hat{y})^2}{N_1 - m} \quad (4.36)$$

де: m- число значимих коефіцієнтів у рівнянні (число значущих рядків).

Далі порівнюють його із табличним значенням  $F_r$ , взятим із табл. 4.5., в залежності від прийнятої довірчої ймовірності і числа ступенів вільності. **Рівняння регресії вважається адекватним, якщо  $F_p < F_r$ .**

В тому випадку, коли виявляється, що дане рівняння неадекватне, то це означає, що при проведенні дослідів були допущені грубі помилки або вибраний поліном недостатньо повно відображає досліджувану залежність.

За допомогою одержаних рівнянь регресії можна вирішувати аналітичні і оптимізаційні задачі.

Рішення **аналітичних задач** дозволяє на основі рівнянь регресії побудувати графіки і номограми для вихідного параметру в межах області варіювання факторів, що в свою чергу дозволяє оперативно встановити значення вихідного параметру при зміні кожного фактору.



Національний університет

водного господарства  
та природокористування

**Оптимізаційні задачі** полягають у знаходженні такого співвідношення факторів, яке забезпечує максимальне (мінімальне) значення вихідного параметру. В цьому випадку екстремум знаходять диференціюванням рівняння послідовно по  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ . Одержану систему лінійних рівнянь прирівнюють до нуля, розв'язавши яку знаходять значення  $x_i$ , яке забезпечує екстремальне значення  $\hat{y}$ .



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



## 5. Лабораторні роботи, контрольні запитання, базова література

### Методи дослідження дисперсних матеріалів

#### 5.1. Лабораторна робота № 1

##### Седиментаційний метод визначення дисперсного складу матеріалів

**Мета роботи:** визначити швидкість осідання частинок полідисперсної суспензії методом гідростатичного зважування осаду; побудувати криві розподілу частинок за радіусами.

**Прилади і обладнання:** торсійні терези типу WT із седиментаційною шалькою; скляний циліндр для суспензії з діаметром у 2-3 рази більшим за діаметр шальки; мішалка; секундомір; термометр; лінійка з міліметровими поділками; бюкси; промивалка з дисперсійною рідиною.

**Матеріали:** глина, туф, цемент, зола виносу, пил корунду та ін., дисперсійна рідина /вода, органічна речовина/.

##### 5.1.1. Седиментаційний метод визначення дисперсного складу матеріалів

Частинки речовини, дисперговані в рідкому або газоподібному середовищі, постійно знаходяться під впливом двох протилежно спрямованих сил - сили тяжіння, під дією якої частинки осідають, і сил дифузії, під дією яких частинки намагаються переміститись із зони більших в зону менших концентрацій, тобто до рівномірного розподілу в об'ємі.

Залежно від переваги тих або інших сил в системі спостерігається осідання частинок диспергової фази (під впливом сил тяжіння) або (у випадку переваження сил дифузії) вирівнювання концентрації по всьому об'єму системи. Процес осідання частинок під дією сили тяжіння називається седиментацією (від лат. *sedimentum* – осаджування).

Дисперсність систем характеризується розміром частинок диспергової фази. Оскільки розміри частинок неоднакові, то для повного уявлення про дисперсність необхідно мати криву розподілу





диспергованої фази за розмірами частинок, яку будують за даними дисперсійного аналізу седиментаційного методу, суть якого полягає у дослідженні зміни маси осаду, який накопичується на шальці терезів при осіданні частинок диспергованої фази під дією сили тяжіння.

На рис.1. показано сили, які діють на кожну із частинок суспензії за припущення, що вони мають сферичну форму.

Постійна швидкість осідання частинки досягається за умови рівноваги діючих сил:

$$F_T = F_A + F_C \quad (1)$$

де  $F_T$  - сила тяжіння;  $F_A$  - Архімедова сила;  $F_C$  - сила Стокса.

Ці сили визначаються за формулами:

$$F_T = m_q g = \rho_q V_q g = \rho_q \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (2)$$

$$F_A = m_p g = \rho_p V_p g = \rho_p \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (3)$$

$$F_C = 6\pi\eta r u \quad (4)$$

де  $\rho_q$  і  $\rho_p$  - густина частинки і рідини відповідно;  $V_q = \frac{4}{3} \pi r^3$  - об'єм частинки радіуса  $r$ ;  $\eta$  - в'язкість рідини;  $u$  - швидкість руху частинки.



Рис.1. Частинка суспензії в полі земного тяжіння

Підставимо вирази для сил  $F_T$ ,  $F_A$  і  $F_C$  – (2), (3) і (4) у співвідношення (1) і отримаємо:

$$6\pi\eta r u = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_q - \rho_p) g \quad (5)$$

Звідки визначимо швидкість з якою осідає частинка  $u$  та її радіус  $r$

$$u = \frac{2}{9} r^2 (\rho_q - \rho_p) g / \eta \quad (6)$$

$$r = \sqrt{\frac{9\eta u}{2(\rho_q - \rho_p) g}} \quad (7)$$

Швидкість осідання частинок та їх кількість (маса) можуть бути визначені експериментально за допомогою седиметра Фігуров-



ського (рис.2.):

$$u = h / t \quad (8)$$

де  $h$  - відстань, яку проходить частинка за час  $t$ .

Седиментаційний метод досліджень суспензій з метою вивчення їх полідисперсності використовується, коли розміри частинок знаходяться в інтервалі від 1 до 200 мкм, а з розмірами за 0,2 мм досліджуються звичайним ситовим аналізом.

На рис.2 приведено гідростатичні пружні мікротерези-седиментометр Фігуровського, де до пружного скляного або кварцевого стержня 1 прикріплена на скляній нитці 2 із крючком шалька 3, на якій накопичується осад суспензії. Прогин плеча вимірюється за допомогою мікроскопа. В міру осідання частинок дисперсної фази прогин збільшується спочатку швидко, внаслідок переважного випадання більш важких частинок, а потім повільніше, майже до повного закінчення процесу.

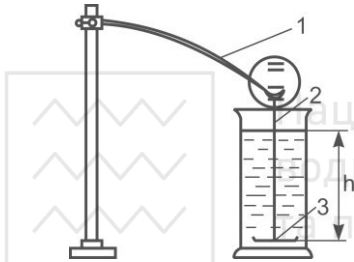


Рис. 2. Седиментометр Фігуровського

На рис.3 показано залежність маси осаду від часу осідання для різних систем. У випадку монодисперсної системи (Рис.3а) маса осаду прямо пропорційна часу осідання. В точці А осідання всіх частинок закінчилось, далі маса осаду не

змінюється. Час  $t_1$ , який відповідає точці А, є час проходження частинками шляху від поверхні суспензії до шальки терезів (Рис.2). За величинами  $h$  і  $t_1$ , розраховують  $u$ , використовуючи рівняння (8), а потім знаходять  $g_1$  за формулою (7).

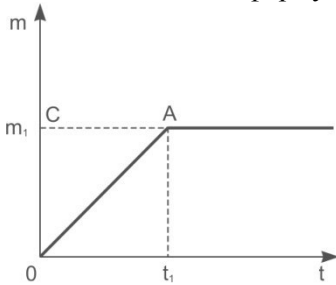


Рис. 3(а)

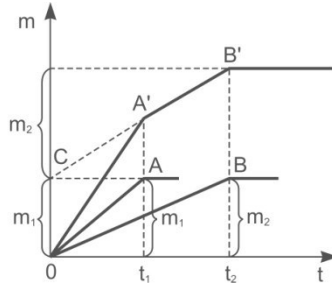


Рис. 3(б)

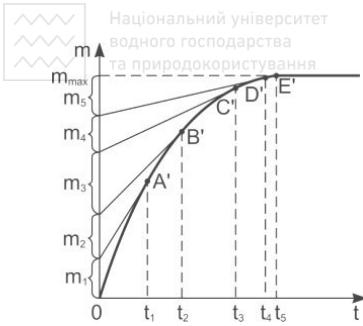


Рис.3. Залежність маси осаду суспензії від часу для: а) монодисперсної, б) бідисперсної, в) полідисперсної систем.

Рис. 3(в)

Нехай дисперсна система складається із двох монодисперсних систем. Процес осідання кожної фракції зображено прямими  $OA$  і  $OB$  (рис.3б). Сумарна залежність осідання отримується графічним додаванням ординат прямих  $OA$  і  $OB$ . Результуюча крива має злами в точках  $A'$  і  $B'$ . Абсциса точки  $A$  відповідає часу осідання більших за розміром частинок ( $t_1$ ), а  $t_2$  час - осідання більш дрібніших частинок. Відрізок  $OC$ , який одержується перетином продовження прямої  $A'B'$  з віссю ординат, відповідає масі більшої за розміром фракції  $m_1$ , , відрізок  $m_2$  - дрібнішій фракції. Графік седиментації полідисперсної системи (рис.3в) є плавна крива з незакінченою кількістю зломів. Для кількісного аналізу полідисперсної системи вісь абсцис графіку седиментації розбивають на ділянки, що відповідають часу осідання різних фракцій. Чим більше число фракцій буде вибрано для досліджень, тим точніша крива розподілу полідисперсної системи. Із точок кривої  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $D'$  і  $E'$  відповідним моментом повного осаджування фракцій, проводять дотичні до кривої і продовжують їх до перетину із віссю ординат (рис.3в). Отримані відрізки ординат вказують на маси вибраних фракцій. Наприклад, фракція, радіус частинки якої може бути розрахований по часу її повного осідання  $t_1$  , має масу  $m_1$  і т.п. Визначивши маси окремих фракцій, а також масу осаду на шальці після повного осідання суспензії розраховують процентний вміст окремих фракцій.

$$Q_i = (m_i / m_{\max}) \cdot 100\% \quad (9)$$

де  $Q_i$  - вміст фракції, %;  $m_i$  - маса фракції, мг;  $m_{\max}$  - загальна маса осаду на шальці після певного осідання частинок суспензії, мг.

Значення  $Q_i$  зручно розраховувати, якщо замість значень мас  $m_i$  і  $m_{\max}$  у формулу (9) підставити пропорційні їм довжини відрізків



### 5.1.2. Опис експериментальної установки

Установка для седиментаційного аналізу суспензій (рис.1.) складається і торсійних терезів типу TW (1), що встановлені на кронштейні (2), шальки для накопичення осаду (3), закріпленої до підвісу (4) скляного циліндру (5) заповненого суспензією (6) та мішалкою (7).

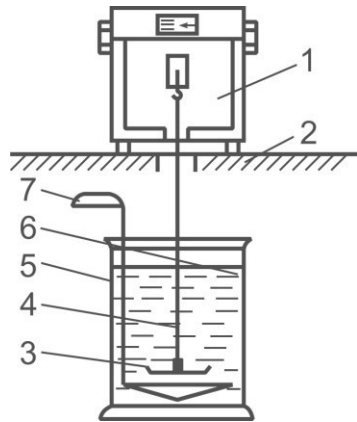


Рис.1. Установка для седиментаційного аналізу

### 5.1.3. Хід роботи

1. Ознайомитись із інструкцією використання торсійних терез і підготувати їх до виконання роботи.
2. Визначити масу порожньої шальки терезів із підвісом в дисперсійному середовищі -  $m_0$ .
3. Виміряти глибину занурення шальки в скляному циліндрі- $h$  (10-15 см).
4. Вийняти шальку із скляного циліндру.
5. Приготувати наважку зразка дисперсної фази для проведення досліджень (масою порядка 30-60 г).
6. За допомогою промивалки, заповненої дисперсійною рідиною, яка не повинна вступати в хімічну взаємодію з частинками пилу або розчиняти їх, перенести зразок із бюкса в скляний циліндр (рис. 1. поз. 5). Довести рівень суспензії в циліндрі до висоти  $h \sim 10-15$  см. Перемішати середовище до однорідного стану на весь об'єм циліндра ( $\tau \sim 2-3$  хв.). Одночасно виміряти температуру суспензії.
7. Опустити шальку в циліндр із суспензією.
8. Відкрити аретир терезів, включити секундомір і через кожні 30 с зважувати масу шальки з осадом на ній.
9. Дослід вважається закінченим, коли маса шальки із осадом не змінюється протягом 5 хв.
10. Після завершення досліджень привести в порядок робоче місце.
11. Результати вимірів записати в табл.1. зошита для лабораторн-



Таблиця 1.1

№ з/п	$\tau$ с	$m$ мг	$m_{зр}$ мг
-------	-------------	-----------	----------------

де  $m_0$  - маса шальки із підвісом в дисперсійному середовищі;  $m$  - маса шальки з підвісом і зразком в дисперсійному середовищі;  
 $m_{зр}$  - маса зразка досліджень,  $m_{зр} = m - m_0$ .

#### 5.1.4. Порядок обробки результатів вимірювань

1. Побудувати залежність маси осаду  $\tau_{зр}$  від часу досліджень  $t$  для полідисперсної системи аналогічно (рис.3в)\*. При побудові кривої седиментації рекомендується вибирати масштаб: вісь ординат - в 1 см 10 мг; вісь абсцис - в 1 см 60 с. За допомогою рівнянь (7)\* і (8)\*, а також значень густини досліджуваного матеріалу, густини і в'язкості дисперсійної рідини  $\rho$  і  $\eta$ , при температурі досліджень (взяти із довідкової літератури) визначити радіуси частинок для кожної фракції, а за формулою (9)<sup>1</sup> розрахувати вміст окремих фракцій  $Q$ . Число точок, з яких проводяться дотичні до кривої, а також інтервал між точками задаються варіантом.

2. Побудувати інтегральну криву розподілу частинок (рис.1.), відклавши на осі ординат  $Q_i$  всіх фракцій із розміром частинок  $r_1, r_2 \dots r_{\max}$ , а по осі абсцис - значення відповідних радіусів  $r_1, r_2 \dots r_{\max}$ .

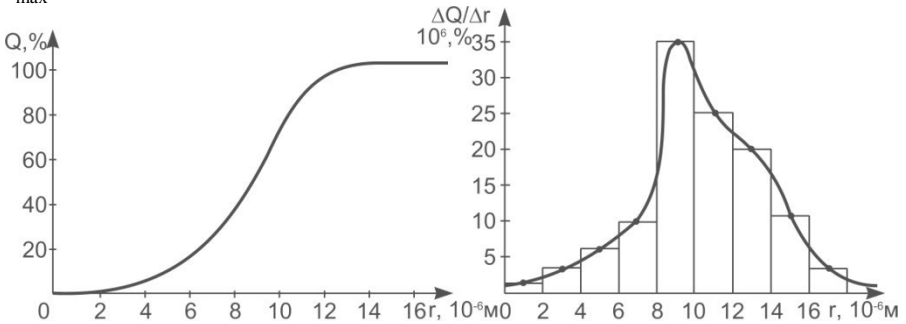


Рис.1. Інтегральна крива розподілу частинок за радіусами

Рис.2. Диференційна крива розподілу частинок за радіусами



3. Використавши значення інтегральної кривої, побудувати диференціальну криву розподілу частинок за розмірами, для чого вираховують величини приросту відсоткового вмісту частинок  $\Delta Q$  через інтервали радіусів (через  $2 \cdot 10^{-6}$  м). Потім вираховують значення  $\Delta Q/\Delta r$  і відкладають його в залежності від радіуса частинок  $r$  (рис.2.) у вигляді прямокутників тобто гістограми. Плавною кривою сполучають середини вершин прямокутників, отримуючи криву розподілу частинок за розміром. Максимум на кривій розподілу відповідає діаметру частинок, процентний вміст яких в даній системі є найбільшим.

4. В звіті потрібно вказати температуру при проведенні дослідів ( $t$ , °C); густину дисперсійного середовища ( $\rho_c$ , кг/м<sup>3</sup>); динамічну в'язкість рідини ( $\eta$ , Па · с); густину диспергованої фази ( $\rho_{зр}$ , кг/м<sup>3</sup>); прискорення вільного падіння ( $g$ , м/с<sup>2</sup>); віддалей від поверхні суспензії до дна шальки ( $h$ , м); масу порожньої шальки в дисперсійному середовищі ( $m_0$ , мг); привести результати дослідів та обчислень у вигляді табл.1, табл.2. та табл.3, а також графічно за формою рис.3в\*, рис.1. та рис. 2.

Таблиця 2

№ з/п	$\tau$ с	$r$ $10^{-6}$ м	$l$ ординати між дотичними мм	$Q_i$ %
-------	-------------	--------------------	----------------------------------	------------

Таблиця 3

№ з/п	$r$ $10^{-6}$ м	$\Delta r$ $2 \cdot 10^{-6}$ м	$\Delta Q$ %	$\Delta Q/\Delta r$ $10^{-6}$ %/м
-------	--------------------	-----------------------------------	-----------------	--------------------------------------

### 5.1.5. Контрольні запитання

1. Що таке дисперсність та седиментація і в чому полягає седиментаційний метод досліджень?
2. Що таке диспергована фаза і дисперсійне середовище? Дати визначення суспензії та емульсії.
3. Вивести робочу формулу для визначення радіусу частинки диспергованої фази суспензії.
4. Що таке дифузія, сила тяжіння, сила Стокса, Архімедова сила, густина та в'язкість речовин. Одиниці їх вимірювання.
5. Пояснити межі застосування седиментаційного методу досліджень. Зобразити седиментометр Фігуровського та пояснити його роботу.

6. Що таке моно-, ді- та полідисперсна суспензія? Накреслити криві розподілу частинок суспензії за радіусами для полідисперсної системи та її пояснити (інтегральну та диференційну).
7. Пояснити одержані результати досліджень. Які недоліки седиментаційного методу дослідження по вивченню дисперсності Ви помітили і як їх можна усунути?
8. Яке практичне значення мають результати дисперсійного аналізу в галузі будівельних матеріалів?

### 5.1.6 Література

1. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов.- Л.: Химия, 1987.- 264 с.
2. Фигуровский Н.А. Седиментометрический анализ. М.: Изд-во АН СССР -1948.- 332 с.
3. Хмельницкий Р.А. Физическая и коллоидная химия,- М.: Высш. шк., 1988.- 400 с.
4. Евстратова К.И., Купина Н.А., Малахова Е.Е. Физическая и коллоидная химия,- М.: Высш. шк., 1990.
5. Бугреева Е.Б., Евстратова К.И., Купина Н.А. и др. Практикум по физической и коллоидной химии.-М.:Высш. шк.,1990.-255 с.

## 5.2. Лабораторна робота № 2

### Визначення питомої поверхні дисперсних матеріалів

**Мета роботи:** визначити питому поверхню дисперсних будівельних матеріалів та співставити отримані результати із седиментаційними дослідженнями.

**Прилади і обладнання:** поверхнемір типу ПСХ-2, терези із різноважками, сушильна шафа, ексикатор, штангенциркуль, секундомір, ступка керамічна, пікнометри, промивалка, прокладки, шпатель.

**Матеріали:** цемент, туф, кварцовий пісок, глина, вапняк, дистильована вода, гас.

#### 5.2.1. Визначення питомої поверхні дисперсних матеріалів

Властивості будівельних речовин і виробів із них визначаються не тільки хімічним та мінералогічним складом, а також їх дисперсністю. Тонкість помелу, зерновий склад і форма частинок значно впливав на активність, швидкість тужавлення, стійкість і міцність



готових виробів, їх середню густину, пористість, теплопровідність.

На поверхні розділу двох фаз існує надлишкова, або як її називають поверхнева енергія, здатна виконати роботу. Робота поглинання молекул поверхнею здійснюється за рахунок надлишкової енергії, що дозволяє нам в термодинамічному розумінні розглядати поверхневу енергію як вільну енергію системи, що прагне до мінімуму. Зрозуміло, що значення цієї енергії тим більше, чим більша поверхня. Хімічні зміни речовин обумовлені різницею внутрішньої енергії речовин, що вступають в реакцію, і речовин - продуктів реакції. Внутрішня енергія залежить не лише від виду і кількості даної речовини, а також від її дисперсності. Таким чином, фізико-хімічні властивості поверхневого шару дисперсних частинок значно відрізняються від властивостей тієї ж речовини в „масі”. Із збільшенням питомої поверхні речовини зростає і його хімічна активність.

Питома поверхня  $S_0$  диспергованої речовини визначається як сума поверхонь всіх зерен, що вміщуються в 1 г цієї речовини або  $1 \text{ см}^3$  без врахування поверхонь контактів зерен між собою. При прогресивному подрібненні тіла, взятого в певному об'ємі, питома поверхня  $S_0$  його збільшується пропорційно лінійним розмірам  $r$  цього тіла (табл.1.).

Таблиця 1

Збільшення питомої поверхні  $S_0$ , при прогресивному подрібненні тіла кубічної форми

Довжина сторони куба $r$ , см	Число кубиків $N$	Сумарна поверхня $S$ , $\text{см}^2$	Питома поверхня віднесена до одиниці об'єму $S_0$ , см
1,0	1,0	6,0	6,0
$10^{-1}$	$10^3$	$6 \cdot 10^1$	$6 \cdot 10^1$
$10^{-2}$	$10^6$	$6 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$
$10^{-3}$	$10^9$	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$
$10^{-4}$	$10^{12}$	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$
$10^{-5}$	$10^{15}$	$6 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$

### 5.2.2. Суть методу та опис приладу ПСХ-2. Робоча формула

Порошки можна розглядати як дисперсні системи, дисперсійним





середовищем в яких є повітря. Дисперсність порошків контролюють за площею питомої поверхні  $S_0$  і зерновим складом. Поширено метод, який застосований на вимірюванні опору, що чинить шар досліджуваного матеріалу повітрю, який через цей шар проходить. Просмокування повітря тим важче, чим дрібніший порошок.

Конструкція приладу для визначення питомої поверхні  $S_0$  дисперсних речовин приведена на рис 1 і складається із кювети - 1, плунжера - 2, манометра - 3, крана - 4 і гумової груші - 5, сполучених між собою.

Кювета виготовлена у вигляді гільзи і призначена для заповнення досліджуванним зразком - 6. Ущільнення матеріалу здійснюється за допомогою плунжера, всередині якого є отвір - 7, що сполучає нижню перфоровану частину - 8 із атмосферою. Внутрішній діаметр кювети і зовнішній діаметр плунжера можуть відрізнятись один від одного не більше, ніж на 0,1 мм. Досліджуваний зразок розміщують в кюветі на прокладку над перфорованим диском - 9. Манометр виготовлений із каліброваної скляної трубки діаметром 5 мм і висотою 300 мм, сполучений із нижнім резервуаром для манометричної рідини (дистильованої води) - 13. На шкалі манометра нанесено по дві пари рисок - верхня (10) для вимірювання часу опускання меніска рідини при вимірюванні питомої поверхні тонкодисперсного матеріалу, а нижня (11) відповідно при грубому помолі речовини. Позначка на шкалі „0” (12) відповідає нормальному заповненню рідини в манометрі.

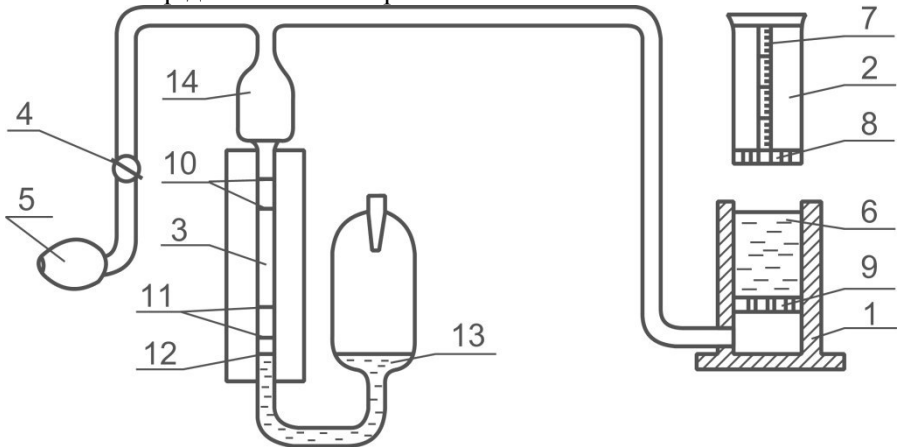


Рис 1. Схема поверхнеміра



За допомогою гумової груші створюється розрідження в системі (кран 4 знаходиться в положенні „відкрито”), під’єднаної до кювети із зразком. При цьому відбувається заповнення верхнього резервуару - 14 манометричною рідиною, після чого кран перекривається. З часом, внаслідок проходження повітря через зразок, відбувається поступове опорожнення верхнього балона: опускання рідини в манометрі до вихідного положення. За допомогою секундоміра вимірюється час проходження меніска між певною парою рисок (1-2 або 3-4)  $\tau$ , значення якого використовується при розрахунку питомої поверхні  $S_0$ .

Величина питомої поверхні  $S_0$  дисперсної речовини розраховують за формулою:

$$S_0 = \kappa M \sqrt{\tau} / m \quad (1)$$

де  $\kappa$  - стала приладу, яка для дрібнозернистих зразків  $\kappa_{1-2} = 23,1$  (верхня пара рисок), а для крупнозернистих зразків  $\kappa_{3-4} = 9,0$  (нижня пара рисок) - паспортні дані відкаліброваного поверхнеміра ПСХ-2;  $\tau$  - час проходження меніска рідини між парою вибраних рисок на манометрі, с;  $m$  - наважка досліджуваного матеріалу, г;  $M$  - величина, що залежить від висоти шару дисперсної речовини  $L$  (см), вміщеної в гільзу приладу і динамічної в'язкості повітря  $\eta$  (пз) при температурі проведення дослідів.

Встановлено співвідношення для визначення величини  $M$ :

$$M = 0,14 \sqrt{120} \cdot \frac{1}{L} \cdot (4,9L - 3,33)^{1/2} \sqrt{\frac{1}{\eta}} \quad (2)$$

Значення істинної густини матеріалу досліджуваного зразка  $\rho$  визначається пікнометрично і розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1 - m_4 + m_3} \rho_p \quad (3)$$

де  $m_1$  - маса сухого пікнометра, г;  $m_2$  - маса пікнометра із інертною до матеріалу зразка рідиною, г;  $m_3$  - маса сухого пікнометра із зразком, г;  $m_4$  - маса пікнометра із зразком і рідиною, г.

Методика проведення вимірювань  $\rho$  описана в інструкції до лабораторної роботи № 3.



### 5.2.3. Завдання

Провести вимірювання питомої поверхні  $S_0$  зразків різних видів дисперсних будівельних матеріалів. Дослідити залежність питомої поверхні  $S_0$  від часу розтирання  $t$  речовини в керамічній ступці. Побудувати графік  $S_0 = f(t)$  і зробити висновки.

### 5.2.4. Хід роботи

1. Просушити досліджуваний матеріал до постійної маси при температурі 105-110°C і охолодити в ексікаторі до кімнатної температури (цемент попередньо просіяти через сито з сіткою № 008).
2. Перевірити на герметичність прилад.
3. Штангенциркулем виміряти внутрішній діаметр кювети  $d$ . На перфороване дно її покласти нижню прокладку.
4. Взяти наважку однієї порції зразка ( $g$ ) у відповідності із співвідношенням  $m = 3,33\rho$ , де  $\rho$  - густина досліджуваного матеріалу, і перенести його в кювету приладу. Легким постукуванням вирівняти поверхню порошку та покласти верхню прокладку і ущільнити зразок за допомогою плунжера, натискаючи на нього рукою. Користуючись ноніусом на планці плунжера і шкалою на поверхні кювети, визначити висоту шару досліджуваного матеріалу  $L$ .
5. Вийняти плунжер із кювети, перекрити долонею руки доступ повітря до неї, відкрити кран і за допомогою гумової груші створити розрідження в системі, а також під шаром матеріалу. Воно має бути таким, щоб верхній резервуар частково заповнився манометричною рідиною. Потім перекрити кран, зняти долоню із верхнього отвору кювети і за допомогою секундоміру визначити час  $\tau$  проходження меніска рідини в манометрі між відповідною парою рисок (1-2 або 3-4). Зробити не менше трьох паралельних вимірів.
6. Для одного із досліджуваних матеріалів зразок потрібно розтирати в керамічній ступці і через певні проміжки часу аналогічно визначити його питому поверхню  $S_0$ .
7. Істинну густину досліджуваного матеріалу  $\rho$  визначити пікнометричним методом.
8. Взяти із довідникової літератури значення динамічної в'язкості повітря  $\eta$  і густину рідини пікнометричної  $\rho_p$  при температурі



9. Одержані результати занести в таблиці та провести розрахунки.

Таблиця 1

Пікнометричне визначення істинної густини досліджуваного матеріалу при  $t =$   $\rho_p =$

№ з/п	$m_1$ г	$m_2$ г	$m_3$ г	$m_4$ г	$\rho$ г/см <sup>3</sup>	$\Delta\rho$ г/см <sup>3</sup>

Результат вимірювань та обчислень істинної густини  $\rho$  представити у вигляді:

$$\rho = \bar{\rho} \pm \Delta\bar{\rho} \quad \varepsilon = \frac{\Delta\bar{\rho}}{\bar{\rho}} 100\%$$

Таблиця 2

Визначення питомої поверхні  $S_0$  досліджуваного матеріалу при певному ступені дисперсності

№ з/п	$k$ -	$m$ г	$L$ см	$\eta$ пз	$M$ см <sup>2</sup> /с <sup>1/2</sup>	$\tau$ с	$\sqrt{\tau}$ с <sup>1/2</sup>	$S_0$ см <sup>2</sup> /г	$\Delta S_0$ см <sup>2</sup> /г

Результат вимірювань та обчислень питомої поверхні  $S_0$  представити у вигляді:

$$S_0 = \bar{S}_0 \pm \Delta\bar{S}_0 \quad \varepsilon = \frac{\Delta\bar{S}_0}{\bar{S}_0} 100\%$$

Таблиця 3

Залежність питомої поверхні  $S_0$  досліджуваної речовини від часу розтирання

№ з/п	1	2	3	4	5	6
$S_0, \text{см}^2/\text{г}$						
$t, \text{хв}$						

Залежність  $S_0 = f(t)$  представити графічно та зробити висновки.

### 5.2.5. Контрольні запитання

1. Чим визначаються властивості будівельних речовин і виробів з них?
2. Що таке дисперсність та питома поверхня  $S_0$  матеріалу?
3. Дати визначення і записати формули для істинної і середньої густини та пористості. В яких одиницях вони вимірюються?
4. На які технологічні параметри і характеристики готових виробів впливає тонкість помелу, зерновий склад і форма частинок



матеріалу?

5. Як пояснити, що при збільшенні питомої поверхні  $S_0$  речовини зростає його хімічна активність?
6. Який взаємозв'язок між розміром частинок  $r$  і питомою поверхнею матеріалу  $S_0$ ?
7. Пояснити будову приладу ПСХ-2 та принцип його роботи.
8. Які відомо методи визначення питомої поверхні матеріалів?
9. Зробити висновки з результатів виконаної роботи.

### 5.2.6. Література

1. Грег С., Синг К., Адсорбация, удельная поверхность, пористость. - М.: Мир, 1984. - 306 с.
2. Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию. - М.: Химия, 1983. - 264 с.
3. Кельцев Н.В. Основы адсорбационной техники. - М.: Химия, 1984. - 592 с.
4. Хигерович М.И., Меркин А.П. Физико-химические и физические методы исследования строительных материалов. - М.: Высш. шк., 1968. - 191 с.

#### Довідникові дані для лабораторних робіт № 1 та 2

Густина та в'язкість  $\rho$  і  $\eta$  води при різній температурі  $t$   
та нормальному атмосферному тиску

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , 10 <sup>-6</sup> кг/м·с	$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , 10 <sup>-6</sup> кг/м·с	$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , 10 <sup>-6</sup> кг/м·с
0	999,841	1797	20	998,203	1004	50	988,04	551
5	999,965	1518	25	997,044	895	60	983,21	470
10	999,700	1307	30	995,646	803	70	977,78	407
15	999,099	1140	40	992,21	655	80	971,80	357

В'язкість повітря при різних температурах  $\nu=f(t)$

$t$ , °C	В'язкість повітря, Н·см <sup>2</sup>	$\sqrt{\eta}$ , Н <sup>1/2</sup> · с <sup>1/2</sup> / м	$\sqrt{1/\eta}$ , м / Н <sup>1/2</sup> · с <sup>1/2</sup>
10	0,00001749	0,01322	75,64
20	0,00001808	0,01344	74,37



30	0,00001857 я	0,01362	73,38
----	--------------	---------	-------

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 10 \text{ пуаз}$$

$$1 \text{ пуаз} = 1 \text{ дин} \cdot \text{с} / \text{см}^2 = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2 = 1 \text{ кг} / (\text{м} \cdot \text{с}^2)$$

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ кг} / (\text{м} \cdot \text{с})$$

$$1 \text{ мкПа} \cdot \text{с} = 10^{-6} \text{ кг} / (\text{м} \cdot \text{с})$$





# МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОРОВОГО ПРОСТОРУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

## 5.3. Лабораторна робота № 3

### Визначення густини і пористості твердих тіл

**Мета роботи:** визначити пікнометричним методом істинну густину, методом гідростатичного зважування - середню густину, методом водопоглинання - відкрити пористість і шляхом розрахунку - повну і закрити пористість керамічних та інших будівельних виробів.

**Прилади і обладнання:** оптичний мікроскоп, аналітичні і гідростатичні терези, комплект різноважок, керамічна ступка, пікнометри, хімічний посуд, електрична плитка, тигель для парафіну, пензлик.

**Матеріали:** керамічна плитка та інші будівельні вироби, парафін, дистильована вода.

#### 5.3.1. Визначення густини і пористості твердих тіл

До фізичних властивостей будівельних матеріалів відносяться густина і пористість. Розділяють густину речовини (істинну)  $\rho$  і густину матеріалу (середню)  $\rho_0$ . Істинна густина  $\rho$  - це фізична величина, яка чисельно дорівнює масі речовини в одиниці об'єму і визначається за формулою:

$$\rho = m / V \quad (1)$$

Середня густина  $\rho_0$  - це величина, яка дорівнює відношенню маси матеріалу до об'єму, який він займає в натуральному вигляді, тобто із врахуванням пор і порожнин, та визначається за формулою:

$$\rho_0 = m / V_0 \quad (2)$$

В системі одиниць СІ  $\rho$  і  $\rho_0$  вимірюється в  $\text{кг}/\text{м}^3$ , в СГС  $\text{г}/\text{см}^3$ , ( $1 \text{ г}/\text{см}^3 = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ).

Якщо речовина займає тільки частину об'єму матеріалу, а інша частина є пори і пустоти, то густина матеріалу (середня густина)  $\rho_0$  менша густини речовини (істинної густини)  $\rho$ , а коли речовина займає весь об'єм матеріалу, тоді  $\rho = \rho_0$ . Густина пористих матеріалів завжди менша їх істинної густини. Наприклад, густина легкого бетону  $500\text{-}1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а його істинна густина  $2600 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Середня густина будівельних матеріалів коливається в дуже широких межах:

від 20 (пориста пластмаса – міпора) до 7860 кг/м<sup>3</sup> (сталь).

Ступінь заповнення об'єму матеріалу твердою речовиною називають коефіцієнтом густини  $K_{гсм}$  або відносною густиною  $d$ . Визначається вона як відношення густини матеріалу  $\rho_0$  до густини речовини  $\rho$

$$d = K_{гсм} = \rho_0 / \rho \quad (3)$$

Будова пористого матеріалу характеризується загальною, відкритою і закритою пористістю, розподілом пор по їх радіусам, середнім радіусом пор і питомою їх поверхнею.

Пористістю  $\Pi$  називають відношення об'єму пор в матеріалі  $V_{пор}$  до об'єму матеріалу  $V_0$ , і її значення визначається за рівнянням:

$$\Pi = \frac{V_{пор}}{V} = \frac{\frac{m}{\rho} - \frac{m}{\rho_0}}{\frac{m}{\rho}} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho} = 1 - d \quad (4)$$

В сумі  $\Pi + d = 1$  (або 100%), тобто висушений матеріал можна уявити як такий, що складається із твердого каркасу, який забезпечує міцність виробу і повітряних пор.

Під відкритою пористістю  $\Pi_0$  розуміють весь об'єм всіх пор матеріалу, сполучених між собою із поверхнею виробу. Вона дорівнює відношенню всього об'єму всіх пор, які насичені водою, до об'єму матеріалу  $V_0$ :

$$\Pi_0 = \frac{m_2 - m_1}{V_0} \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O}} \quad (5)$$

де  $m_1$ , і  $m_2$  - маса зразка відповідно в сухому і насиченому водою стані.

Відкриті пори матеріалу сполучені із оточуючим середовищем можуть сполучатись між собою, тому вони заповнюються водою при звичайних умовах насичення, наприклад, при зануренні зразка матеріалу у ванну із водою. Відкриті пори збільшують проникність і водопоглинання матеріалу і погіршують його морозостійкість. Закрита пористість  $\Pi_3$  дорівнює:

$$\Pi_3 = \Pi - \Pi_0 \quad (6)$$

Пористий матеріал має відкриті і закриті пори. Збільшення закритої пористості за рахунок відкритої підвищує його довговічність. Проте в звукопоглинаючих матеріалах і виробках свідомо створюється відкрита пористість і перфорація, які необхідні для



покращення поглинання звукової енергії.

Розподіл пор за розмірами характеризується інтегральною кривою розподілу об'єму пор за їх радіусами в одиниці об'єму матеріалу (рис.1) і диференціальною кривою розподілу об'єму пор за їх радіусами (рис.2):

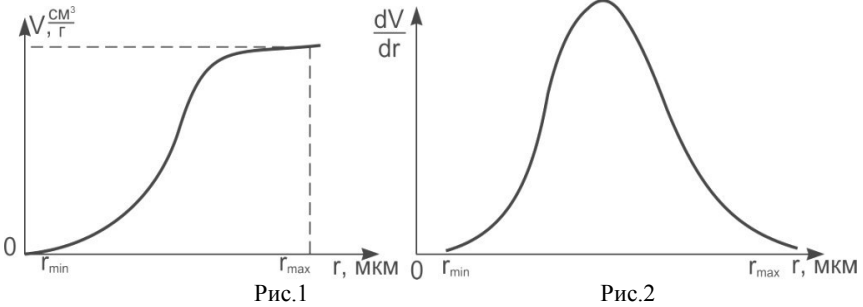


Рис.1  
Рис.2  
Інтегральна (рис.1) та диференціальна (рис.2) криві розподілу пор за радіусами.

За розмірами пори поділяють на три групи: мікрокапіляри при  $r \leq 0,1$  мкм, макрокапіляри  $0,1 < r < 10$  мкм і некапілярні пори, тобто пори із умовними радіусами  $r \geq 10$  мкм, які заповнюються водою тільки при зануренні матеріалу в рідину. Мікропори розділяють на ультрамікропори при  $r \leq 50 \text{ \AA}^0$  і перехідні мікропори, коли  $50 \text{ \AA}^0 < r < 1000 \text{ \AA}^0$ .  $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ ,  $1 \text{ \AA}^0 = 10^{-10} \text{ м}$ .

За формою та взаємному розміщенню пори і капіляри класифікують на кілька груп: а) за формою поперечного перерізу: рівні, трубчасті, „пляшкоподібні”, клиновидні, щілеві та їх комбінації; б) за просторовим орієнтуванням: прямі, зі звивинами, петлеподібні; в) за неперервністю: відкриті (каналоутворюючі), глухі (відкриті з однієї сторони), закриті.

Питома поверхня порового простору  $S_0$ ,  $\text{см}^2/\text{г}$  пропорційна масі  $m$  адсорбованого водяного пару (або газу), необхідного для повного покриття мономолекулярним шаром всієї внутрішньої поверхні пор (в г на 1 г сухого матеріалу):

$$S_0 = \frac{a_1 \cdot N_A}{M} m \quad (7)$$

де  $a_1$  - поверхня, яка покрита однією адсорбованою молекулою; для молекул води  $a_1 = 10,6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ;  $N_A = 6,06 \cdot 10^{23}$  - число Авогадро;  $M$  - молекулярна маса адсорбованого газу (для водяного пару  $M = 18$ ).



Відомо, що навіть незначна за об'ємом кількість порот в матеріалах приводить до значної зміни їх властивостей. Всі властивості матеріалів визначаються їх складом і будовою, а також величиною і характером пористості.

### 5.3.2 Визначення істинної густини твердих тіл за допомогою пікнометра

Метод визначення істинної густини твердих тіл (речовини)  $\rho$  за допомогою пікнометра є одним із найбільш точних. Пікнометр - це скляна посудина певного об'єму (частіше всього на 25, 50 або 100 мл). Форма пікнометра може бути різною. Найбільш поширені пікнометри у вигляді колбочки з витягнутою вузькою шийкою, на якій нанесено кільцеву мітку (рис.1). Мітка показує скільки рідини потрібно налити, щоб вона займала зазначений на пікнометрі об'єм.

Густина досліджуваної речовини визначається за допомогою чотирьох послідовних зважувань. Скористаємось відомим співвідношенням (1) для визначення істинної густини речовини:

$$\rho = m / V \quad (1)$$

де  $m$  - маса речовини, а  $\rho$  - об'єм, який вона займає.

За першим зважуванням визначають масу порожнього пікнометра  $m_1$ , за другим - масу пікнометра із досліджуваним зразком  $m_3$ , за третім - масу пікнометра із рідиною  $m_2$ , за четвертим - масу пікнометра із зразком і рідиною заповненої до риски пікнометра -  $m_4$ . Маса зразка  $m_3$  має бути такою, щоб досліджувана речовина займала лише частково зазначений об'єм пікнометра  $V_0$ , наприклад, в межах  $(1/3 - 1/2) \cdot V_0$ . Тоді масу зразка  $m$  можна розрахувати як:

$$m = m_3 - m_1 \quad (2)$$

а об'єм зразка  $V$  дорівнює різниці між об'ємом рідини, що заповнює порожній пікнометр  $V_p$  і об'ємом рідини в пікнометрі із зразком -  $V'_p$ :



Рис. 1 Пікнометр



$$V = V_p - V'_p \quad (3)$$

Із визначення густини можна записати, що:

$$V_p = (m_2 - m_1) / \rho_p \quad (4)$$

$$V'_p = (m_4 - m_3) / \rho_p \quad (5)$$

де  $\rho_p$  - густина рідини при температурі досліджень.

Підставивши вирази (4) і (5) у формулу (3), матимемо:

$$V = \frac{m_2 - m_1}{\rho_p} - \frac{m_4 - m_3}{\rho_p} = \frac{m_2 - m_1 - m_4 + m_3}{\rho_p} \quad (6)$$

Одержані вирази для маси зразка (2) і для об'єму, який він займає (6), підставляємо у вихідну формулу (1), тоді співвідношення:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1 - m_4 + m_3} \cdot \rho_p \quad (7)$$

є робочою формулою для розглянутого методу.

### 5.3.3. Хід роботи

1. Зразок будівельного матеріалу розтерти в керамічній ступці масою 50-60 г.

2. За допомогою оптичного мікроскопу типу МБМ-9 розглянути поверхню диспергованого матеріалу і виробу з нього.

3. На аналітичних терезах зважити кожен із 3-х порожніх пікнометрів. Значення маси  $m_1$  і результати наступних зважувань занести в табл. 1.

4. Через воронку, використовуючи шпатель, частково заповнити пікнометри досліджуванним матеріалом і зважити їх. Одержимо значення маси  $m_3$ .

5. Пікнометри зі зразком заповнити рідиною інертною до матеріалу (в певних випадках може бути дистильована вода) до мітки так, щоб меніск був дотичний до риски на шийці пікнометра, і зважити. Одержимо значення маси  $m_4$ .

6. Спорожнити пікнометри, промити їх і заповнити тією ж рідиною або водою і зважити. Одержимо значення маси  $m_2$ . В процесі виконання роботи шляхом вакуумування видалити із досліджуваної речовини та рідини повітря.

7. Із довідникової літератури знайти густину пікнометричної рідини  $\rho_p$  при температурі дослідів.

8. Одержані результати занести в табл.1, за формулою (7) прове-



сти розрахунки істинної густини  $\rho$  матеріалу і записати остаточний результат.

$t =$   $\rho_p =$   $V =$  Таблиця 1

№ з/п	Маса				Густина	
	$m_1, \text{г}$	$m_2, \text{г}$	$m_3, \text{г}$	$m_4, \text{г}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$\Delta\rho, \text{г/см}^3$

Остаточний результат можна представити у вигляді:

### 5.3.4. Визначення середньої густини твердих тіл за допомогою гідростатичного зважування

В основі методу визначення середньої густини тіл (матеріалу) гідростатичним зважуванням лежить закон Архімеда, згідно з яким на тіло, занурене в рідину або газ, діє вертикально вгору виштовхувальна сила, чисельно рівна вазі рідини або газу, витіснених цим тілом і прикладена до центру маси рідини або газу, об'єму зануреного тіла (рис.1).

Згідно з означенням закону Архімеда і умови рівноваги гідростатичних терез, матимемо:

$$F_m - F_A = P \quad (1)$$

або

$$M \cdot g - \rho_p \cdot V \cdot g = m \cdot g \quad (2)$$

де  $M$  – маса зразка;  $m$  – маса рівноважок;  $\rho_p$  – густина рідини при температурі досліджу;  $V$  – об'єм зразка;  $g$  – прискорення вільного падіння.

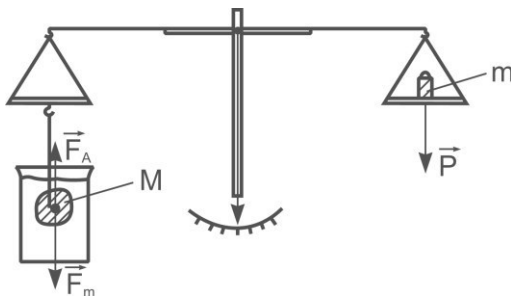


Рис. 1. Гідростатичні терези

Густину досліджуваного матеріалу визначають за допомогою трьох послідовних зважувань. Скористаємось відомим співвідношенням для визначення середньої густини матеріалу:

$$\rho_0 = m / V_0 \quad (3),$$

де  $m$  - маса матеріалу, а  $V_0$  - об'єм, який він

займає.

За першим зважуванням визначають масу зразка в повітрі  $m$ , за



другим масу зразка, покритого шаром гідроізолюючого матеріалу (наприклад, парафіну) –  $m_1$ , так само в повітрі, за третім – масу рівно важок, що зрівноважують парафіновий зразок у воді –  $m_2$ .

Для розрахунку густини матеріалу  $\rho_0$ , потрібно знати, окрім маси зразку  $m$ , яку визначили зважуванням, ще і його об'єм  $V_0$ :

$$V_0 = V'_0 - V_{\text{п}} \quad (4)$$

де  $V'_0$  - об'єм зразка разом із покриттям парафіну;  $V_{\text{п}}$  - об'єм парафіну на поверхні зразка. Із визначення густини можна записати, що:

$$V'_0 = V_{\text{в}} = m_{\text{в}} / \rho_{\text{в}} = (m_1 - m_2) / \rho_{\text{в}} \quad (5)$$

де  $V_{\text{в}}$  – об'єм витісненої зразком води;  $m_{\text{в}}$  - маса води об'єму  $V_{\text{в}}$ , а  $\rho_{\text{в}}$  - густина води при температурі досліджу.

Об'єм парафіну на поверхні зразка  $V_{\text{п}}$  можна визначити таким чином:

$$V_{\text{п}} = m_{\text{п}} / \rho_{\text{п}} = (m_1 - m) / \rho_{\text{п}} \quad (6)$$

де  $m_{\text{п}}$  і  $\rho_{\text{п}}$  - маса і густина парафіну на поверхні зразка.

Для розрахунку об'єму зразка  $V_0$  співвідношення (5) і (6) підставимо у формулу (4) і отримаємо, що:

$$V_0 = (m_1 - m_2) / \rho_{\text{в}} - (m_1 - m) / \rho_{\text{п}} \quad (7)$$

Нарешті, підставивши вираз для об'єму досліджуваного матеріалу (7) у співвідношення (3) одержимо робочу формулу для визначення середньої густини зразка:

$$\rho_0 = \frac{m}{(m_1 - m_2) / \rho_{\text{в}} - (m_1 - m) / \rho_{\text{п}}} \quad (8)$$

### 5.3.5. Хід роботи

1. За допомогою гідростатичних терезів зважити в повітрі три зразки матеріалу довільного геометричного розміру. Значення маси  $m$  та результати наступних зважувань занести в табл.2.

2. За допомогою пензлика і розплавленого парафіну нанести на поверхню зразків тонкий шар гідроізолюючого матеріалу.

3. На цих же терезах зважити запарафінований зразок у повітрі (маса  $m_1$ ) і у воді (маса  $m_2$ ).

4. Із довідникової літератури знайти густини дистильованої води  $\rho_{\text{в}}$  і парафіну  $\rho_{\text{п}}$  при температурі досліджу.

5. Одержані результати занести в табл.2, за формулою (8) провести розрахунки середньої густини  $\rho_0$  матеріалу і записати остаточ-

Таблиця 2

№ з/п	Маса			Густина	
	m, г	m <sub>1</sub> , г	m <sub>2</sub> , г	ρ, г/см <sup>3</sup>	Δρ, г/см <sup>3</sup>

Остаточний результат представити у вигляді

$$\rho = \bar{\rho} \pm \Delta\bar{\rho} \quad \varepsilon = \frac{\Delta\bar{\rho}}{\bar{\rho}} 100\%$$

### 5.3.6. Визначення пористості твердих тіл

#### Загальна пористість.

Загальна пористість матеріалу П визначається розрахунком за відомим значенням істинної густини речовини ρ і середньої густини матеріалу ρ<sub>0</sub> (співвідношення (3.4)), а саме:

$$П = (1 - \rho_0 / \rho) \cdot 100\% \quad (1)$$

#### Відкрита пористість.

Відомо, що об'єм відкритих капілярних пор у зразку П<sub>0</sub> у відсотках дорівнює об'ємному водопоглинанню W<sub>0</sub>:

$$П_0 = W_0 \quad (2)$$

В свою чергу W<sub>0</sub> може бути визначено дослідним шляхом за співвідношенням:

$$W_0 = (W_m \cdot \rho_0) / \rho_v \quad (3)$$

де W<sub>m</sub> - водопоглинання за масою; ρ<sub>0</sub> - середня густина матеріалу; ρ<sub>v</sub> - густина води при температурі досліді.

Водопоглинання зразка за масою W<sub>m</sub> визначається експериментально і розраховується за формулою:

$$W_m = (m_b - m_c) / m_c \cdot 100\% \quad (4)$$

де m<sub>c</sub> і m<sub>b</sub> - маса сухого і водонасиченого зразка відповідно.

Підставимо вираз (4) у співвідношення (3), одержимо:

$$W_0 = \frac{(m_b - m_c) \cdot \rho_0}{m_c \cdot \rho_v} \cdot 100\% = \frac{V_b}{V_0} \cdot 100\% \quad (5)$$

де V<sub>b</sub> – об'єм води в капілярах і порожнинах (в порах) зразка; V<sub>0</sub> - натуральний об'єм зразка.

Для визначення маси сухого зразка m<sub>c</sub> його вміщують в сушильну шафу при 105 ± 5°C і витримують до того часу, поки зважування не покаже постійність його маси, тобто, коли при двох послідовних зважуваннях маса зразка відрізнятиметься до 0,1%.

При визначенні маси водонасиченого зразка m<sub>b</sub> потрібно підтри-



мувати температуру води у ванночці в межах  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , а рівень має бути вищий від поверхні матеріалу на 50 мм. Рекомендується зважувати зразок через кожні 24 год на гідростатичних або на аналітичних терезах. У другому випадку зразок, вийнятий із води, попередньо протирають віджатою вологою ганчіркою, а масу води, що витікла із пор зразка на шальку терезів, потрібно включати в масу насиченого зразка. Дослід продовжують до того часу, доки результати двох послідовних зважувань не будуть відрізнятись до 0,1%.

### Закрита пористість

Закрита пористість матеріалу  $\Pi_3$  розраховується за одержаними результатами визначеної загальної пористості  $\Pi$  і відкритої пористості  $\Pi_0$ , а саме:

$$\Pi_3 = \Pi - \Pi_0 \quad (6)$$

### 5.3.7. Хід роботи

#### 1. Загальна пористість.

1.1. Величину загальної пористості досліджуваних зразків матеріалу  $\Pi$  розрахувати за формулою (1), використовуючи попередньо одержані результати істинної і середньої густини -  $\rho$  і  $\rho_0$  відповідно.

#### 2. Відкрита пористість.

2.1. За умовами проведення дослідів, описаними вище, визначити масу сухих зразків  $m_c$  і масу водонасичених  $m_b$ .

2.2. За формулою (4) визначити водопоглинання зразків за масою  $W_m$ , а за формулою (3) та по відомим значенням середньої густини матеріалу  $\rho_0$  і густини води  $\rho_v$  при температурі дослідів визначити об'ємне водопоглинання  $W_0$ , яке, згідно означення, дорівнюватиме відкритій пористості  $\Pi_0$ .

2.3. Одержані результати занести в табл.3, провести розрахунки і записати остаточний результат.

t =		$\rho_p =$		V =		Таблиця 3
№ з/п	$m_c, \text{г}$	$m_b, \text{г}$	$W_m, \%$	$W_0$ ( $\Pi_0$ ), %	$\Delta\Pi_0, \%$	

Остаточний результат представити у вигляді

$$\rho = \bar{\rho} \pm \Delta\bar{\rho} \quad \varepsilon = \frac{\Delta\bar{\rho}}{\bar{\rho}} 100\%$$



### 3. Закрита пористість.

3.1. Закриту пористість досліджуваних зразків матеріалу розрахувати за формулою (6), використовуючи попередньо одержані результати загальної і відкритої пористості  $\Pi$  і  $\Pi_0$  відповідно.

### 5.3.8. Контрольні запитання

1. Дати визначення і записати формули для істинної густини речовини  $\rho$  і середньої густини матеріалу  $\rho_0$ . Вказати розмірність у системі одиниць СІ та СГС, а також їх співвідношення.

2. Що таке відносна густина  $d$  або коефіцієнт густини  $K_{гсм}$  і яке має значення ця величина для характеристики будівельних матеріалів?

3. Дати визначення і записати співвідношення для загальної пористості  $\Pi$ , відкритої  $\Pi_0$  і закритої  $\Pi_3$  матеріалів.

4. Як характеризується розподіл пор за розмірами (інтегральна та диференціальна криві розподілу об'єму пор за їх радіусами)?

5. Класифікація пористих тіл за розмірами і формою капілярів.

6. Дати визначення і записати співвідношення для розрахунку питомої поверхні порового простору.

7. Пояснити суть використаних у роботі методів досліджень і записати робочі формули.

8. Дати визначення закону Архімеда і записати співвідношення, на якому базується метод гідростатичного зважування.

9. Дати визначення і записати співвідношення для водопоглинання зразків за масою  $W_m$  і за об'ємом  $W_0$ .

10. Проаналізувати одержані результати досліджень і оцінити їх похибки вимірювань.

### 5.3.9. Література

1. ГОСТ 12730.0-78 - ГОСТ 12730.4-78. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости. М-1979 - 19с.

2. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. - М.: Стройиздат, 1986, - 688с.

3. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. - М.: Стройиздат, 1979 - 344с.





## 5.4 Лабораторна робота № 4

### Визначення показників пористості матеріалів за кінетикою їх водопоглинання

**Мета роботи:** дослідити кінетику водопоглинання капілярно-пористими матеріалами та визначити параметри порової структури а саме: показників середнього розміру та однорідності розмірів відкритих капілярних пор.

**Прилади і обладнання:** камера нормального твердіння, сушильна шафа, гідростатичні терези, різноважки, термометр, годинник, кювета із водою.

**Матеріали:** зразки бетону - кубики з ребром 7 см або циліндри з діаметром і висотою 7 см, зразки кераміки та гірських порід.

#### 5.4.1. Визначення показників пористості матеріалів за кінетикою їх водопоглинання

Поровим простором матеріалу вважають всі його несучільності. В капілярних порах ( $5 \cdot 10^{-9} < r < 10^{-5}$  м) поверхня рідини приймає форму, зумовлену силами поверхневого натягу, і мало спотворюється за рахунок сил тяжіння. Капілярні пори поділяють на мікрокапіляри та макрокапіляри. Основним критерієм при такому поділі є відношення пор до явища капілярної конденсації. Мікрокапіляри із радіусами  $r < 10^{-7}$  м можуть заповнюватись вологою за рахунок сорбції парів із оточуючого середовища і утворювати плівки на стінках. Макрокапіляри із радіусами  $r > 10^{-7}$  м можуть заповнюватись рідиною тільки при безпосередньому контакті із нею. Крім того, особливістю макрокапілярів є те, що вони не тільки сорбують вологу із повітря, а навпаки - віддають в атмосферу вологу, яка в них знаходилась. Тому гігроскопічність матеріалу та їх рівноважна вологість залежить в першу чергу від співвідношення в них мікро- і макрокапілярів. Важливою закономірністю явища капілярної конденсації є те, що воно якісно не пов'язане із змочуваністю стінок капіляра, тобто гідрофобні мікрокапіляри можуть сорбувати вологу із повітря, а гідрофільні макрокапіляри - віддавати вологу в насичену водяними парами атмосферу. Некапілярні пори із радіусами  $r > 10^{-5}$  м являють собою міжзернові порожнини, тріщини тощо. За формою та взаємним розміщенням пори і капіляри класифікують на



кілька груп:

- а) за формою поперечного перерізу: рівні, трубчасті, „пляшкоподібні”, клиновидні, щілеві та їх комбінації;
- б) за просторовим орієнтуванням: прямі, із звивинами, петлеподібні;
- в) за неперервністю: відкриті (каналоутворювачі), глухі (відкриті із однієї сторони), закриті.

Властивості матеріалів визначаються їх складом і будовою, а також величиною і характером пористості. Будова пористого матеріалу характеризується загальною, відкритою і закритою пористістю, розподілом пор за їх радіусом (інтегральна та диференціальна криві), показниками середнього розміру та однорідності розмірів відкритих капілярних пор, питомою внутрішньою їх поверхнею, яку вираховують, використовуючи середній умовний радіус пор  $\bar{\lambda}$ .

Класифікація структури бетону включає три основних типи: мікроструктуру - структуру цементного каменю; мезоструктуру - структуру цементно-піщаного розчину; макроструктуру - двохкомпонентну систему розчин і крупний заповнювач.

Для визначення параметрів порової структури цементного каменю, розчину, бетону, кераміки та гірських порід використовують метод дослідження кінетики поглинання води, який дозволяє визначити показники середнього розміру та однорідності розмірів капілярних пор  $\bar{\lambda}$  і  $d$ . Криві поглинання капілярно-пористими матеріалами мають плавний експоненціальний характер і описуються функцією типу:

$$W_{\tau} = W_{\max} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_1}\right)^{\alpha}} \right], \quad (1)$$

де  $W_{\tau}$  - водопоглинання зразка в момент часу  $\tau$  (в год.), а  $W_{\max}$  - його максимальне значення (у відсотках за масою), а саме

$$W_{\tau} = W_m = (m_b - m_0) / m_0 \quad (2)$$

Для монокапілярного матеріалу величина  $\alpha = 1$ , а для різних по однорідності систем знаходиться в межах  $0 < \alpha < 1$  і може бути розрахована за формулою:

$$\alpha = \frac{\ln \left[ \ln \left( 1 - W_{\tau_2} / W_{\max} \right) / \ln \left( 1 - W_{\tau_1} / W_{\max} \right) \right]}{\ln \left( \tau_2 / \tau_1 \right)} \quad (3)$$

Величину  $\bar{\lambda}$  функції (4.1) розраховують за формулою:



$$\ln \bar{\lambda} = \ln \left[ h \left( W_{\max} / W_{\max} - W_{\tau} \right)^{\alpha} - \ln \tau \right] \quad (4)$$

На рис.1 приведено характерні види кривих водопоглинання  $W_{\tau} = f(\tau)$  пористих будівельних матеріалів: 1 – цементного каменю з В/Ц = 0,3; 2 - цементно-піщаного розчину складу 1:3 з В/Ц = 0,5; 3 - бетону з В/Ц = 0,4; 4 - пористого вапняку; 5 - щільного пісковика, а

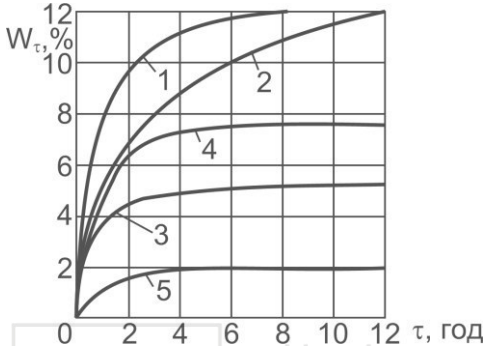


Рис. 1. Графіки залежності  $W_{\tau} = f(\tau)$

на рис.2 графічні залежності  $W_{\tau} / W_{\max} = f(\tau)$  для різних значень  $\bar{\lambda}$  і  $\alpha$ , розраховані за формулою (1).

Криві водопоглинання  $W_{\tau} = f(\tau)$  для різних за походженням полікапілярних матеріалів мають плавний характер експоненціального типу (рис.1),

які апроксимуються трьохпараметричною експоненціальною функцією (1), графіки якої в координатах  $W_{\tau} = W_{\max}$  і  $\tau$  мають вузлові точки часу  $\tau$ , при яких значення функції відповідає 0,632 від максимального значення (рис.2). При сталому параметрі  $\bar{\lambda}$  зменшення параметра  $\alpha$  приводить до зростання швидкості збільшення функції  $W_{\tau}$  в початковий період в порівнянні із функцією, для якої  $\alpha = 1$ .

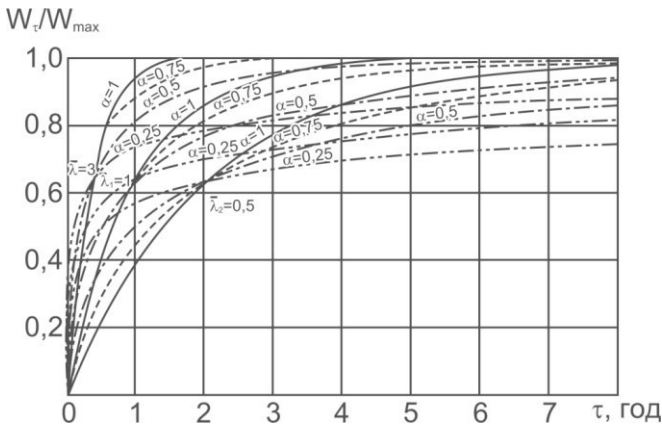


Рис.2. Графіки залежності  $W_{\tau} / W_{\max} = f(\tau)$



## 5.4.2. Опис експериментальної установки

Для проведення досліджень використано гідростатичні терези, опис яких приведено в інструкції до лабораторної роботи № 3.

### 5.4.3. Хід роботи

1. Для визначення параметрів пористості бетону виготовляють зразки кубиків із розміром  $7 \times 7 \times 7$  см або у вигляді циліндрів з діаметром і висотою 7 см при максимальному розмірі заповнювачів до 4 см і зберігають до початку випробовувань в камері нормального твердіння при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  та відносній вологості повітря не меншою за 95%. Масу зразків до початку випробовувань умовно приймають за масу  $m_0$ , що відповідає початковій рівноважній вологості  $m_p$ . Для одержання повітряно-сухих зразків їх попередньо поміщають у сушильну шафу із температурою  $105-110^\circ\text{C}$  та витримують від 25 до 50 годин до постійної маси -  $m_0$ .

2. Закріпити досліджуваний зразок до шальки гідростатичних терезів, зрівноважити їх та визначити  $m_0$ .

3. Занурити зразок у ванночку із водою і зафіксувати терези. Одноразово за годинником почати брати відлік часу  $t$ . Визначити температуру води.

4. З інтервалом через кожну годину опускати ванночку із водою, вимикати аретир терез та зрівноважувати їх, визначаючи масу зразка.

5. Дослідження проводити до повного насичення водою пор зразка, тобто до максимально можливого значення  $m_b$ .

6. Результати вимірів записати в табл. зошита для лабораторних робіт за формою:

	$t =$	$m_0 =$		
№ з/п	$\tau$ , год	$m_b$ , г	$m_b - m_0$ , г	$W_m = W_\tau$ , %

7. Розрахунок водопоглинання  $W_m = W_\tau$

8. Накреслити графік залежності  $W_\tau = f(\tau)$ . Використовуючи співвідношення (1–4) та номограму (рис.1), розрахувати показники пористості досліджуваного матеріалу  $\bar{\lambda}$  і  $\alpha$ . Зробити висновки.



#### 5.4.4. Порядок обробки результатів вимірювань

Дослідження кінетики поглинання зразком рідини, зокрема води, доцільно проводити безперервним або дискретним гідростатичним зважуванням. З графіків  $W_\tau / W_{\max} = f(\tau)$  видно, що для вузлових точок характерні такі залежності:

$$\bar{\lambda} \tau_{\text{вузл}} = 1 \quad (1)$$

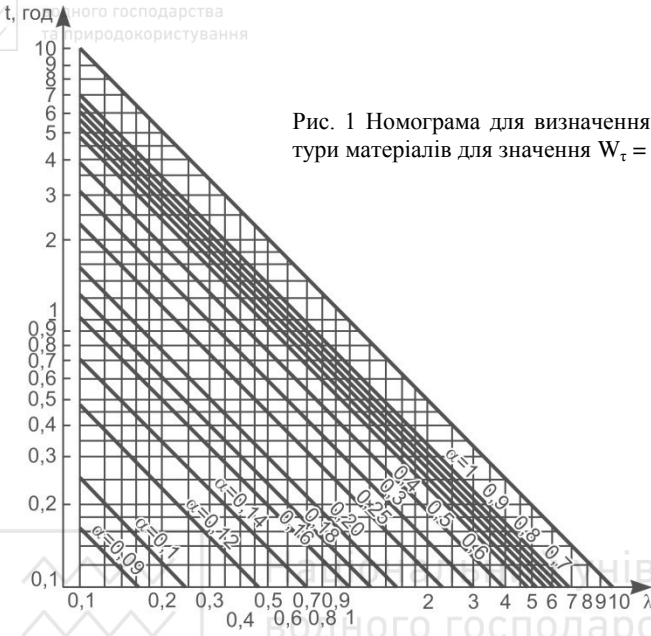
$$W_{\text{вузл}} = W_{\max} \left( 1 - e^{-1} \right) = 0,632 W_{\max} \quad (2)$$

Використовуючи результати експериментальних досліджень залежності  $W_\tau = f(\tau)$  можна визначити  $W_{\max}$  як асимптоту кривої кінетики поглинання зразком води.

Величину  $\bar{\lambda}$  обчислюють в такій послідовності. На графік  $W_\tau = f(\tau)$  наносять точку  $W_{\text{вузл}} = 0,632 W_{\max}$  і визначають координату  $\tau_{\text{вузл}}$  та вираховують величину  $\bar{\lambda} = 1 / \tau_{\text{вузл}}$  (3).

$$\alpha = \ln \ln \left( W_{\max} / W_{\max} - W_\tau \right) / \left( \ln \bar{\lambda} + \ln \tau \right) \quad (4)$$

Із виразу (4) видно, що при фіксованому значенню величини  $W_\tau$  (в логарифмічних координатах  $\bar{\lambda}$  і  $\tau$ ) величина  $\alpha$  є лінійною відносно  $\tau$ . На рис. 1 приведено номограму для визначення параметра  $\bar{\lambda}$  і  $\alpha$  при фіксованому значенні  $W_\tau = 0,5 W_{\max}$ . Величину  $\alpha$  за номограмою визначають у такій послідовності. На графіку  $W_\tau = f(\tau)$  знаходять абсцису  $\tau_{0,5}$  точки  $W_\tau = 0,5 W_{\max}$ , потім на номограмі визначають точку з координатами  $\bar{\lambda}$  і  $\tau_{0,5}$  і встановлюють, якому значенню параметра  $\alpha$  вона відповідає. При необхідності величину  $\alpha$  знаходять шляхом інтерполяції.



### 5.4.5. Контрольні запитання

1. Дати визначення порового простору, капілярних та некапілярних пор.
2. Який критерій поділу на мікро- та макрокапіляри, які їх розміри і особливості сорбції вологи?
3. Класифікація пор і капілярів за формою та взаємним розміщенням.
4. Класифікація структури бетону.
5. Записати формулу, що описує поглинання вологи капілярно-пористими матеріалами та пояснити суть показників пористості.
6. Зобразити вигляд графічних залежностей  $W_{\tau} = f(\tau)$  та  $W_{\tau}/W_{\max} = f(\tau)$  та дати пояснення.
7. Який порядок обробки результатів вимірювань у визначенні показників пористості  $\bar{\lambda}$  і  $\alpha$ ?
8. Що означає водопоглинання за масою та об'ємом, записати їх формули, який взаємозв'язок між цими величинами.
9. Пояснити одержані результати досліджень і яке практичне



### 5.4.6. Література

1. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. - М.: Стройиздат, 1979. - 344 с.
2. ГОСТ 12730.0-78 - ГОСТ 12730.4-78. Бетоны. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения и пористости.

### **Визначення в'язкості речовин в рідкому стані та дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем**

## 5.5. Лабораторна робота № 5

### **Визначення в'язкості лаків, фарб та модельних розчинів**

**Мета роботи:** провести вимірювання умовної в'язкості лаку, фарби або модельного розчину та дослідити вплив температури і концентрації на умовну в'язкість модельних аналогів - водних розчинів гліцерину.

**Прилади і обладнання:** віскозиметри типу ВЗ-1 і ВУ, секундомір, термометри, мішалка, мірні циліндри на 50 і 250 мл, хімічні стакани на 100 і 400 мл, промивалка.

**Матеріали:** лак, фарба або вазелінове масло, 5% і 50%-і водні розчини гліцерину, органічний розчинник, дистильована вода.

#### **5.5.1. В'язкість рідин та метод визначення умовної в'язкості речовин у рідкому стані**

Внаслідок теплового руху молекул речовини відбуваються безперервні зміни їх швидкостей і енергій. Якщо в середовищі існує просторова неоднорідність густини, температури або швидкості руху окремих шарів, то на тепловий рух молекул накладається впорядкований рух, який веде до вирівнювання таких неоднорідностей. Ці процеси називаються явищами переносу, до яких відносяться дифузія, теплопровідність і внутрішнє тертя або в'язкість. У кожному з них відбувається перенесення відповідно маси, енергії, кількості руху або імпульсу із однієї частини простору в іншу до тих пір, доки не встановиться їх рівномірний розподіл у всьому



В'язкість рідини зумовлена передачею кількості руху від одного шару рідини до іншого, що рухаються з різними швидкостями. При цьому імпульс переноситься від шару, швидкість якого є більшою, до шарів, що мають меншу швидкість. Отже, в'язкість - це властивість рідини чи газу вирівнювати швидкості руху різних шарів. У загальному випадку рівняння, яке описує в'язкість, має вигляд:

$$\Delta mV = -\eta \frac{dV}{dx} S \Delta t \quad (1)$$

де  $\Delta mV$  - зміна кількості руху, яка дорівнює імпульсу, передано-му від одного шару до іншого;  $dV/dx$  - градієнт швидкості (зміна швидкості на одиницю довжини в напрямку, перпендикулярному до руху шарів);  $\eta$  - коефіцієнт внутрішнього тертя (в'язкість);  $S$  - площа поверхні шару, по якій відбувається зсув його;  $\Delta t$  - час.

Знак „мінус” у виразі (1) означає, що імпульс передається в напрямку, протилежному градієнту швидкості.

Внаслідок дії між молекулами сил взаємного притягання нижні шари по відношенню до верхніх, яким надали швидкість  $V_1$ , будуть рухатись із швидкістю  $V_2$ , причому її значення буде тим меншим, чим далі вони знаходяться. Верхній шар захоплює нижній, що намагається перешкодити, затримати рух попереднього. Опір, що чинить одна частина рідини відносно іншої, як було зазначено, одержав назву внутрішнього тертя або в'язкості. На рис.1 приведено схему, що пояснює її виникнення.

Основний закон в'язкої течії був встановлений Ньютоном (1687 р.)

$$F = -\eta \frac{dV}{dx} S \quad (2)$$

Звідки

$$\eta = -F / \frac{dV}{dx} S \quad (3)$$

Величина  $\eta$  має фізичний зміст сили, що діє між двома шарами рідини з площею дотикання  $S$  рівній одиниці площі при градієнті швидкості, що також дорівнює одиниці. Коефіцієнт  $\eta$  називають коефіцієнтом динамічної в'язкості. Він пов'язаний з коефіцієнтом кінематичної в'язкості  $\nu$  співвідношенням:

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad (4)$$





В СІ кінематична в'язкість вимірюється в  $\text{м}^2/\text{с}$ , динамічна - в  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

Для визначення в'язкості найбільш поширені капілярний метод, метод падаючої кульки і метод вивчення обертання циліндру в рідині. У випадку досить в'язких рідин, таких як лаки, фарби і нафтопродукти, що відносяться до ньютонівських рідин і мають вільну текучість, використовують метод визначення умовної в'язкості.

Умовною в'язкістю  $\text{ВУ}_t$  називають відношення часу  $\tau$  витікання рідини із віскозиметра типу ВУ-200 мл, а типу ВЗ - 50 мл досліджуваної речовини при певній температурі  $t$  до часу  $\tau_0$  витікання відповідно 200 або 50 мл дистильованої води при температурі  $20^\circ\text{C}$ , що є постійною приладу:

$$\text{ВУ}_t = \tau / \tau_0 \quad (5)$$

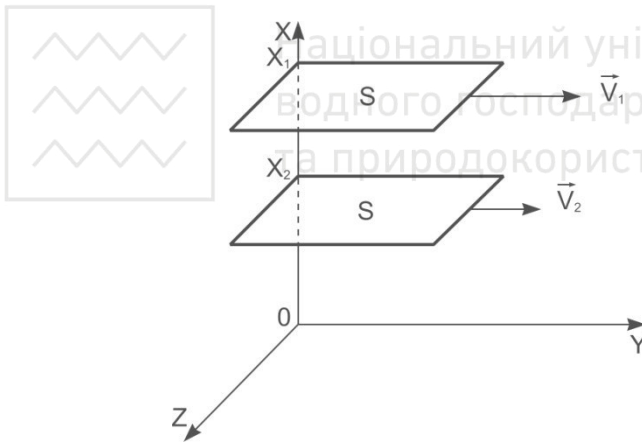


Рис.1. Схема руху шарів рідини

### 5.5.2. Опис експериментальної установки

Для вимірювання умовної в'язкості використовують прилад типу ВУ або ВЗ-1, приведений на рис. 1 Він складається з резервуару 1, який переходить в нижній частині в конус із роз'ємним соплом 2. На внутрішній стінці резервуару по обвідній нанесена риска - як

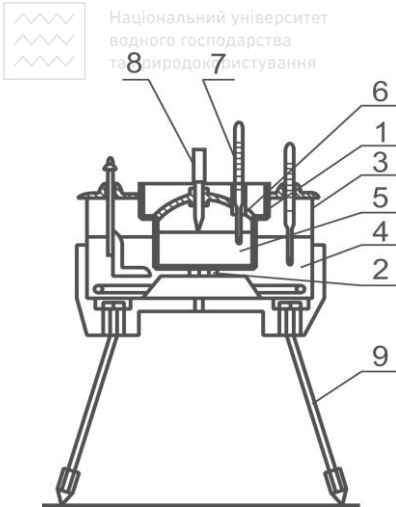


Рис. 1. Віскозиметр для вимірювання умовної в'язкості

прилад горизонтально.

Принцип дії віскозиметра полягає у визначенні часу витікання певного об'єму рідини через сопло при заданій температурі.

### 5.5.3. Завдання №1. Хід роботи

За допомогою віскозиметра типу ВЗ-1 виміряти умовні в'язкості лаку і фарби або модельної рідини при кімнатній температурі.

1. Перед проведенням досліду, якщо резервуар віскозиметра забруднений, промити його розчинником для лаку або фарби, висушити, а потім ополоснути поверхню дистильованою водою із промивалки.

2. Встановити віскозиметр на триногу, сопло закрити фіксатором із притертим наконечником. Резервуар віскозиметра заповнити до риски дистильованою водою. Відрегулювати горизонтальне положення приладу. Виміряти температуру еталонного зразка (дистильованої води)  $t_{H_2O}$ .

3. Вийняти фіксатор і одночасно за допомогою секундоміру визначити час витікання із сопла дистильованої води  $\tau_0$ . Зробити не і менше п'яти паралельних вимірів.

4. Резервуар віскозиметра просушити і в тій самій послідовності

показник рівня рідини і для горизонтального встановлення віскозиметра. Резервуар 1 вміщений в посудину 3, що відіграє роль термостатуючої оболонки, заповнену водою або маслом - 4. Після заповнення віскозиметра досліджуваною рідиною 5 і встановлення необхідної температури, систему закривають кришкою 6 із двома отворами, в один вміщують термометр 7, а в другий - стрижень-фіксатор 8, який перекриває отвір сопла 2. Віскозиметр встановлюється на триногу 9, що має наконечники з різьбою, за допомогою яких можна встановити

операцій провести визначення часу витікання для лаку, фарби або модельної рідини  $\tau$ . Кожного разу зробити не менше п'яти паралельних вимірів.

5. Віскозиметр і робоче місце привести в належний стан.

### 5.5.4. Обробка результатів вимірювань

Одержані результати вимірювань занести в табл.1, вибравши по три найбільш близьких значення із одержаних. Умовну в'язкість досліджуваної речовини (лаку, фарби, модельного розчину) визначити за формулою (5) теоретичної частини теми.

$$t_{H_2O} = \quad \eta_{H_2O} = \quad t_{\text{лаку}} = \quad t_{\text{фарби}} = \quad t_{m.p} =$$

Таблиця 1

№ з/п	$\tau_0$ , с	$\tau_{\text{лак}}$ , с	$\tau_{\text{фарб}}$ , с	$\tau_{m.p}$ , с	ВУ <sub>лак</sub>	$\Delta$ ВУ <sub>лак</sub>	ВУ <sub>фарб</sub>	$\Delta$ ВУ <sub>фарб</sub>	ВУ <sub>м.р</sub>	$\Delta$ ВУ <sub>м.р</sub>
-------	--------------	-------------------------	--------------------------	------------------	-------------------	----------------------------	--------------------	-----------------------------	-------------------	----------------------------

Для кожної рідини написати остаточний результат у вигляді:

$$ВУ = \overline{ВУ} \pm \overline{\Delta ВУ} \quad \varepsilon = \overline{\Delta ВУ} / \overline{ВУ} \cdot 100\%$$

### 5.5.5. Завдання № 2. Хід роботи

Віскозиметром типу ВУ виміряти умовні в'язкості водних розчинів гліцерину при 20 і 30°C двох концентрацій 5% і 50%-і (за масою). За методом математичного планування 2-х факторного експерименту і отриманими результатами досліджень, записати рівняння регресії для умовної в'язкості як функції температури і концентрації  $ВУ = f(t, C)$ . Побудувати графічні залежності  $ВУ = f(C)$  при  $C = \text{const}$  і  $ВУ = f(t)$  при  $t = \text{const}$ , зробити оцінку впливу кожного фактору на умовну в'язкість розчину і наявність їх взаємодії

1. Визначити умови планування експерименту (табл.2).
2. Приготувати, по 200 мл, водні розчини гліцерину 5% і 50%-і концентрації (за масою).
3. Виконати п. 1 завдання 1.
4. Виконати п. 2-4 завдання 1 для еталонного зразка (дистильованої води) і водних розчинів гліцерину зазначених концентрацій при температурах 20 і 30°C. Температуру дистильованої води і зразків встановити і підтримувати за допомогою термостата віско-



зиметра, що має електричний нагрівник із пристроєм регулятора потужності.

5. Після завершення досліджень обладнання і робоче місце привести в належний стан.

### 5.5.6. Обробка результатів вимірювань

Одержані результати вимірювань занести в табл.3, записати рівняння регресії 2-х факторного експерименту в явному вигляді і на його основі порахувати значення умовної в'язкості для температур 20, 25 і 30°C при концентраціях гліцерину 0%, 5%, 25% і 50% відповідно. Побудувати графічну залежність  $BU = f(t)$  при  $C = \text{const}$  і  $BU = f(C)$  при  $t = \text{const}$ .

Таблиця 2

Умови планування експерименту

Фактори	Кодовий	Рівень варіювання			Інтервал варіюван.
		Верхн. +	Нул. 0	Нижн. -	
Натуральний					i
Температура t, °C	X <sub>1</sub>	30	25	20	5
Концентрація C, %	X <sub>2</sub>	50	27,5	5	22,5

Таблиця 3

Матриця планування та експериментальні дані

№ досліду точка плану	Кодові значення факторів			Вихідний параметр		
	X <sub>1</sub> (t <sub>i</sub> )	X <sub>2</sub> (C <sub>i</sub> )	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> (t <sub>i</sub> C <sub>i</sub> )	τ <sub>0</sub> , с	τ, с	BU <sub>i</sub>
1	– (20)	– (5)	+			
2	– (20)	+ (50)	–			
3	+ (30)	– (5)	–			
4	+ (30)	+ (50)	+			

Вихідний параметр - значення τ<sub>0</sub> і τ вираховують як середні арифметичні значення із не менше як п'яти паралельних вимірів, а умовна в'язкість BU<sub>t</sub> визначається за формулою (5) теоретичної частини теми.

Рівняння регресії для 2-х факторного експерименту має вигляд

$$BU_t = v_0 + v_1X_1 + v_2X_2 + v_3X_1X_2 \quad (1)$$

або



$$BY_t = v_0 + v_1t + v_2C + v_3tC \quad (2)$$

де  $X_1 \cdot X_2$  або  $t \cdot C$  - взаємодія факторів.

Коефіцієнти рівнянь вираховують за формулами:

$$v_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N BY_i \quad (3) \quad v_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i BY_i \quad (4)$$

$$v_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i BY_i \quad (5) \quad v_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i C_i BY_i \quad (6)$$

де  $N$  - число дослідів.

Підставити одержані значення для коефіцієнтів  $v_0, v_1, v_2$  і  $v_3$  (3–6) у рівняння регресії (1).

$$BY_t = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 BY_i + \left( \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 t_i BY_i \right) t + \left( \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 C_i BY_i \right) C + \left( \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 t_i C_i BY_i \right) t \cdot C \quad (7)$$

Для розрахунку умовної в'язкості  $BY_t$  потрібно підставити в рівняння (7) значення  $t$  і  $C$ , які знаходять по їх натуральних значеннях за співвідношеннями:

$$t = (t_0 - t_i) i_t \quad (8) \quad C = (C_0 - C_i) i_C \quad (9)$$

де  $t$  і  $C$  - натуральні значення температури і концентрації відповідно;  $t_0$  і  $C_0$  - значення величин на нульовому рівні;  $i_t$  і  $i_C$  - інтервали змін відповідних величин температури і концентрації.

Графічно представити результати досліджень у вигляді ізотерм та ізоконцентрацій.

### 5.5.7. Контрольні питання

1. Дати визначення суспензій та емульсій. Навести приклади їх використання у виробництві будівельних матеріалів.
2. Явища переносу та їх суть.
3. Дати визначення в'язкості рідини і записати рівняння для внутрішнього тертя.
4. Який зв'язок між динамічною в'язкістю  $\eta$  і кінематичною  $\nu$ ? Одиниці їх вимірювання.
5. Дати визначення умовної в'язкості  $BY_i$ .
6. Зробити висновки із одержаних результатів досліджень.



### 5.5.8. Література

1. Дворкін Л.Й., Скрипник І.Г. Фізико-хімічні і фізичні методи досліджень будівельних матеріалів.- Рівне: НУВГП, 2006 – 220с.

## 5.6. Лабораторна робота № 6

### Дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем

**Мета роботи:** визначити залежність в'язкості від напруг зсуву для пластично-в'язких систем та дослідити їх структурно-механічні властивості від умов одержання досліджуваного матеріалу.

**Прилади і обладнання:** ротаційний віскозиметр типу РВ-8, термостат, сушильна шафа, секундомір, терези, різноважки, штангенциркуль, термометр, хімічна посуда, шпатель.

**Матеріали:** вапно, глина, базальтовий туф, цемент, пластифікатори, шлам клінкерний, вода, бітум, органічний розчинник.

#### 5.6.1. Дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем

Серед різноманітних видів текучих речовин, в'язких рідин та пластично-в'язких систем за реологічними властивостями в стаціонарному потоці виділяють два основних класи речовин: 1 - ньютонівські рідини з величиною в'язкості, яка не залежить від дії на них напруг зсуву та градієнта швидкості і 2 - структуровані дисперсні системи, для яких величина в'язкості може змінюватись в широких межах у залежності від діючої напруги зсуву та градієнта швидкості. Структуровані дисперсні системи займають проміжне положення між звичайними (ньютонівськими) в'язкими рідинами і пружними твердими тілами. Для цього класу речовин характерні такі механічні властивості як в'язкість, пружність, пластичність, міцність, тощо. Саме ці властивості дисперсних систем без досліджень внутрішньої структури вивчає реологія, хоча і дозволяє визначити тип структури, що утворилась.

Багато будівельних матеріалів у процесі їх виготовлення проходять стадію тістоподібного або різкотекучого (шлікерного) стану,



тобто на певній технологічній стадії, найчастіше перед формуванням, вони являють собою технічні концентровані суспензії або так звані пластично-в'язкі системи. Такі суспензії, як правило, мають коагуляційні структури, які виникають у них під дією ван-дер-ваальсових сил зчеплення колоїдних частинок.

Текучість ідеальних в'язких рідин описується законом Ньютона, згідно якому сила внутрішнього тертя  $F$  (рівна по значенню, але обернена за напрямком прикладеній зовні силі) є пропорційна градієнту швидкості текучості  $dV/dx$  між шарами рідини, що знаходяться на відстані  $dx$ ; та площі шару  $S$ , до якого прикладена зовнішня сила:

$$F = -\eta \frac{dV}{dx} S \quad (1)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт пропорційності, який називається в'язкістю або коефіцієнтом внутрішнього тертя і залежить від природи та термодинамічного стану рідини. Закон справедливий лише при ламінарній текучості, тобто коли всі шари рідини рухаються в паралельних напрямках. Для дослідження реологічних властивостей рідин рівняння (1) може бути записане у вигляді:

$$P = \eta dV/dx \quad (2)$$

Величина  $P = F / S$  (3) є прикладеною напругою зсуву.

В'язкі речовини відрізняються від пластичних тим, що текучість спостерігається при будь-яких прикладених напругах  $P$  в тому числі і при  $P=0$ , а коефіцієнт внутрішнього тертя є постійним (рис.1).

Структуровані дисперсні системи не підлягають закону Ньютона. Оскільки в процесі текучості в них відбувається руйнування структури, деформація і орієнтування в потоці частинок дисперсної фази, тому реологічна поведінка структурованих дисперсних систем більш складна. Із рис.2 видно, що для не ньютонівських систем в'язкість не є постійною і зменшується в певній області напруг зсуву  $P_0$ - $P_m$ . Так для суспензій бентонитових глин  $\eta_{\max} = 10^7$  пуаз, а  $\eta_{\min} = 10^{-1}$  пуаз,  $1 \text{ пуаз} = 0,1 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2 = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

В області середніх руйнівних напруг ( $P_0$ - $P_m$ ) реологічна поведінка структурованих дисперсій наближено описується рівнянням Бігмана:

$$P - P^x = \eta^x/dV/dx \quad (4)$$

де зовнішній тиск начебто розбивається на дві складові:  $P^x$  - необхідний для руйнування структури і  $(P-P^x)$  - здійснення власної



текучості;  $\eta^x$  носить назву бінгамівської в'язкості.

При  $P > P_m$  відбувається текучість рідини із повністю зруйнованою дисперсною структурою речовини та з ейнштейнівською в'язкістю (5). В'язкість дисперсної системи зростає, суспензії збільшуються із зростанням кількості дисперсної фази і при умові, що між її частинками відсутня взаємодія, виражається законом Ейнштейна:

$$\eta = \eta_0(1 + k\phi) \quad (5)$$

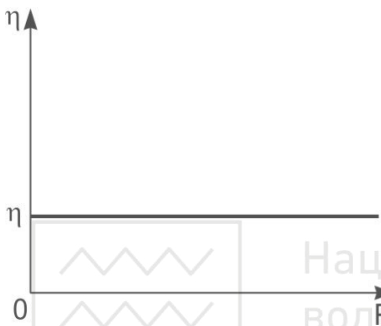


Рис.1. Залежність в'язкості від напруг зсуву  $P$  для ньютонівських рідин

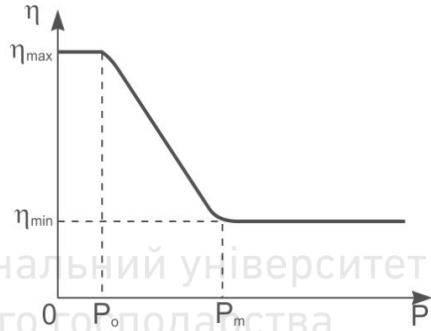


Рис.2. Залежність в'язкості від напруг зсуву  $P$  для структурованих дисперсних систем (бінгамівських рідин)

де  $\eta$  і  $\eta_0$  - в'язкість дисперсної системи і чистого дисперсійного середовища;  $\phi$  - об'ємна частина (доля) дисперсної фази;  $k$  - константа, яка визначається формою частинок (для сферичних  $K = 2,5$ ). Особливо характерне те, що в'язкість не залежить від власного розміру частинок.

Для дуже структурованих (твердоподібних) систем крива в'язкості має інший вигляд (рис.3).

При  $P < P_s$  текучості немає. Величина  $P_s$  - називається першою граничною напругою зсуву і є близькою за змістом до межі пружності твердих тіл. Вона характеризує механічні властивості суцільної просторової ґратки, яка пронизує весь об'єм системи. При  $P < P_s$  можна рахувати структуровані системи твердоподібними.



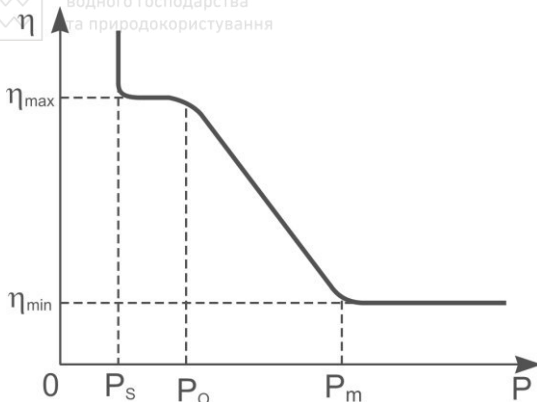


Рис.3. Залежність в'язкості від напруг зсуву  $P$  для твердоподібних систем.

При підвищенні напруг зсуву  $P > P_s$  ступінь руйнування структури збільшується і може досягнути найбільшої величини, на що буде вказувати значення найменшої в'язкості  $\eta_{\min}$  і відповідно друга гранична напруга зсуву  $P_m$ , якими в даному випадку

буде характеризуватись ця система. Найменша в'язкість системи із зруйнованою структурою вже не залежить від величини напруги зсуву і градієнта швидкості в умовах стаціонарного потоку, тобто при досягненні найменшої в'язкості система буде вести себе подібно до ньютонівської рідини. В'язкість, яка спостерігається в межах  $\eta_{\min} < \eta_{\text{еф}} < \eta_{\max}$  носить назву ефективної в'язкості  $\eta_{\text{еф}}$  або в'язкості гранично зруйнованої структури.

Таким чином, реологічні властивості пластично-в'язкого матеріалу можуть бути охарактеризовані в достатньо повній ступені величиною першої граничної напруги зсуву  $P_s$  і значенням найбільшої в'язкості  $\eta_{\max}$  та величиною найменшої напруги, яка відповідає повністю зруйнованій дисперсній системі другої граничної напруги зсуву  $P_m$  і значенню найменшої в'язкості  $\eta_{\min}$  при цьому. Окрім того існує інтервал напруг зсуву від значення  $P_s$  до  $P_0$ , в якому величина в'язкості  $\eta_{\max}$  залишається постійною,  $P_0$  - максимальна гранична напруга зсуву ще незруйнованої структури.

### 5.6.2. Опис експериментальної установки

Ротаційний віскозиметр Воларовича типу РВ-8 використовується для дослідження реологічних властивостей дисперсних систем таких як висококонцентровані суспензії і пасти. Цей прилад дозволяє проводити вимірювання в'язкості мас  $\eta$  в межах від 0,5 до  $10^6$  Па·с і напруги зсуву  $P$  від 5 до  $10^4$  Па. Схема установки приведена

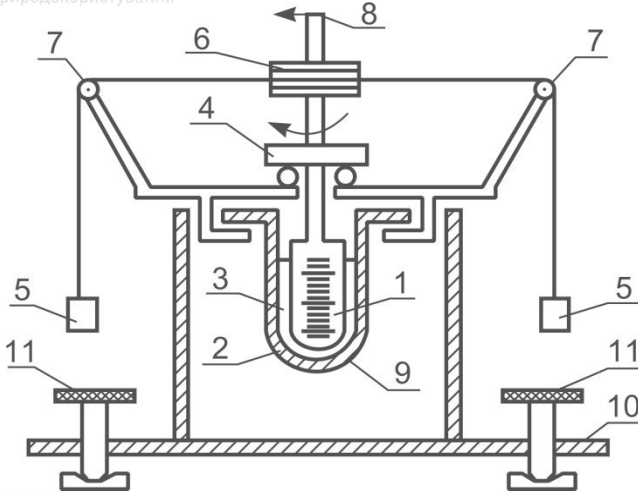


Рис.1 Схема віскозиметра типу РВ-8

Віскозиметр складається з двох коаксіальних циліндрів 1 і 2, дно яких має форму півсфери, а у зазор між ними заливають досліджувану суміш - зразок 3. Зовнішній циліндр 2 нерухомий, внутрішній 1 - обертається в підшипниках 4 під дією двох тягарців 5. Обидва циліндра мають рифлену поверхню, що виключає можливість ковзання досліджуваної маси зразка по її поверхні. Важки підвішені на нитках, намотаних на шків 6, вісь якого співпадає із віссю обертання всієї системи, і перекинутих через блоки 7. Кількість обертів циліндра відмічають за допомогою стрілки 8, розміщеної над шкалою. Температуру досліджуваного зразка підтримують за допомогою термостатичного кожуха 9 зовнішнього циліндра 2. Віскозиметр закріплений на масивній плиті 10 з гвинтовими ніжками 11 для надання приладу строго горизонтального положення. Внутрішній циліндр рухається внаслідок дії сил натягу ниток, до яких прикріплені тягарці. Протидіючими є сили внутрішнього тертя рідини для циліндричної та сферичної поверхонь і сили тертя в підшипнику циліндра та ниток з блоками. Пуск і зупинка рухомого циліндра установки здійснюється ричагом-тормозом.

Для режиму руху, що встановився, коефіцієнт в'язкості досліджуваного зразка  $\eta$  при заданій температурі  $t$  визначають за форму-



$$\eta = kg(m - m_0) / n \quad (1)$$

де  $m$  - маса тягарців, підвішених до ниток,  $m_0$  - маси тягарців при вимірюванні сили тертя в підшипниках,  $n$  - кількість обертів циліндра за 1 с,  $k$  - константа приладу:  $k = cR$  (2), де  $R$  - радіус шківів.

Згідно теорії:

$$C = \frac{1}{8\pi^2 \left( \frac{r_1^2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} h + \frac{r_1^3 \cdot r_2^3}{r_2^3 - r_1^3} \right)} \quad (2)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – радіуси внутрішнього і зовнішнього циліндрів;  $h$  - висота циліндричного шару рідини.

Перший доданок в знаменнику рівняння (3) обумовлений моментом сил внутрішнього тертя для циліндричної поверхні, а другий - для сферичної.

При обертанні циліндра шар досліджуваної рідини, яка безпосередньо прилягає до його поверхні, рухається разом із цією поверхнею. Всі інші шари, завдяки в'язкості, рухаються із меншими швидкостями. Вздовж радіуса кутова швидкість обертання шарів рідини зменшується. На внутрішній поверхні зовнішнього циліндра швидкість руху шару зразка дорівнює нулю.

Постійну приладу  $k$  можна знайти експериментально, калібруючи віскозиметр по рідині із відомою в'язкістю  $\eta_0$ . В цьому випадку:

$$k = \eta_0 n / g(m - m_0) \quad (3)$$

Значення напруги зсуву  $P$  розраховують за формулою:

$$P = F / S = k'(m - m_0) \quad (4)$$

$$\text{де} \quad k' = Rg / 2\pi r_1^2 h \quad (5)$$

### 5.6.3. Варіанти завдань

1. Дослідити залежність в'язкості структурованих дисперсних систем від прикладених напруг зсуву  $P$  при певних значеннях водотвердого відношення  $V/T = \text{const}$  для різних матеріалів і при постійній температурі  $t = \text{const}$ .

Матеріали: глина, вапно, цемент, клінкерний шлам.

Композиція: глина - базальтовий туф різного співвідношення, та інші.



2. Дослідити залежність  $\eta = f(P)$  для різних значень В/Т певного матеріалу при  $t = \text{const}$
3. Дослідити залежність  $\eta = f(P)$  для певного значення В/Т одного із матеріалів з різним вмістом заданого пластифікатору при  $t = \text{const}$
4. Дослідити залежність  $\eta = f(P)$  для певного значення В/Т одного із матеріалів з однаковим вмістом різних пластифікаторів при  $t = \text{const}$
5. Дослідити залежність динамічної в'язкості  $\eta$  для бітуму залежно від напруги зсуву  $P$  і температури  $t$ .

В таблиці 1 приведено рекомендовані межі водотвердого відношення В/Т та вмісту пластифікуючої добавки С типу ЛСТ, СДО, тощо для деяких будівельних матеріалів.

Таблиця 1

Матеріал	В/Т	С, %
Глина	0.3 - 0.6	0-0.4
Вапно	0.25- 0.6	—
Цемент	0.25- 0.4	0-0.3
Клінкерний шлам	0.3 - 0.6	0-0.4
Глина - базальтовий туф	0.4 - 0.7	0-0.4

Залежно від виду матеріалу і типу добавки В/Т і С можуть бути скоректовані експериментально або задані. Вміст вологи у вапні визначається способом сушки зразка до постійної маси при температурі 105-110°C в сушильній шафі, для інших матеріалів В/Т встановлюється загальноприйнятим методом. Для кожного із виконаних завдань одержані результати досліджень звести у відповідні таблиці і представити графічно, проаналізувати і зробити висновки.

#### 5.6.4. Хід роботи

1. Ознайомитись із конструкцією ротаційного віскозиметра Воларовича типу РВ-8.
2. Провести вимірювання геометричних розмірів циліндрів установки  $r_1$  і  $r_2$ ,  $R$  та  $h$  або взяти їх із паспортних даних установки.
3. При вимірюванні сили тертя в підшипниках, в яких обертається внутрішній циліндр і нитки із блоками, визначити масу тягарців  $m_0$ , при яких кінетична система установки прийде в рух - внутрішній циліндр почне обертатись .
4. Ячейку приладу заповнити досліджуванним зразком до висоти  $h = 3,4$  см та термостатувати до встановлення заданої темпера-



тури  $t$ .

5. На ліву і праву шальки кладуть тягарці із сумарною масою  $m_1$ , (до 10 г) звільняють тормоз і визначають за допомогою секундоміра час 3, 4 або 5 (N) обертів стрілки віскозиметра  $\tau_1$ . Проводять не менше 3-х повторних відліків і вираховують середнє значення числа обертів у секунду  $n_1$ .
6. Такі ж самі вимірювання проводять для різних мас тягарців  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ ,  $m_5$ , і т.д., для кожного із них визначають середні значення  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ ,  $n_5$  і т.д.
7. Вимірювання виконують для 4-5 значень температури, починаючи від кімнатної, через кожні  $10^\circ\text{C}$ .
8. Еталонною рідиною може бути гліцерин, вазелінове масло або інша рідина із високим значенням коефіцієнту внутрішнього тертя  $\eta_0$  при кімнатній температурі. Кожен із зразків варіанту завдання слід готувати безпосередньо перед вимірюванням або підготувати серію зразків і зберігати їх у герметичних бюксах.

### 5.6.5. Обробка результатів вимірювань

1. Виходячи із теоретичних відомостей і знаючи геометричні розміри приладу за даними  $r_1$  і  $r_2$ , R та h, використовуючи співвідношення (2) і (3), вирахувати сталу віскозиметра k.
2. Відкалібрувати установку за даними  $\eta_0$ ,  $m - m_0$  та n, а саме: використовуючи формулу (4), вирахувати сталу віскозиметра k.
3. Порівняти одержані результати визначення сталої віскозиметра k і вибрати, яке саме значення, або їх середнє арифметичнє, слід вибрати для проведення подальших розрахунків.
4. При заданих параметрах досліду (температури - t, водотвердого відношення - V/T, вмісту пластифікатора - C) обрахувати в'язкість зразка  $\eta$  для кожного значення  $m - m_0$  за формулою (1) із врахуванням співвідношень (2, 3), а також розрахувати значення напруги зсуву P за формулою (5) із врахуванням співвідношення (6).
5. Аналогічно встановлюється залежність  $\eta = f(P)$  при заданій зміні одного із параметрів досліду t, V/T або C.
6. Одержані результати досліджень звести у вигляді таблиць і представити графічно.
7. Для об'єктів досліджень пластично-в'язких систем визначити величину першої граничної напруги зсуву  $P_S$  і значення найбільшої



в'язкості  $\eta_{\max}$  та величину найменшої напруги, яка відповідає повністю зруйнованій структурі дисперсної системи - другої граничної напруги зсуву  $P_m$  і значенню найменшої в'язкості  $\eta_{\min}$  при цьому. Визначити максимальну граничну напругу зсуву ще незруйнованої структури  $P_0$ . Проаналізувати, як ці величини залежать від того чи іншого параметру дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем.

Таблиця результатів вимірювань і обчислень

$$r_1 = r_2 = h = R = g = m_0 = N = t = V/T = C =$$

Таблиця 2

№ з/п	m, кг	m-m <sub>0</sub> , кг	τ, с	n, с <sup>-1</sup>	η, кг/м·с (Па·с)	P, н/м <sup>2</sup>
-------	-------	-----------------------	------	--------------------	------------------	---------------------

### 5.6.6. Контрольні запитання

1. За якими ознаками рідини або суміші поділяються на ньютонівські та структуровані дисперсні або пластично-в'язкі системи і яке положення займають структуровані дисперсні системи, як певний клас речовин?
2. Що таке реологія і які властивості матеріалів вона вивчає?
3. Навести приклади пластично-в'язких систем у технології будівельних матеріалів.
4. Дати визначення закону Ньютона для в'язких рідин, записати математичний вираз і пояснити.
5. Що таке в'язкість і який її фізичний зміст? Записати вираз для напруги зсуву і пояснити.
6. Пояснити залежність  $\eta = f(P)$  для ньютонівських, бігманівських рідин та для твердоподібних систем.
7. Закон Ейнштейна для в'язкості дисперсної системи (золя, суспензії).
8. Описати конструкцію ротаційного віскозиметра Воларовича і пояснити суть методу досліджень.
9. Записати робочі формули і пояснити. Які відомі вам способи визначення постійної приладу.
10. Пояснити одержані результати досліджень та зробити висновки.



## 5.6.7. Література

1. Малахова А.Я. Физическая и коллоидная химия. - Минск; Выс. школа, 1981.-304 с.
2. Гапчин Б.М., Дутчак Я.Ж., Френчко В.С. Молекулярна фізика. - Львів: Світ, 1990.-240 с.
3. Бутт Ю.М. и Тимашев В.В. Практикум по технологии вяжущих материалов, -М.: Выс. школа, 1973.-504 с.

## 5.7. Лабораторна робота № 7

### Визначення граничної напруги зсуву формовочних мас конічним еластоміром

**Мета роботи:** 1. Дослідити процес твердіння неорганічних в'язучих речовин шляхом визначення залежності граничної напруги зсуву (пластичної або структурної міцності) від часу. 2. Дослідити залежність граничної напруги зсуву пластично-в'язких систем від їх вологості. На прикладі глиняного тіста, тіста базальтового туфу та композиції глина-базальтовий туф встановити області стану (крихкого, пластичного і в'язкотекучого) та значення числа пластичності.

**Прилади і обладнання:** конічний пластомір конструкції П. А. Ребіндера, кювети з  $d = 50$  мм і  $h = 10$  мм, керамічна чаша для замісу тіста із лопаткою, пластмасовий ніж для зачистки поверхні зразка, терези із різноважками, шпатель, штангенциркуль, годинник, хімічний циліндр, металева дріб або пісок, промивалка.

**Матеріали:** цемент, пластифікатор, глина, базальтовий туф, вода.

### 5.7.1.Визначення граничної напруги зсуву формовочних мас конічним еластоміром

Процес твердіння неорганічних в'язучих речовин, наприклад, цементної маси (тіста, розчину, бетону), складається із двох періодів наростання міцності. На першому, коли матеріал довгий час знаходиться у пластичному стані, процес формування структури відбувається відносно повільно і всі порушення структури після припинення дії зовнішнього механічного чинника зникають. Під час цього періоду цементна маса без погіршення своїх властивостей



Рис.1

може зазнавати різну технологічну обробку: перемішування, укладання, вібрування тощо. Через деякий час процес гідратації мінералів цементу стає все вагомим і починається зміцнення структури - кристалізаційне твердіння, тобто настає другий період

наростання міцності, коли механічні порушення в структурі твердної маси вже не мають зворотного характеру. Отже всі технологічні операції по вкладанню, наприклад, бетонної суміші та її ущільненню повинні виконуватись на першому періоді твердіння.

Кінетика зростання міцності структури твердіючого пластично-в'язкого матеріалу (пластична або структурна міцність) характеризується зміною граничної напруги зсуву дисперсної системи  $P_m$ , що визначається за методом заглиблення конуса у масу зразка.

Глиняне тісто, наприклад, являє собою також пластично-в'язку систему із трьома областями стану: крихкого - К, пластичного - П та в'язкотекучого - В, які можуть бути визначені із залежності граничної напруги зсуву від вологості маси  $W$ , що представлено на рис.1.

На відміну від першого прикладу у другому є те, що компоненти досліджуваного матеріалу із часом не зазнають хімічних перетворень.

Технічним показником пластичності є число пластичності  $\Pi_d = W_r - W_p$ , де  $W_r$  і  $W_p$  - значення вологості, що відповідають границі текучості і границі розкатування глиняного шнура, %.

Для виробництва будівельних керамічних виробів використовують помірно пластичні глини із числом пластичності  $\Pi_d = 7-15$ . Малопластичні глини із  $\Pi_d < 7$  погано формуються, а високопластичні глини із  $\Pi_d > 15$  розтріскуються при сушінні і потребують введення знежирюючих домішок.





## 5.7.2. Опис експериментальної установки

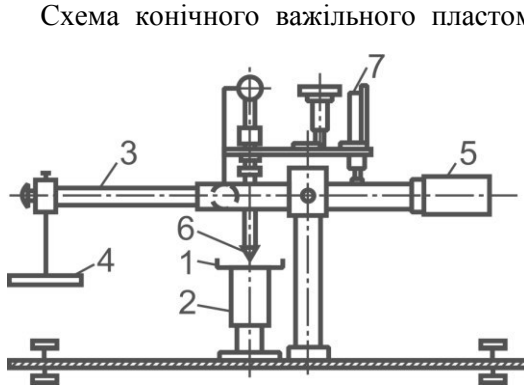


Рис.1. Схема конічного пластоміру

Зразок для досліджень поміщають в кювету 1, яку встановлюють на під'ємний столик 2, а важіль 3 із шалькою для різноважок - 4 встановлюють у горизонтальне положення за допомогою рухомої протизваги - 5. Перемищують під'ємний столик 2 до контакту конуса приладу 6 із поверхнею зразка. Індикатор 7 для вимірювання глибини проникнення конуса 6 у зразок виставляють в робоче положення. Шальку 4 поступово навантажують різноважками або сипучим матеріалом до того моменту, коли конус із штоком досягне заданої глибини занурення  $h$ . Граничну напругу зсуву  $P_m$  визначають за формулою:

$$P_m = K \frac{F}{h^2} \quad (1)$$

де  $K$  - стала приладу, яка залежить від кута конусу при вершині  $\phi$  (табл. 1);  $F$  - навантаження, діюче на конус,  $H$  або  $кГс$ ;  $h$  здебільшого рівна 5 мм, значення якої підставляється у робочу формулу також, у системі СІ - в м, а для випадку технічної системи одиниць в см.. Тоді  $P_m$ , буде визначене у Па або  $кГс/см^2$ , співвідношення між якими становить  $1 кГс/см^2 = 10^5 Па = 0,1 МПа$ .

Таблиця 1

$\phi$ , град	30	45	60	90
$K$	0,96	0,41	0,21	0,075

### 5.7.3. Хід роботи

1. Підготувати установку до вимірювань, як було описано вище.
2. Визначити кут конуса пластоміру  $\phi$  та стану приладу  $K$ .
3. Приготувати зразок до досліджень масою достатньою до запо-



внення кювети з наперед заданою нормальною крутістю для цементу або вологістю для глини, туфу або їх композиції.

4. Шляхом поступового навантаження шальки важеля різноважками або сипучим матеріалом прослідкувати, щоб конус плавно заглибився на  $h = 5$  мм і записати їх масу, повторивши вимірювання 5 разів, взявши для розрахунку три найближчих значення і усереднити їх. Оцінити похибку вимірювань.
5. Вимірювання повторити через певні проміжки часу  $\tau$  для цементного тіста, а для глини, туфу та їх композицій визначити граничну напругу зсуву (пластичну міцність)  $P_m$  від вмісту води  $W$ .
6. Розрахувати навантаження  $F$ , діюче на конус, за геометрією важеля установки та масою шальки із різноважками.
7. Результати вимірювань занести до табл. 2, провести розрахунки та побудувати графічні залежності  $P_m = f(\tau)$  або  $P_m = f(W)$ .

$\varphi =$        $K =$        $h =$        $t$  (температура) =

Таблиця 2

№ з/п	$m$ , кг	$F$ , Н	$P_m$ , Па	$\tau$ або $W$ , с або %
-------	----------	---------	------------	--------------------------

#### 5.7.4. Контрольні запитання

1. Описати процес твердіння неорганічних в'язучих речовин.
2. Зобразити залежність граничної напруги зсуву  $P_m$  від вологості для пластично-в'язких систем на прикладі глиняного тіста і вказати на три області стану.
3. Число пластичності  $P_n$  та його врахування при виробництві будівельної кераміки.
4. Пояснити конструкцію конічного важільного пластоміра та користування ним. Записати робочу формулу і вказати на розірності величин.
5. Зобразити залежність динамічної в'язкості  $\eta$  від напруги зсуву  $P$  для пластично-в'язких систем і пояснити.

#### 5.7.5. Література

1. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. - М.: Высш. шк., 1973-504 с.
2. Хигерович М.И., Меркин АЛ. Физико-химические и физические методы исследования строительных материалов. - М.: Высш. шк., 1968. - 164 с.



## 6.ТИПОВІ ТЕСТИ

### 6.1. Тема: "Седиментаційний метод визначення дисперсного складу матеріалів"

#### № 1

Чим зумовлений процес осідання частинок суспензії?

1. Перевагою сил дифузії;
2. Перевагою сил тяжіння;
3. Перевагою сил Архімеда і Стокса.

#### №2

Який вираз має величина сили Стокса, що діє на частинку суспензії радіусом  $r$ , яка осідає із швидкістю  $u$  у рідині із в'язкістю  $\eta$ ?

1.  $F_C = 6\pi\eta r u$  ;
2.  $F_C = 6\pi\eta r^2 u$  ;
3.  $F_C = 6\pi\eta r^3 u$  .

#### №3

За допомогою яких даних можна визначити максимальний розмір частинок в досліджуваній суспензії методом седиментації?

1. За графіком залежності зміни маси осаду на шальці терезів седиметометра від часу;
2. За інтегральною кривою розподілу частинок за радіусами;
3. За диференційною кривою розподілу частинок за радіусами.

### 6.2. Тема: "Визначення питомої поверхні дисперсних матеріалів"

#### №1

Які фактори впливають на міцність готових виробів?

1. Тонкість помелу і насипна густина дисперсного матеріалу;
2. Зерновий склад і форма частинок дисперсного матеріалу;
3. Тонкість помелу, зерновий склад і форма частинок дисперсного матеріалу.

#### №2

Якими потрібно користуватись формулами для визначення питомої поверхні дисперсних матеріалів?



1.  $S_0 = \frac{m}{S}$ ,  $S_0 = \frac{V}{S}$ ;

2.  $S_0 = \frac{S}{\rho}$ ,  $S_0 = \frac{S}{\rho_0}$ ;

3.  $S_0 = \frac{S}{m}$ ,  $S_0 = \frac{S}{V}$ .

### №3

Який взаємний зв'язок між питомою поверхнею дисперсних матеріалів  $S_0$  і розміром частинок  $r$ ?

1.  $S_0 \approx r$ ;

2.  $S_0 \approx \frac{1}{r}$ ;

3.  $S_0 \approx \frac{1}{r^2}$ .

## 6.3. Тема "Визначення густини і пористості твердих тіл"

### №1

Яке із співвідношень для розмірностей густини вірне?

1.  $1 \text{ кг/м}^3 = 10^3 \text{ г/см}^3$ ;

2.  $1 \text{ г/см}^3 = 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ ;

3.  $1 \text{ кг/м}^3 = 10^{-3} \text{ г/см}^3$ .

### №2

За якою формулою вираховують загальну пористість матеріалу?

1.  $\Pi = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot 100\%$ ;

2.  $\Pi = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot 100\%$ ;

3.  $\Pi = \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right) \cdot 100\%$ .

### №3

Яке співвідношення між водопоглинанням за об'ємом і масою вірне?



$$1. W_0 = W_m \frac{\rho}{\rho_a};$$

$$2. W_0 = W_m \frac{\rho_a}{\rho};$$

$$3. W_0 = W_m \frac{\rho_0}{\rho_a}.$$

#### 6.4. Тема: "Визначення показників пористості матеріалів за кінетикою їх водопоглинання"

##### №1

Який метод дозволяє визначати показники середнього розміру та однорідності розмірів капілярних пор в досліджуваному матеріалі?

1. Метод визначення величини повного водопоглинання за об'ємом;
2. Метод дослідження кінетики сорбції вологи із атмосфери при 100% -й відносній вологості повітря;
3. Метод дослідження кінетики водопоглинання води за масою.

##### №2

Якою функцією описуються криві поглинання води капілярно-пористими матеріалами?

$$1. W_\tau = W_{\max} \left[ 1 + e^{-(\bar{\lambda}\tau)^\alpha} \right];$$

$$2. W_\tau = W_{\max} \left[ 1 - e^{-(\bar{\lambda}\tau)^\alpha} \right];$$

$$3. W_\tau = W_{\max} \left[ 1 - e^{-(\bar{\lambda}\tau)^\alpha} \right].$$

##### №3

Яка характерна залежність для вузлових точок графіків

$$W_\tau / W_{\max} = f(\tau)?$$

$$1. W_{\dot{a}\dot{o}\dot{c}} = W_{\max} \left( -\ell^{-1} \right);$$

$$2. W_{\dot{a}\dot{o}\dot{c}} = 2W_{\max} \left( -\ell^{-1} \right);$$



$$3. W_{\text{дог}} = 3W_{\text{max}} \left( -\ell^{-1} \right)$$

## 6.5. Тема: "Визначення в'язкості лаків, фарб та модельних розчинів"

### №1

Яке з явищ зумовлює передачу кількості руху від одного шару рідини до іншого, що рухаються із різними швидкостями?

1. Дифузія;
2. Теплопровідність;
3. В'язкість.

### №2

Який вигляд має основний закон в'язкої течії рідин встановлений Ньютоном?

1.  $F = \eta \frac{dV}{dx} \cdot S$ ;
2.  $F = -\eta \frac{dV}{dx} \cdot S$ ;
3.  $F = -\frac{1}{\eta} \frac{dV}{dx} \cdot S$ .

Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

### №3

Яку розмірність має коефіцієнт внутрішнього тертя або в'язкість рідин в системі одиниць СІ?

1. Н·с;
2. Па·с;
3. Па·с<sup>-1</sup>.

## 6.6. Тема: "Дослідження реологічних властивостей структурованих дисперсних систем"

### №1

Скільки основних класів речовин за реологічними властивостями виділяють у стаціонарному потоці серед різноманітних видів текучих речовин, в'язких рідин, пластично-в'язких та твердо-пластичних систем?

1. Один;



2. Два;
3. Три.

### №2

Для яких в'язких речовин коефіцієнт внутрішнього тертя є постійним і текучість спостерігається при будь-яких прикладених напругах зсуву?

1. Ньютонівських;
2. Пластично-в'язких;
3. Твердоподібних.

### №3

Із чим пов'язано для структурованих дисперсних систем зменшення в'язкості при збільшенні напруги зсуву?

1. Утворенням структури;
2. Руйнуванням структури;
3. Хімічною взаємодією інгредієнтів.

## 6.7. Тема: "Визначення граничної напруги зсуву формовочних мас конічним пластоміром"

### №1

З якого процесу починається другий період наростання міцності, коли механічні порушення в структурі твердуючої маси вже не мають зворотного характеру?

1. Коагуляції;
2. Гелеутворення;
3. Кристалізації.

### №2

Скільки областей стану має така пластично-в'язка система як глиняне тісто?

1. Одну;
2. Дві;
3. Три.

### №3

Якою є робоча формула при визначенні граничної напруги зсуву досліджуваних зразків за допомогою конічного пластоміру?

1.  $P_m = k \frac{F}{h}$  ;



$$2. P_m = k \frac{F}{h^2};$$

$$3. P_m = k \frac{F}{S}.$$

## 7. СТРУКТУРА ЗВІТУ ВИКОНАНОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

4. Вказується номер лабораторної роботи, її назва та мета, прилади і обладнання, матеріали.

5. Подається суть методу досліджень, опис експериментальної установки та робочі формули.

6. Приводиться хід роботи.

7. Описується порядок обробки результатів вимірювань (в разі необхідності).

8. Приводяться одержані результати досліджень у вигляді таблиць, графіків, математичних моделей та вказуються похибки вимірювань фізичних та фізико-хімічних величин.

9. Записуються висновки із одержаних результатів досліджень та їх значимість для розробки технології будівельних матеріалів, контролю якості виробів тощо.

- Титульна сторінка журналу звітів одна на всі роботи, загальноприйнята із зазначенням міністерства, назви університету, факультету, кафедри, дисципліни, виконавця, викладача, міста та рік виконання роботи.
- В окремому зошиті чи на пронумерованих аркушах паперу формату А-4 у папці до кожної лабораторної роботи слід мати у скороченому вигляді теоретичні відомості, відповіді на контрольні запитання, результати досліджень, розрахунків та посилання на літературні джерела, які були використані, акценти, зауваження та питання, які виникли під час підготовки, виконання лабораторної роботи чи оформлення одержаних результатів досліджень, пропозиції.





## **8. НАДАННЯ ПЕРШОЇ ДОПОМОГИ**

### **8.1. НАДАННЯ ПЕРШОЇ ДОПОМОГИ ПРИ УРАЖЕННІ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ**

1. Дотикання до провідників, що перебувають під напругою, в більшості випадків, викликає мимовільне скорочення м'язів, внаслідок чого потерпілий сам не може звільнитися від дії електричного струму.

2. Якщо потерпілий доторкнувся до предметів під напругою, то перш за все його необхідно швидко звільнити від дії електричного струму, відключивши установку від джерел живлення. Коли відключення установки неможливе, то слід вжити заходів по відокремленню потерпілого від елементів зі струмом. При цьому слід пам'ятати, що без належних заходів безпеки це робити небезпечно для життя.

3. Заходи першої допомоги залежать від того стану, в якому перебуває потерпілий після звільнення його від дії струму:

- якщо потерпілий при свідомості, але до цього був в запамороченні або довгий час перебував під дією струму, то йому потрібно забезпечити повний спокій до прибуття лікаря;

- якщо потерпілий знепритомнів, але зберігає дихання, то його слід покласти, забезпечити доступ свіжого повітря, дати понюхати нашатирний спирт, побризкати водою, розтирати і зігрівати його тіло до приходу лікаря;

- якщо потерпілий не дихає, або дихає дуже погано і дихання погіршується, необхідно до приходу лікаря робити штучне дихання.

### **8.2. ПЕРША ДОПОМОГА ПРИ ПОРАНЕННІ**

1. Для уникнення забруднення ран під час перев'язки, людина, що допомагає пораненому, повинна чисто вимити руки, якщо зробити це неможливо, треба змастити пальці йодом. Доторкатись до рани навіть вимитими руками не можна.

2. При наданні першої медичної допомоги необхідно дотримуватись наступних правил:

- забороняється промивати рану водою або будь-яким іншим лікарським розчином, засипати порошками, змазувати мазями - все це

перешкоджає заживанню рани, може викликати гниття рани;

- не слід видаляти з рани куски тіла, бо це може викликати сильну кровотечу;
- не слід замотувати рану ізоляційною стрічкою.

3. Для надання першої допомоги при пораненні слід відкрити індивідуальний пакет, покласти наявний в ньому перев'язочний матеріал на рану і зав'язати її бинтом. Індивідуальний пакет слід розривати так, щоб не торкатись руками тієї частини пов'язки, яка буде покладена безпосередньо на рану. Якщо індивідуального пакету не виявиться, то для перев'язування слід використати чисту носову хустинку, чисту полотняну тканину, тощо. На те місце тканини, яка буде безпосередньо прикладатись до рани, бажано накапати декілька крапель йоду, щоб отримати пляму трохи більшу за розміри рани, і після цього накласти тканину на рану. Особливо важливо при забруднених ранах застосовувати розчин йоду.

### 8.3. ПЕРША ДОПОМОГА ПРИ ОПІКАХ КИСЛОТАМИ І ЛУГАМИ

1. При попаданні кислоти або лугу на шкіру, уражені ділянки необхідно промивати сильним струменем води 15-20 хв., уражену кислотою поверхню тіла чи обличчя - 5%-вим розчином питної соди, уражені місця лугом — 3%-вим розчином борної кислоти або 3%-вим розчином оцтової кислоти.
2. При попаданні на слизову оболонку очей кислоти або лугу необхідно промивати очі сильним струменем води 15-20 хв., після чого промити 2%-вим розчином борної кислоти.
3. При попаданні кислоти на дихальні шляхи необхідно дихати розбризканим за допомогою пульверизатора 10%-вим розчином питної соди, при попаданні лугу - розбризканим 3%-вим розчином оцтової кислоти.

### 8.4. ПЕРША ДОПОМОГА ПРИ ОПІКАХ

При опіках вогнем, паром, гарячими предметами не слід змочувати опечене місце водою і ні в якому випадку не можна розрізати утворені пухирі та перев'язувати опік бинтом.

При опіку 1 ступеня (почервоніння) уражене місце обробляють



ватою, змоченою етиловим спиртом.

При опіку 2 ступеня (пухирі) уражене місце обробляють спиртом, 3%-вим розчином марганцівки або 5%-вим розчином таніну.

При опіку 3 ступеня (зруйнування шкіри) накривають рану стерильною пов'язкою і викликають лікаря.

## 9. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

1. Скрипник І.Г. “Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів”, - конспект лекцій для студентів спеціальності 7.092104 (ТБКВіМ).- Рівне: УДАВГ, 1998. – 64 с. № 059 - 96.
2. Скрипник І.Г. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу “Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів” для студентів спеціальності 7.092104 (ТБКВіМ).- Рівне: УДАВГ, 1996. – 47 с. № 059 - 72.

## 10. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Дворкін Л.Й., Скрипник І.Г. Фізико-хімічні і фізичні методи досліджень будівельних матеріалів.: Навчальний посібник. - Рівне: НУВГП, 2006. – 220 с.
2. Скрипник І.Г. “Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів”. Інтерактивний комплекс начально-методичного забезпечення дисципліни. – Рівне: НУВГП, 2009.-82 с.
3. П'ятківська Н.А. Фізичний практикум. – Рівне: НУВГП, 2005.-162 с.
4. Клименко М.О., Скрипчук М.П. Стандартизація і сертифікація в екології.- Рівне: УДУВГП, 2003.-202 с.
5. Цюцюра С.В., Цюцюра В.Д. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація.-Київ: Знання, 2006.-242 с.
6. Сквайрс Дж. Практическая фізика.- М.: Мир, 1971.- 246 с.
7. Касандрова О.М., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений.- М.: Наука, 1970.-104 с.
8. Чарыков. Математическая обработка результатов химического анализа.- Л.: Химия, 1984.-168 с.
9. Кучерук І.М., Дущенко В.П., Андріянов В.М. Обробка результатів фізичних вимірювань.-К.: Вища школа, 1981.-216 с.
10. Л.И Дворкин, Л.В.Шестаков, И.Б.Шамбан, Материаловедче-



ские задачи в промышленном и гражданском строительстве.- К.:УМКВО, 1989.-119с.

11. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологи бетона М.:НИИЖБ, 1982-103 с.
12. Пустильник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений.- М.:Наука, 1968-288 с.
13. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. - М.: Машиностроение, 1981-184 с.
14. Большев Н.Л., Смирнов Н.В., Таблица математической статистики. - М.:Наука, 1983-416 с.
15. Зачек І.Р., Ільчук Г.А. Фізика і будівництво.-Львів: Афіша, 2008.-330 с.
16. Костенко В.М., Жомнір І.В., Середюк С.Е., Бортнік П.П. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики. Вимірювання фізичних величин та обробка результатів вимірювань.- Рівне: УПВГ, 1981.- 37 с.
17. Вадець Д.І., Орленко В.Ф., Троцюк М.Й., Тучак С.С. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики. Фізичні вимірювання і математична обробка їх результатів.- Рівне: УПВГ, 1992.-26 с.
18. Вадець Д.І., Романів О.Я. Альбом зразків оформлення звітів про виконання лабораторних робіт із загального курсу фізики для студентів технічних спеціальностей УДУВГП.- Рівне: УДУВГП, 2003.-80 с.
19. Баженов Ю.М., Вознесенский В.А. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 272 с.
20. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Стройиздат, 1974. – 272 с.
21. Цимбалюк В. І., Джузь А.Й., Джузь Й.В. Сучасні аспекти проблеми обґрунтування фундаментальних принципів математичного моделювання, критеріальних процедур і метод діагностики математичних моделей в правовій інформатиці. – К., 2007. – 42 с.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

## 11. ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ

1. Освітньо-професійна програма підготовки бакалавра за напрямком 6.060101 “Будівництво”.
2. Бібліотека НУВГП м. Рівне, вул. Приходька, 73.
3. Обласна наукова бібліотека: м. Рівне, майд. Короленка, 6.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



## 12. ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

**Абсорбент** – речовина, що має здатність поглинати інші речовини.

**Абсорбція** – поглинання речовин усім об'ємом рідин або твердих тіл.

**Агрегатний стан** – один із фізичних станів речовини (твердий, рідкий, газоподібний).

**Адсорбція** – поглинання речовин в газоподібному або розчинному стані поверхнею твердих або рідких тіл.

**Аморфний** – який не має форми, кристалічної будови.

**Апроксимація** – наближення.

**Асимптота** - пряма до якої наближаються, але ніколи не збігаються з нею точки деякої кривої в міру того, як ці точки віддаляються в нескінченність.

**Атом** – найдрібніша частинка хімічного елемента, що зберігає всі його хімічні властивості.

**Вакуум** – розріджений стан газу при тиску, що нижчий від атмосферного.

**Гетерогенний** – неоднорідний, який складається з різних за складом частин.

**Гідратація** – приєднання води до різних речовин.

**Гідрофільний** – здатний зв'язувати воду, утримувати її, перешкоджати її виділенню.

**Гідрофобний** – який погано взаємодіє з водою, не змочується водою.

**Гомогенний** – однорідний за складом.

**Градiєнт** – міра зростання або спадання в просторі якої-небудь фізичної величини на одиницю довжини.

**Дегідратація** – відщеплення води від якої-небудь речовини.

**Деструкція** – порушення або руйнування нормальної структури чого-небудь.

**Деформація** – зміна форми або розмірів тіла під впливом прикладених сил або нагрівання.

**Диспергувати** – розсіювати, розсипати, подрібнювати механічним способом тверді або рідкі тіла на дрібні частинки.

**Дисперсний** – розсіяний, розсипаний, який перебуває в стані розпилення, розпорошення.

**Дифузія** – взаємне проникнення речовин (газу, рідини, твердого



тіла ) під час дотикання.

**Експонент** – назва показника ступеня або показникової функції.

**Експоненціальний** – функція виду  $y = a^x$ , де  $a$  - стале число ( додане але не дорівнює одиниці ).

**Експеримент** – один із методів наукового дослідження, у якому вивчення явищ відбувається за допомогою доцільно вибраних або штучно вибраних умов.

**Елемент** – проста речовина, яка не розкладається звичайними хімічними методами на простіші частини.

**Енергія** – одна із основних властивостей матерії – міра її руху, а також здатність виконувати роботу.

**Ідентифікувати** – визнавати які-небудь явища, поняття тотожними, однаковими, подібними.

**Інгредієнт** – складник, компонент складної суміші або сполуки.

**Інертний** – який не вступає в жодні хімічні реакції й не утворює сполук.

**Інструментальний** – здійснюваний за допомогою інструментів.

**Інтерполяція** – наближене знаходження значень функції на підставі деяких відомих її значень.

**Капіляри** – трубки, що мають вузький канал.

**Кінетичний** – пов'язаний з рухом.

**Консистенція** – ступінь густини або в'язкості речовин.

**Константа** – постійна величина.

**Кристали** – тверді тіла, атоми, іони й молекули яких закономірно розміщені, утворюють просторові кристалічні ґратки.

**Кристалізація** – утворення кристалів з газоподібного, рідкого або твердого аморфного станів.

**Ламінарний** – рух, під час якого шари рідини переміщуються паралельно і при цьому не перемішуються.

**Макроструктура** – структура твердого тіла, яку можна побачити неозброєним оком, або при невеликому збільшенні за допомогою лупи.

**Метод** – спосіб пізнання, дослідження.

**Мікроструктура** – будова твердого тіла, яку можна побачити лише за допомогою мікроскопа.

**Молекула** – найменша частинка речовини, яка зберігає основні хімічні властивості цієї речовини.

**Параметр** – величина, яка характеризує певну властивість приладу,



процесу, речовини, критерій, що характеризує певне явище, визначає його оцінку.

**Реакція** – дія, що виникає як відповідь на той чи інший вплив.

**Реологія** – розділ фізики, що вивчає плинність і деформацію суцільних середовищ.

**Седиментація** – осідання маленьких частинок твердого тіла в рідині або газі під дією гравітаційного поля чи відцентрових сил.

**Сорбція** – убирання твердими тілами або рідинами речовин з навколишнього середовища.





## ДОДАТКИ

Додаток 1

### Міжнародна система одиниць (СІ)

Величина		Одиниця		
Назва	Розмірність	Назва	Позначення	
			Українське	Міжнародне
1	2	3	4	5
<i>Основні одиниці</i>				
Довжина	L	метр	м	m
Маса	M	кілограм	кг	kg
Час	T	секунда	с	s
Сила електричного струму	I	ампер	A	A
Термодинамічна температура	T	кельвін	K	K
Сила світла	J	кандела	кд	cd
Кількість речовини	N	моль	моль	mol

1	2	3	4	5
<i>Похідні одиниці простору і часу</i>				
Площинний кут	a	радіан	рад	rad
Просторовий кут	W	стерадіан	ер	sr
Площа	L <sup>2</sup>	квадратний метр	м <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>
Об'єм, місткість	L <sup>3</sup>	кубічний метр	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>
Швидкість	LT <sup>-1</sup>	метр за секунду	м/с	m/s
Прискорення	LT <sup>-2</sup>	метр за секунду	м/с <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
Кутова швидкість	T <sup>-1</sup>	в квадраті радіан за секунду	рад/с	rad/s
Кутове прискорення	T <sup>-2</sup>	в квадраті радіан за секунду	рад/с <sup>2</sup>	rad/s <sup>2</sup>
Період	T	секунда	с	s
Частота періодичного про-	T <sup>-1</sup>	герц	Гц	Hz
Частота обертання	T <sup>-1</sup>	секунда у мінус першому степені	с <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>
Коефіцієнт затухання	T <sup>-1</sup>	секунда у мінус першому степені	с <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>
Коефіцієнт послаблення	L <sup>-1</sup>	метр у мінус першому степені	м <sup>-1</sup>	м <sup>-1</sup>

продовження дод.1

1	2	3	4	5
<i>Похідні одиниці механічних величин</i>				
Густина	$ML^{-3}$	кілограм на кубічний метр	$кг/м^3$	$kg/m^3$
Питомий об'єм	$L^3M^{-1}$	кубічний метр на кілограм	$м^3/кг$	$м^3/kg$
Момент інерції (динамічний)	$ML^2$	кілограм-метр у квадраті	$кг·м^2$	$kg·m^2$
Момент кількості руху	$ML^2T^{-1}$	кілограм-метр у квадраті за секунду	$кг·м^2/с$	$kg·m^2/s$
Кількість руху	$MLT^{-1}$	кілограм-метр за секунду	$кг·м/с$	$kg·m/s$
Момент інерції площі площин- ної фігури, полярний, центробіжний	$L^4$	метр у четвертому степені	$м^4$	$м^4$
Сила	$MLT^{-2}$	ньютон	н	N
Сила тяжіння (вага)	$MLT^{-2}$	ньютон	н	N
Імпульс сили	$MLT^{-1}$	ньютон-секунда	Н·с	N·s
Момент сили, момент пари	$ML^2T^{-2}$	ньютон-метр	Н·м	N·m
Тиск	$ML^{-1}T^{-2}$	паскаль	Па	Pa
Нормальна напруга	$ML^{-1}T^{-2}$	паскаль	Па	Pa
Дотична напруга	$ML^{-1}T^{-2}$	паскаль	Па	Pa
Модуль поздовжньої пружно-	$ML^{-1}T^{-2}$	паскаль	Па	Pa
Модуль зсуву	$ML^{-1}T^{-2}$	паскаль	Па	Pa

1	2	3	4	5
Модуль об'ємного стис-	$ML^{-1}T^{-2}$	паскаль	Па	Pa
Робота	$ML^2T^{-2}$	джоуль	Лж	J
Енергія	$ML^2T^{-2}$	джоуль	Дж	J
Потужність	$ML^2T^{-3}$	ват	Вт	W
Витрата масова	$MT^{-1}$	кілограм за секунду	кг/с	Kg/s
Витрата об'ємна	$M^3T^{-1}$	метр кубічний за секунду	м <sup>3</sup> /с	m <sup>3</sup> /s
Динамічна в'язкість	$ML^{-1}T^{-1}$	паскаль-секунда	Па·с	Pa·s
Кінематична в'язкість	$L^2T^{-1}$	квадратний метр на секунду	м <sup>2</sup> /с	m <sup>2</sup> /s
<i>Похідні одиниці теплових величин</i>				
Різниця температур	T	кельвін	K	K
Кількість теплоти	$ML^2T^{-2}$	джоуль	Лж	J
Питома кількість теплоти	$L^2T^{-2}$	джоуль на кілограм	Дж/кг	J/kg
Теплоємність	$ML^2T^{-2}$	джоуль на кельвін	Дж/К	J/K
Ентропія	$ML^2T^{-2}$	джоуль на кельвін	Дж/К	J/K
Питома ентропія	$L^2T^{-2} \theta^{-1}$	джоуль на кілограм-кельвін	Дж/кг-К	J/kg-K
Питома теплоємність	$L^2T^{-2} \theta^{-1}$	джоуль на кілограм-кельвін	Дж/кг-К	J/kg-K
Питома газова постійна	$L^2T^{-2} \theta^{-1}$	джоуль на кілограм-кельвін	Дж/кг-К	J/kg-K
Тепловий потік	$L^2MT^{-3}$	ват	Вт	W

продовження дод. 1

1	2	3	4	5
Теплопровідність	$MLT^{-3}\theta^{-1}$	ват на метр-кельвін	Вт/м-К	W/m-k
Температуропровідність	$L^2T^{-1}\theta^{-1}$	квадратний метр на секунду	$m^2/s$	$m^2/s$
Температурний градієнт	$L^{-1}\theta$	кельвін на метр	К/м	$K^{-1}$
Температурний коефіцієнт	$\theta^{-1}$	кельвін у мінус першому степені	$K^{-1}$	$K^{-1}$
Коефіцієнт теплопередачі	$MT^{-3}\theta^{-1}$	ват на квадратний метр-кельвін	Вт/м <sup>2</sup> -К	W/m <sup>2</sup> -K
<i>Похідні одиниці електричних і магнітних величин</i>				
Електричний потенціал	$ML^2T^{-3}I^{-1}$	вольт	В	V
Електрорушійна сила	$ML^2T^{-3}I^{-1}$	вольт	В	V
Різниця електричних потенціалів	$ML^2T^{-3}I^{-1}$	вольт	В	V
Електричний опір	$ML^2T^{-3}I^{-2}$	ом	Ом	$\Omega$
Питомий електричний опір	$ML^2T^{-3}I^{-2}$	ом·метр	Ом·м	$\Omega\cdot m$
Електрична ємність	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарада	Ф	F
Електрична провідність	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сіменс	См	S
Питома електрична провідність	$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$	сіменс на метр	См/м	S/m
Магнітний потік	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Вб	Wb
Магнітна індукція	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	Тл	T
Магніторушійна сила	I	ампер	А	A

продовження дод.1

1	2	3	4	5
Напруженість магнітного	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/м	A/м
Густина електричного струму	$L^{-2}I$	ампер на квадратний метр	A/м <sup>2</sup>	A/м <sup>2</sup>
Лінійна густина електричного струму	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/м	A/м
Кількість електрики (електричний заряд)	TI	кулон	Кл	C
Поверхнева густина електричного заряду	$L^{-2}TI$	кулон на квадратний метр	Кл/м <sup>2</sup>	C/м <sup>2</sup>
Просторова густина електричного заряду	$L^{-3}TI$	кулон на кубічний метр	Кл/м <sup>3</sup>	C/м <sup>3</sup>
Електричний момент диполя	LTi	кулон-метр	Кл-м	C·м
Індуктивність (взаємна індуктивність)	$L^2MN^{-2}I^{-2}$	генрі	Гн	H
Намагніченість	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/м	A/м
Магнітний опір	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	генрі у мінус першому степені	Гн <sup>-1</sup>	H <sup>-1</sup>
Електрична енергія	$L^2MT^{-2}$	джоуль	Дж	J
Активна потужність	$L^2MT^{-3}$	ват	Вт	W
Реактивна потужність	$L^2MT^{-3}$	вар	вар	var
Повна потужність	$L^2MT^{-3}$	вольт-ампер	В·А	V·A

продовження дод.1

1	2	3	4	5
<i>Похідні одиниці світлових одиниць</i>				
Світловий потік	<b>J</b>	люмен	лм	lm
Світлова енергія	<b>TJ</b>	люмен-секунда	лм·с	lm·s
Яскравість	<b>L<sup>-2</sup>J</b>	кандела	кд/м <sup>2</sup>	cd/m <sup>2</sup>
Освітленість	<b>L<sup>-2</sup>J</b>	на квадратний метр		
Світність	<b>L<sup>-1</sup>J</b>	люкс	лк	lx
		люмен на квадратний метр	лм/м <sup>2</sup>	lm/m <sup>2</sup>
Світлова експозиція	<b>L<sup>-2</sup> T J</b>	люкс-секунда	лк·с	lm·s
Енергія випромінювання	<b>L<sup>2</sup>MT<sup>-2</sup></b>	джоуль	Дж	J
Енергетична експозиція	<b>MT<sup>-2</sup></b>	джоуль на квадратний метр	Дж/м <sup>2</sup>	J/m <sup>2</sup>
Потік випромінювання (потужність)	<b>L<sup>2</sup>MT<sup>-3</sup></b>	ват	Вт	W
Поверхнева густина потоку випромінювання	<b>MT<sup>-3</sup></b>	ват на квадратний метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
<i>Похідні одиниці акустичних величин</i>				
Звуковий тиск	<b>L<sup>-1</sup>MT<sup>-2</sup></b>	паскаль	Па	Pa
Звукова енергія	<b>L<sup>2</sup>MT<sup>-2</sup></b>	джоуль	Дж	J
Потік звукової енергії (по- тужність)	<b>L<sup>2</sup>MT<sup>-3</sup></b>	ват	Вт	W

1	2	3	4	5
Густина звукової енергії	$L^{-1}MT^{-2}$	джоуль на кубічний метр	Дж/м <sup>3</sup>	J/m <sup>3</sup>
Довжина хвилі	L	метр	м	m
Частота звукових коливань	T <sup>-1</sup>	герц	Гц	Hz
Період звукових коливань	T	секунда	с	s
Швидкість коливання частинки	L T <sup>-1</sup>	метр на секунду	м/с	m/s
Швидкість звуку	L T <sup>-1</sup>	метр на секунду	м/с	m/s
Інтенсивність звуку	MT <sup>-3</sup>	ват на квадратний метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
Акустичний опір	L <sup>4</sup> MT <sup>-1</sup>	паскаль-секунда	Па·с/м <sup>3</sup>	Pa·s/m <sup>3</sup>
<i>Похідні одиниці іонізуючих випромінювань</i>				
Енергія іонізуючого випромінювання	L <sup>2</sup> MT <sup>-2</sup>	джоуль	Дж	J
Потік енергії іонізуючого випромінювання	L <sup>2</sup> MT <sup>-3</sup>	ват	Вт	W
Доза випромінювання	L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>	грей	Гр	Gy
Еквівалентна доза Керма	—	зіверт	Зв	Sv
Потужність доз випромінювання	L <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>	грей в секунду	Гр/с	Gy/s



закінчення дод. 1

1	2	3	4	5
Експозиційна доза рентгенівського і гамма-випромінювання	$M^{-1}TI$	кулон на кілограм	Кл/кг	C/kg
Інтенсивність випромінювання	$MT^{-3}$	ват на квадратний метр	$Вт/м^2$	$W/m^2$
Потужність експозиційної дози рентгенівського і гамма-випромінювання	$M^{-1}I$	ампер на кілограм	A/кг	A/kg
Активність радіонукліду	—	бекерель	Бк	Bq

## Позасистемні одиниці, допущені до застосування на рівні з одиницями системи СІ

Назва	Одиниця			Співвідношення	Примітка
	Назва	Позначення			
		Українське	Міжнародне		
1	2	3	4	5	6
Час*	хвилина година доба	хв. год. д	min h d	$1 \text{ хв} = 60 \text{ с}$ $1 \text{ год} = 3600 \text{ с}$ $1 \text{ д} = 24 \text{ год}$	Недопустиме використання з префіксами
Маса	тонна центнер уніфікована атомна одиниця маси	т ц а.о.м.	t z u	$1 \text{ т} = 1000 \text{ кг}$ $1 \text{ ц} = 100 \text{ кг}$ $1 \text{ а.о.м.} = 1,66054 \cdot 10^{-27}$	Значення атомної одиниці маси визначене експериментальне
Об'єм, місткість	літр **	л	l	$1 \text{ л} = 1 \text{ дм}^3$ $= 10^{-3} \text{ м}^3$	Літр є спеціальною назвою кубічного дециметра
Енергія	електрон-вольт	eВ	eV	$1 \text{ eВ} = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ Дж}$	Значення електрон-вольта визначене експериментальне
Площинний кут	градус хвилина секунда	...° ...' ...''	...° ...' ...''	$1^\circ = (\pi/180) \text{ рад}$ $1' = (1/60^\circ) = (\pi/10800) \text{ рад}$ $1'' = (1/60') = (\pi/648000) \text{ рад}$	

\* Припустимим є також застосування одиниць часу: тиждень, місяць, рік тощо, проте їх визначення часто потребує уточнення.

\*\* Не рекомендується застосовувати при точних вимірюваннях.

Диференціальна функція нормованого нормального розподілу  $p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2}$

t	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	t
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973	0
0,1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918	0,1
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825	0,2
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697	0,3
0,4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538	0,4
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352	0,5
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144	0,6
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920	0,7
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685	0,8
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444	0,9
1	0,242	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203	1
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965	1,1
1,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736	1,2
1,8	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518	1,3
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315	1,4

продовження дод. 3

164

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127	1,5
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	989	973	957	1,6
1,7	940	925	909	893	878	863	848	833	818	804	1,7
1,8	790	775	761	748	734	721	707	694	681	669	1,8
1,9	656	644	632	620	608	596	584	573	562	551	1,9
2	0,054	529	519	508	498	488	478	468	459	449	2
2,1	440	431	422	413	404	396	338	379	371	363	2,1
2,2	355	347	339	332	325	317	310	303	297	290	2,2
2,3	283	277	270	264	258	252	246	241	235	229	2,3
2,4	224	219	213	208	203	198	194	189	184	180	2,4
2,5	175	171	167	163	158	154	151	147	143	139	2,5
2,6	136	132	129	126	122	119	116	113	110	107	2,6
2,7	104	101	99	96	93	91	88	86	84	81	2,7
2,8	79	77	75	73	71	69	67	65	63	61	2,8
2,9	60	58	56	55	53	51	50	48	47	46	2,9

## закінчення дод.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	0,0044	43	42	40	39	38	37	36	35	34	3
3,1	33	32	31	30	29	28	27	26	25	25	3,1
3,2	24	23	22	22	21	20	20	19	18	18	3,2
3,3	17	17	16	16	15	15	14	14	13	13	3,3
3,4	12	12	12	11	11	10	10	10	9	9	3,4
3,5	9	8	8	8	8	7	7	7	7	6	3,5
3,6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	4	3,6
3,7	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3,7
3,8	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3,8
3,9	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	3,9

Інтегральна функція нормованого нормального розподілу  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$

Z	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-3,5	0,00017	0,00017	0,00018	0,00019	0,00019	0,0002	0,00021	0,00022	0,00022	0,00023
-3,4	0,00024	0,00025	0,00026	0,00027	0,00028	0,00029	0,0003	0,00031	0,00033	0,00034
-3,3	0,00035	0,00036	0,00038	0,00039	0,0004	0,00042	0,00043	0,00045	0,00047	0,00048
-3,2	0,0005	0,00052	0,00054	0,00056	0,00058	0,0006	0,00062	0,00064	0,00066	0,00069
-3,1	0,00071	0,00074	0,00076	0,00079	0,00082	0,00085	0,00087	0,0009	0,00094	0,00097
-3	0,001	0,00104	-0,0011	0,00111	0,00114	0,00118	0,00122	0,00126	0,00131	0,00135
-2,9	0,0014	0,0014	0,0015	0,0015	0,0016	0,0016	0,0017	0,0017	0,0018	0,0019
-2,8	0,0019	0,002	0,0021	0,0021	0,0022	0,0023	0,0023	0,0024	0,0025	0,0026
-2,7	0,0026	0,0027	0,0028	0,0029	0,003	0,0031	0,0032	0,0033	0,0034	0,0035
-2,6	0,0036	0,0037	0,0038	0,0039	0,004	0,0041	0,0043	0,0044	0,0045	0,0047
-2,5	0,0048	0,0049	0,0051	0,0052	0,0054	0,0055	0,0057	0,0059	0,006	0,0062
-2,4	0,0064	0,0066	0,0068	0,0069	0,0071	0,0073	0,0075	0,0078	0,008	0,0082
-2,3	0,0084	0,0087	0,0089	0,0091	0,0094	0,0096	0,0099	0,0102	0,0104	0,0107

продовження дод. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-22	0,011	0,0113	0,0116	0,0119	0,0122	0,0125	0,0129	0,0132	0,0136	0,0139
-21	0,0143	0,0146	0,015	0,0154	0,0158	0,0162	0,0166	0,017	0,0174	0,0179
-2	0,0183	0,0188	0,0192	0,0197	0,0202	0,0207	0,0212	0,0217	0,0222	0,0228
-1,9	0,0233	0,0239	0,0244	0,025	0,0256	0,0262	0,0268	0,0274	0,0281	0,0287
-1,8	0,0294	0,0301	0,0307	0,0314	0,0322	0,0329	0,0336	0,0344	0,0351	0,0359
-1,7	0,0367	0,0375	0,0384	0,0392	0,0401	0,0409	0,0418	0,0427	0,0436	0,0446
-1,6	0,0455	0,0465	0,0475	0,0485	0,0495	0,0505	0,0516	0,0526	0,0537	0,0548
-1,5	0,0559	0,0571	0,0582	0,0594	0,0606	0,0618	0,063	0,0643	0,0655	0,0668
-1,4	0,0681	0,0694	0,0708	0,0721	0,0735	0,0749	0,0764	0,0778	0,0793	0,0808
-1,3	0,0823	0,0838	0,0853	0,0869	0,0885	0,0901	0,0918	0,0934	0,0951	0,0968
-1,2	0,0985	0,1003	0,102	0,1038	0,1057	0,1075	0,1093	0,1112	0,1131	0,1151
-1,1	0,117	0,119	0,121	0,123	0,1251	0,1271	0,1292	0,1314	0,1335	0,1357
-1	0,1379	0,1401	0,1423	0,1446	0,1469	0,1492	0,1515	0,1539	0,1562	0,1587
-0,9	0,1611	0,1635	0,166	0,1685	0,1711	0,1736	0,1762	0,1788	0,1814	0,1841
-0,8	0,1867	0,1894	0,1922	0,1949	0,1977	0,2005	0,1033	0,2061	0,209	0,2119
-0,7	0,2148	0,2177	0,2207	0,2236	0,2266	0,2297	0,2327	0,2358	0,2389	0,242
-0,6	0,2451	0,2483	0,2514	0,1546	0,2578	0,2611	0,1643	0,2676	0,2709	0,2743

продовження дод. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-0,5	0,2776	0,281	0,2843	0,2877	0,2912	0,2946	0,2981	0,3015	0,305	0,3085
-0,4	0,3121	0,3156	0,3192	0,3228	0,3264	0,33	0,3336	0,3372	0,3409	0,3446
-0,3	0,3483	0,352	0,3557	0,3594	0,3632	0,3669	0,3707	0,3745	0,3783	0,3821
-0,2	0,3859	0,3897	0,3936	0,3974	0,4013	0,4052	0,409	0,4129	0,4168	0,4207
-0,1	0,4247	0,4286	0,4325	0,4364	0,4404	0,4443	0,4483	0,4522	0,4562	0,4602
0	0,4641	0,4681	0,4721	0,4761	0,4801	0,484	0,488	0,492	0,496	0,5
0	0,5	0,504	0,508	0,512	0,516	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,591	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,648	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,67	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,695	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,719	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,758	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,791	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8079	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,834	0,8365	0,8389
1	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621



## закінчення дод. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,877	0,879	0,881	0,883
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,898	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,937	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,975	0,9756	0,9761	0,9767
2	0,9773	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,5	0,9938	0,994	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
3	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99896	0,999
3,5	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,9998	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983

## Значення коефіцієнта Стьюдента

Значення  $t_{\dot{u}M}$  і  $\frac{t_{\dot{u}M}}{\sqrt{n}}$  залежно від довірчої ймовірності  $P$  і  $k=n-1$

(значення  $t_{\dot{u}M}$  задовольняє рівність  $2 \int_0^{t_p} \sigma(t, k) dt = p$ )



$P$	0,683		0,9		0,95		0,98		0,99		0,997	
$k$	$t_{\dot{u}M}$	$\frac{t_{\dot{u}M}}{\sqrt{n}}$	$t_{\dot{u}M}$	$\frac{t_{\dot{u}M}}{\sqrt{n}}$	$t_{\dot{u}M}$	$\frac{t_{\dot{u}M}}{\sqrt{n}}$	$t_{\dot{u}M}$	$\frac{t_{\dot{u}M}}{\sqrt{n}}$	$t_{\dot{u}M}$	$\frac{t_{\dot{u}M}}{\sqrt{n}}$	$t_{\dot{u}M}$	$\frac{t_{\dot{u}M}}{\sqrt{n}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1,8	1,3	6,31	4,48	12,71	9	31,8	22,5	63,7	45	235	166
2	1,32	0,76	2,92	1,69	4,3	2,5	6,96	4,01	9,92	5,7	19,2	11,1
3	1,2	0,6	2,35	1,18	3,18	1,59	4,54	2,27	5,84	2,9	9,2	4,6
4	1,15	0,51	2,13	0,95	2,78	1,24	3,75	1,67	4,6	2,1	6,6	3
5	1,1	0,45	2,02	0,82	2,57	1,05	3,36	1,37	4,03	1,6	5,5	2,24
6	1,09	0,41	1,94	0,73	2,45	0,93	3,14	1,19	3,71	1,4	4,9	1,85
7	1,08	0,38	1,9	0,67	2,36	0,84	3	1,06	3,5	1,24	4,5	1,59
8	1,07	0,36	1,86	0,62	2,31	0,77	2,9	0,97	3,36	1,12	4,3	1,43
9	1,06	0,34	1,83	0,58	2,26	0,72	2,82	0,89	3,25	1,03	4,1	1,29

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10	1,05	0,32	1,81	0,55	2,13	0,67	2,76	0,83	3,17	0,96	3,9	1,18
11	1,05	0,3	1,8	0,52	2,2	0,65	2,72	0,79	3,11	0,9	3,8	1,1
12	1,05	0,29	1,78	0,49	2,18	0,6	2,68	0,74	3,06	0,85	3,8	1,05
13	1,04	0,28	1,77	0,47	2,16	0,58	2,65	0,71	3,01	0,8	3,7	0,99
14	1,04	0,27	1,76	0,45	2,14	0,55	2,62	0,68	2,98	0,77	3,7	0,96
15	1,04	0,26	1,75	0,44	2,13	0,53	2,6	0,65	2,95	0,74	3,6	0,9
16	1,04	0,25	1,75	0,42	2,12	0,51	2,58	0,63	2,92	0,71	3,6	0,87
17	1,03	0,24	1,74	0,41	2,11	0,5	2,57	0,61	2,9	0,68	3,5	0,82
18	1,03	0,24	1,73	0,4	2,1	0,48	2,55	0,59	2,88	0,66	3,5	0,8
19	1,03	0,23	1,73	0,39	2,09	0,47	2,54	0,57	2,86	0,64	3,4	0,77
20	1,03	0,23	1,72	0,38	2,09	0,47	2,53	0,55	2,84	0,62	3,4	0,76
30	1,02	0,19	1,7	0,31	2,04	0,37	2,46	0,44	2,75	0,49	3,3	0,6
40	1,01	0,16	1,68	0,26	2,02	0,32	2,42	0,38	2,7	0,42	3,2	0,51
50	1,01	0,14	1,68	0,24	2,01	0,28	2,41	0,34	2,68	0,38	3,2	0,45
100	1,01	0,1	1,66	0,17	1,98	0,2	2,38	0,24	2,63	0,26	3,1	0,31
200	1	0,07	1,65	0,12	1,97	0,14	2,34	0,16	2,6	0,18	3,04	0,22
$\infty$	1	0	1,645	0	1,96	0	2,33	0	2,58	0	3	0

## Розподіл Стюдента

$$P\{|t| < t_{\text{ум}}\} = 2 \int_0^{t_{\text{ум}}} S(t; k) dt, \text{ де } k = n - 1$$

		<i>p</i>											
<i>k</i>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	13	
1	0.158	0.325	0.51	0.727	1	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	
2	0.142	0.289	0.445	0.617	0.816	1.061	1.386	1.886	2.92	4.303	6.925	9.925	
3	0.137	0.277	0.424	0.584	0.765	0.978	1.25	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	
	0.134	0.271	0.414	0.569	0.741	0.941	1.19	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	
4	0.132	0.267	0.408	0.569	0.727	0.92	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	
	0.131	0.265	0.404	0.553	0.718	0.906	1.134	1.44	1.943	2.447	3.143	3.707	
5	0.13	0.263	0.402	0.549	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	
	0.13	0.262	0.399	0.546	0.706	0.889	1.108	1.397	1.86	2.306	2.896	3.355	
6	0.129	0.261	0.398	0.543	0.703	0.883	1.1	1.383	1.833	2.262	2.821	3.25	
7	0.129	0.26	0.397	0.542	0.7	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	
8	0.129	0.26	0.396	0.54	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	
9	0.128	0.259	0.395	0.539	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	
10	0.128	0.259	0.394	0.538	0.694	0.87	1.079	1.35	1.771	2.16	2.65	3.012	
11	0.128	0.258	0.393	0.537	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	
12	0.128	0.258	0.393	0.536	0.691	0.866	1.074	1.41	1.753	2.131	2.602	2.947	
13	0.128	0.258	0.392	0.535	0.69	0.865	1.071	1.337	1.746	2.12	2.583	2.921	
14	0.128	0.257	0.392	0.534	0.689	0.863	1.069	1.333	1.74	2.11	2.567	2.898	

закінчення дод. б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,33	1,734	2,101	2,552	2,878
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,86	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,08	2,518	2,831
22	0,127	0,256	0,39	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	0,127	0,256	0,39	0,532	0,685	0,858	1,06	1,319	1,714	2,069	2,5	2,807
24	0,127	0,256	0,39	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,707
25	0,127	0,256	0,39	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,06	2,485	2,787
26	0,127	0,256	0,39	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	0,127	0,256	0,389	0,53	0,683	0,854	1,055	1,31	1,697	2,042	2,457	2,75
∞	0,12566	0,25335	0,38532	0,5244	0,67449	0,84162	1,03643	1,28155	1,64485	1,95996	2,32634	2,5758

### Інтегральна функція $\chi^2$ - розподілу Пірсона

Значення  $\chi^2_k$ ;  $P$  для різних  $k$  і  $P$ , де  $k = n - 1$

$k$	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,000157	0,00062	0,00393	0,0158	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635
2	0,0201	0,0404	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,408	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	4,642	6,251	7,815	9,837	11,345
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	5,989	7,779	9,488	11,668	13,277
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,343	3,000	4,351	6,064	7,289	9,236	11,070	13,388	15,086
6	0,872	1,134	1,635	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	8,558	10,645	12,592	15,033	16,812
7	1,239	1,564	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,383	9,803	12,017	14,067	16,622	18,475
8	1,646	2,032	2,733	3,490	4,594	5,527	7,344	9,524	11,030	13,362	15,507	18,168	20,090
9	2,088	2,532	3,325	4,168	5,38	6,393	8,343	10,656	12,242	14,684	16,919	19,679	21,666
10	2,558	3,059	3,94	4,865	6,179	7,267	9,342	11,781	13,442	15,987	18,307	21,161	23,209
11	3,053	3,609	4,575	5,578	6,989	8,148	10,34	12,889	14,631	17,275	19,675	22,618	24,725
12	3,571	4,178	5,226	6,304	7,807	9,034	11,34	14,011	15,812	18,549	21,026	24,054	26,217
13	4,107	4,765	5,892	7,042	8,634	9,926	12,34	15,119	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688
14	4,660	5,368	6,571	7,790	9,467	10,821	13,33	16,222	18,151	21,064	23,685	26,873	29,141

закінчення дод. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15	5,229	5,985	7,261	8,547	10,307	11,721	14,339	17,322	19,311	22,307	24,996	28,259	30,578
16	5,812	6,614	7,962	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	20,465	23,542	26,296	29,633	32,000
17	6,408	7,255	8,672	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	21,615	24,769	27,587	30,995	33,409
18	7,015	7,906	9,390	10,865	12,857	14,440	17,338	20,601	22,760	25,989	28,869	32,346	34,805
19	7,633	8,567	10,117	11,651	13,716	15,352	18,338	21,689	23,900	27,204	30,144	33,687	36,191
20	8,260	9,237	10,851	12,444	14,578	16,266	19,337	22,775	25,038	28,412	31,410	35,020	37,566
21	8,897	9,915	11,591	13,240	15,445	17,182	20,337	23,858	26,171	29,615	32,671	36,343	38,932
22	9,542	10,600	12,338	14,041	16,314	18,101	21,337	24,939	27,301	30,813	33,924	37,659	40,289
23	10,196	11,293	13,091	14,848	17,187	19,021	22,337	26,018	28,429	32,007	35,172	38,968	41,638
24	10,836	11,992	13,848	15,659	18,062	19,943	23,337	27,096	29,553	33,196	36,415	40,270	42,980
25	11,524	12,697	14,611	16,473	18,940	20,867	24,337	28,172	30,675	34,382	37,652	41,566	44,314
26	12,198	13,409	15,379	17,292	19,82	21,792	25,336	29,246	31,795	35,563	38,885	42,856	45,642
27	12,897	14,125	16,151	18,114	20,703	22,710	26,336	30,319	32,912	36,741	40,113	44,140	46,963
28	13,565	14,847	16,928	18,939	21,588	23,647	27,336	31,391	34,027	37,916	41,337	45,419	48,278
29	14,256	15,574	17,708	19,768	22,475	24,577	28,336	32,461	35,139	39,087	42,557	46,693	49,588
30	14,953	16,306	18,493	20,599	23,364	25,508	29,336	33,530	36,250	40,256	43,773	47,962	50,892



**Таблиця для визначення похибок**

№ п/п	Вигляд функції $f = f(a, b, c)$	Абсолютна похибка $\Delta f$	Відносна похибка $\varepsilon = \Delta f / f$
1.	$f = Aa + Bb$ $A = \text{const}$ , $B = \text{const}$	$\sqrt{A^2(\Delta a)^2 + B^2(\Delta b)^2}$	$\frac{\sqrt{A^2(\Delta a)^2 + B^2(\Delta b)^2}}{Aa + Bb}$
2.	$f = Aa - Bb$ $A = \text{const}$ , $B = \text{const}$	$\sqrt{A^2(\Delta a)^2 + B^2(\Delta b)^2}$	$\frac{\sqrt{A^2(\Delta a)^2 + B^2(\Delta b)^2}}{Aa - Bb}$
3.	$f = ab$	$\sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2(\Delta b)^2}$	$\frac{\sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2(\Delta b)^2}}{\overline{a} \cdot \overline{b}} =$ $= \sqrt{\frac{(\Delta a)^2}{(\overline{a})^2} + \frac{(\Delta b)^2}{(\overline{b})^2}}$
4.	$f = a/b$	$\frac{\sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2(\Delta b)^2}}{(\overline{b})^2} =$ $= \sqrt{\frac{(\Delta a)^2}{(\overline{b})^2} + \frac{(\overline{a})^2 \Delta b}{(\overline{b})^4}}$	$\sqrt{\frac{(\Delta a)^2}{(\overline{a})^2} + \frac{(\Delta b)^2}{(\overline{b})^2}}$
5.	$f = a^n$	$n(\overline{a})^{n-1} \Delta a$	$\frac{n\overline{a}}{a}$
6.	$f = a/(a + b)$	$\frac{\sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2} + \sqrt{(\overline{a})^2(\Delta b)^2}}{(\overline{a} + \overline{b})^4} =$ $= \frac{\sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2(\Delta b)^2}}{(\overline{a} + \overline{b})^2}$	$\frac{\sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2(\Delta b)^2}}{\overline{a}(\overline{a} + \overline{b})}$
7.	$f = a/(a - b)$	$\frac{\sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2(\Delta b)^2}}{(\overline{a} - \overline{b})^2}$	$\frac{\sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2(\Delta b)^2}}{\overline{a}(\overline{a} - \overline{b})}$
8.	$f = \sin a$	$\cos \alpha \cdot \Delta \alpha$	$ctg \alpha \cdot \Delta \alpha$
9.	$f = \cos a$	$\sin \alpha \cdot \Delta \alpha$	$tg \alpha \cdot \Delta \alpha$
10.	$f = \frac{a + b}{ab}$	$\sqrt{\frac{(\Delta a)^2}{(\overline{a})^4} + \frac{(\Delta b)^2}{(\overline{b})^4}}$	$\frac{1}{a + b} \sqrt{\frac{(\overline{a})^2(\Delta b)^2}{(\overline{b})^2} + \frac{(\overline{b})^2(\Delta a)^2}{(\overline{a})^2}}$
11.	$f = (\overline{a} \cdot \overline{b}) / (\overline{a} + \overline{b})$	$\frac{1}{(\overline{a} + \overline{b})^2} \sqrt{(\overline{b})^2(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2(\Delta b)^2}$	$\frac{1}{a + b} \sqrt{\frac{(\overline{b})^2(\Delta a)^2}{(\overline{a})^2} + \frac{(\overline{a})^2(\Delta b)^2}{(\overline{b})^2}}$



Ф І З И Ч Н І С Т А Л І	
О С Н О В Н І К О Н С Т А Н Т И	
Заряд електрона	$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса спокою електрона	$m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а.о.м.}$
Маса спокою протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.о.м.}$
Маса спокою нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.о.м.}$
Швидкість світла у вакуумі	$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Гравітаційна стала	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Стала Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
П О Х І Д Н І В І Д О С Н О В Н И Х К О Н С Т А Н Т	
Відношення заряду електрона до його маси	$1,759 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Стала Фарадея ( $eN_A$ )	$9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Н О Р М А Л Ь Н І З Н А Ч Е Н Н Я В Е Л И Ч И Н	
Атмосферний тиск	$P_0 = 101325 \text{ Па}$
Прискорення вільного падіння	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Г А З О В І С Т А Л І	
Універсальна газова стала	$R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Стала Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
З Н А Ч Е Н Н Я В Е Л И Ч И Н П Р И Н О Р М А Л Ь Н О М У С Т А Н І Г А З У	
Об'єм 1 моль ідеального газу	$V_m = 22,414 \text{ м}^3 / \text{моль}$
Швидкість звуку в повітрі	$v_{зв} = 331,46 \text{ м/с}$



## ОСНОВНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ

Лінійні розміри тіл вимірюються за допомогою масштабної лінійки, штангенциркуля, мікрометра, індикатора. З масштабних лінійок використовуються металеві пластмасові та дерев'яні різної довжини. Ціна поділки кожної лінійки дорівнює 1мм.

### ШТАНГЕНЦИРКУЛЬ

Штангенциркуль (рис.1.) - це прилад для вимірювання лінійних розмірів з точністю від 0,1 до 0,02мм.

Штангенциркуль складається із сталюї лінійки (штанги) 5 з міліметровими поділками, відносно якої переміщується рамка 4 з ноніусом, і двох пар губок (ніжок) - нерухомих 1 і рухомих 2. При зімкнутих губках відлік за ноніусом дорівнює нулю. Між губками затискують вимірювальну деталь.

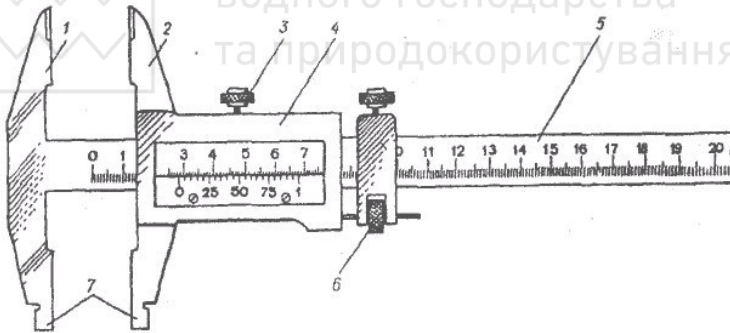


Рис.1. Зображення штангенциркуля

Щоб точно визначити розмір деталі, рухоми губку штангенциркуля переміщують у момент дотику її до деталі за допомогою мікрометричного пристрою 6, щоб запобігти надмірному натисканню губок на деталь. Закріплюють рухоми губку на штанзі стопорним гвинтом 3 і роблять відлік за ноніусом. Для вимірювання внутрішніх розмірів деталі є каліровані губки 7. Загальна ширина їх при зведених губках найчастіше дорівнює 10мм; цей розмір треба додавати до відліку за шкалою. Деякі штангенциркулі мають також висувні



## МІКРОМЕТР

**Мікрометр** (рис.2.) - це прилад, призначений для вимірювання лінійних розмірів з точністю до 0,01мм. Він складається із сталевий скоби 8, що має опорну нерухому п'яту 1, стебла 3, мікрометричного гвинта 2 і стопорного гвинта 7.

Мікрометричний гвинт переміщується всередині спеціальної гільзи з різьбою, закріпленою в стеблі 3. Крок гвинта 0,5 - 1,0мм, На зовнішній поверхні стебла нанесено дві поздовжні шкали, зсунуті одна відносно одної на 0,5мм. Зовні стебло охоплює барабан 4, з'єднаний з мікрометричним гвинтом.

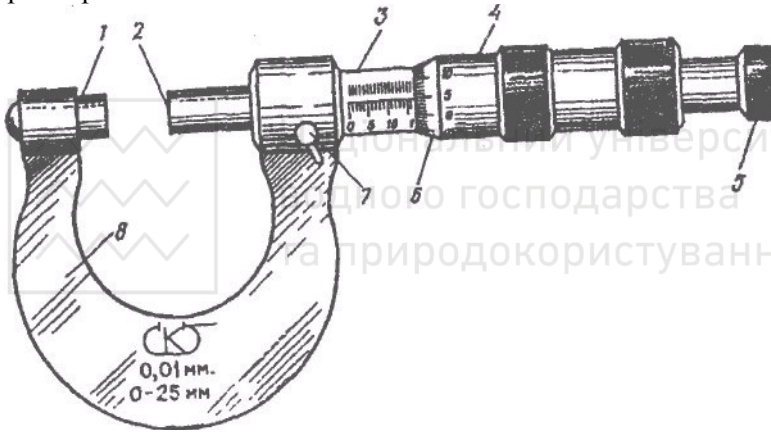


Рис.2. Зображення мікрометра

Таким чином, при обертанні барабана обертається і гвинт, при цьому переміщується його вимірювальна поверхня 2. Дія мікрометра ґрунтується на властивості гвинта здійснювати при повороті його поступальне переміщення, пропорційне куту повороту. Скошений обід барабана поділено на 50 (або 100) однакових поділок. На правому кінці барабана є особливий фрикційний пристрій - тріскачка 5. При вимірюванні слід обертати барабан тільки за головку тріскачки. Деталь при вимірюванні затискається між п'ятою і мікрометричним гвинтом. Після того як досягнуто певного ступеня натиску на деталь (~5-6Н), фрикційна головка починає проковзувати, даючи характерний тріск. Завдяки цьому затиснута деталь деформується порівняно мало і, крім того, це запобігає псуванню мікрометричного гвинта.



Для обрахунку показів мікрометра по шкалі стебла визначають ціле число (нижня шкала) і половини (верхня шкала) міліметрів. При визначенні сотих часток міліметра користуються поділками на барабані (крок мікрометричного гвинта визначається заздалегідь).

## МЕХАНІЧНИЙ ІНДИКАТОР

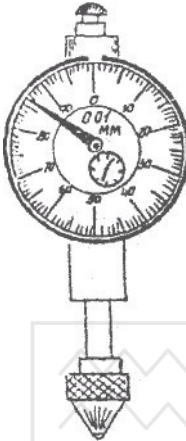


Рис.3. Зображення механічного індикатора

Індикатор (рис.3) призначається для вимірювання довжин в межах від 0,00 до 10,00мм з точністю до 0,01мм. Складається з корпусу, що має форму плоско-го циліндра малої висоти, гільзи, яка жорстко з'єднана з корпусом стержня, що може переміщуватися всередині гільзи, механізму переміщення стрілок, двох шкал, на більшій з яких є дві оцифровки в протилежних напрямках. При зміщенні стержня на 1,00мм велика стрілка робить один оберт, що відповідає 100 поділкам, отже ціна поділки великої чорної шкали 0,01мм. Мала стрілка робить один оберт при зміщенні стержня на 10,00мм. Червона шкала малої стрілки має 10 поділок, отже ціна поділки малої шкали 1 мм.

Індикатор закріплюється за гільзу таким чином, щоб стержень впирався в поверхню, зміщення якої треба виміряти. При закріпленні стержня та вимірюванні слід дотримуватись правил:

- ✓ закріпити індикатор в такому положенні, щоб мала стрілка становилась на "нуль", а в стержня був запас ходу 10мм в сторону зміщення, яке вимірюється;
- ✓ велику стрілку встановити на "нуль", повертаючи велику шкалу за рубчасте кільце, що обрамляє цю шкалу (шкала зроблена рухомою, бо встановити велику стрілку на "нуль", міняючи положення індикатора, неможливо, і робити це не слід);
- ✓ перевірити, в який бік буде обернутися велика стрілка при вимірюванні і відповідно рахувати відлік по чорних чи червоних цифрах на великій шкалі.

Останнє правило вимагає особливої уваги, бо стержень та стрілки при вимірюванні на різних установках рухаються в різних напрямках.

Покази малої стрілки записуються як цілі міліметри, а покази великої стрілки - як соті долі міліметра.

Оскільки мала стрілка не показує долей міліметра, то при закріп-




ленні індикатора можна залишити невеликі її відхилення від нульової поділки.



## ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ

Електровимірювальні прилади застосовуються для вимірювання електричних величин: сили струму, напруги, опору, потужності, тощо.

Всі електровимірювальні прилади класифікуються за такими **основними ознаками** (інформація про це нанесена на шкалу приладу):

- за видом вимірюваної величини: амперметр (позначається А), вольтметр (V), омметр ( $\Omega$ ), ватметр (W), лічильник (Wh) і інші.
- за видом струму: прилади постійного струму (позначаються —), змінного струму (~), прилади постійного і змінного струму (—);
- за класом точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0;
- за принципом дії: магнітоелектричні позначаються , електро-

магнітні () , електродинамічні () , теплові (Y).

На шкалу приладу нанесено також умовні позначення, що показують робоче положення шкали - вертикальне () , горизонтальне () , під кутом до горизонту ( $\angle < 60^\circ$ ); значення напруги, при якій випробувана ізоляція приладу ( $\downarrow 2$  кВ), і інші.

На практиці поширені прилади магнітоелектричної та електромагнітної системи.

В приладах магнітоелектричної системи (рис. 4.) вимірюваний струм проходить через рамку, яка може обертатись в полі постійного магніту 1. При відсутності струму рамка утримується в деякому положенні пружинами 5; при цьому стрілку, закріплену на одній осі разом з рамкою, можна сумістити з нулем шкали за допомогою коректора 6.

Коли через рамку 4 протікає струм, виникає сила Ампера, що створює обертовий момент. По мірі обертання рамки цей момент врівноважується механічним протидіючим моментом, створеним струмопровідними пружинами 5. Кут повороту, при якому рамка зупиняється, пропорційний величині вимірюваного струму. Тому шкала приладів магнітоелектричної системи рівномірна.

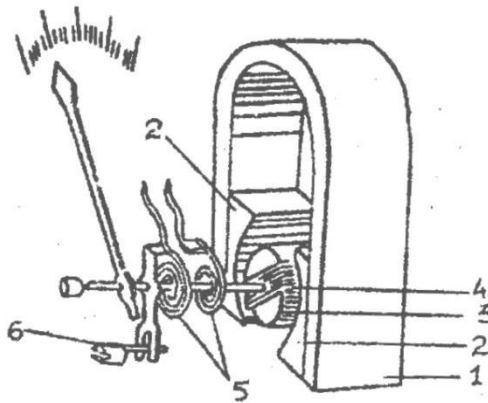


Рис.4. Конструкція приладу магнітоелектричної системи

Прилади цієї системи мають високу точність і чутливість. Безпосередньо їх можна використовувати лише для вимірювання в колах постійного струму.

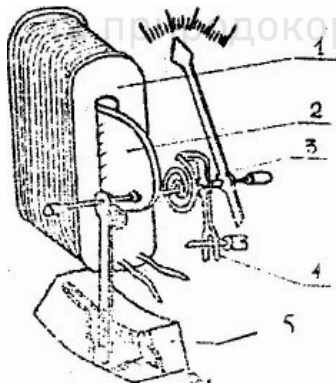


Рис.5. Конструкція приладу електромагнітної системи

В приладах електромагнітної системи вимірюваний струм проходить через нерухому котушку 1. Виникає магнітне поле, яке втягує феромагнітний сердечника 2. При втягуванні сердечник обертається вимірювальна стрілка, яка закріплена з ним на одній осі. Сердечник втягується до тих пір, доки дія обертового моменту з боку магнітного поля котушки 1 не зрівноважиться протидіючим обертовим моментом



пружины 3. Коректором 4 стрілку встановлюють на нуль при відсутності струму. Коливання стрілки швидко припиняються завдяки опору повітря при русі демпфера 5.

При зміні напрямку струму в котушці змінюється і напрямок магнітного поля, і напрямок намагнічування. Завдяки цьому магнітні сили, що діють на сердечник, не змінюють свого напрямку. Тому прилади електромагнітної системи можна використовувати для вимірювання як в колах постійного, так і змінного струмів. Шкала у цих приладів нерівномірна.

Встановлюючи відповідність між числом поділок і числовим значенням вимірюваної величини, можна проградувати шкалу, по якій здійснюється відлік вимірюваної величини. Величина, яка дорівнює відношенню зміни числа поділок  $dn$  до приросту вимірюваної величини  $dx$ , називається **чутливістю приладу**

$$S = \frac{dn}{dx} \quad (1)$$

Величина



$$C = \frac{dx}{dn} \quad (2)$$

називається **ціною поділки шкали приладу**. Звідси видно, що ціна поділки чисельно дорівнює зміні вимірюваної величини, при якій покази приладу змінюються на одну поділку. Для таких приладів ціна поділки визначається відношенням значення вимірюваної величини (напроти якого знаходиться показник границі вимірювання) до числа всіх поділок шкали. Значення вимірюваної величини можна знайти із співвідношення:

$$x = \frac{x_{\max}}{n_{\max}} n, \quad (3)$$

де  $x_{\max}$  - граничне значення вимірюваної величини,  $n_{\max}$  - граничне число поділок шкали,  $n$  - число поділок, що відповідає вимірюваній величині.

В більшості випадків для характеристики точності електровимірювальних приладів користуються зведеною похибкою. **Зведеною похибкою** називається відношення абсолютної похибки до значення вимірюваної величини

$$\varepsilon_{\%} = \frac{\Delta x}{x_{\max}} \quad (4)$$



**Клас точності приладу** чисельно дорівнює зведеній похибці, вираженій у відсотках.

**Абсолютна похибка приладу**

$$\Delta x = \varepsilon_n x_{\max} \quad (5)$$

не залежить від значення вимірюваної величини.

**Відносна похибка** вимірювання змінюється при зміні  $x$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\varepsilon_n x_{\max}}{x} \quad (6)$$

Вона найменша при  $x = x_{\max}$  і дорівнює зведеній похибці. При зменшенні величини  $x$ : ця похибка збільшується і коли  $x \rightarrow 0$ , то  $\varepsilon \rightarrow \infty$ .

Розглянемо конкретні приклади визначення ціни поділки, значення вимірюваної величини, її абсолютної і відносної похибок. Нехай міліамперметр має на шкалі 300 поділок. Він дозволяє виміряти максимальне значення струму в інтервалах 0-9 або 0-30mA. Нехай прилад працює в діапазоні 0-9mA, відлік по приладу 210,0 поділок з точністю до 0,5 поділки.

Тоді ціна поділки:  $C_1 = \frac{9mA}{300}$

а вимірювана сила струму

$$I_1 = C_1 \cdot 210.0 = \frac{9}{300} \cdot 210.0 = 6.3(mA).$$

При вимірюванні сили струму  $I_2$  в діапазоні 0-30 mA відлік нехай також рівний 210 поділок.

В цьому випадку:

$$I_2 = C_{21} \cdot 210.0 = \frac{30}{300} \cdot 210.0 = 21(mA).$$

Нехай межа вимірювання напруги вольтметром 300V, максимальна кількість поділок його шкали 150, покази приладу 120,0 поділок, клас точності 0,5. Визначимо відносну і абсолютну похибки вимірювання.

Знаходимо значення вимірюваної напруги:

$$U = \frac{300}{150} \cdot 120.0 = 240.0(V).$$

Зведена похибка:  $\varepsilon_{np} = \frac{\Delta U}{U_{\max}}$

звідси:





$$\Delta U = \varepsilon_{\%} U_{\max} = \frac{0.5}{100} \cdot 300 \approx 1.5 (B)$$

Відносна похибка вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{1.5}{240.0} \cdot 100\% = 0.6\%$$

Кінцевий результат виміру:

$$U = (240.0 \pm 1.5) B; \quad \text{або} \quad U = (240 \pm 2) B,$$

$$\varepsilon = 0.6\%$$

Для підвищення точності вимірювань потрібно підбирати такий електровимірювальний прилад, щоб при вимірюванні стрілка його відхилилась майже на всю шкалу. Але, звичайно, стрілка не повинна виходити за межі шкали приладу, бо це може привести до його псування. Якщо використовується багатомежовий прилад, то спочатку його треба включити на найбільшу межу, щоб покази приладу були мінімальними. Після підключення кола, перемикач меж ставиться в таке положення, щоб стрілка знаходилась в другій половині шкали.

Крім того, при виборі електровимірювального приладу треба враховувати опір приладу. Включення приладу не повинно приводити до порушення режиму роботи електричного кола. Так амперметр, який включається в коло послідовно, повинен мати малий опір у порівнянні з іншими частинами кола. Вольтметр включається паралельно ділянці кола, тому повинен мати опір великий в порівнянні з опором ділянки.

Важливим елементом електричних кіл являються реостати та магазини опорів.

Для плавної зміни опорів використовують реостат з ковзаючим контактом. Він складається з фарфорового циліндра (іноді мармурового бруска), закріпленого на двох підставках. На циліндр чи брусок намотаний «голий» дріт або стрічка з тугоплавкого провідника з малим температурним коефіцієнтом опорів (манганін, константан).

Кінці дроту виведені до двох ізольованих клем. Вздовж обмотки розміщений металевий стержень, ізольований від підставок; на одному його кінці є клема. Вздовж стержня переміщується ковзний контакт з ізольованою ручкою, сталеві пружини якого щільно прилягають до обмотки.

Магазин опорів представляє собою набір котушок дроту з певним опором, які можуть перемикатись, тобто в електричне коло включається той чи інший калібрований опір. Конструкція магазину



опорів може бути різною, але найчастіше використовуються декадні магазини опорів. У такому магазині кожна котушка має опір  $10^n$  Ом, кожен перемикач має 10 положень. Опір, який набирається кожним перемикачем, дорівнює добутку показу перемикача на відповідний множник, а загальний опір магазину дорівнює сумі опорів, набраних всіма перемикачами.

Похибка опору магазину опорів визначається його класом точності. **Клас точності магазину опорів** - це відносна похибка, виражена у відсотках. **Відносна похибка магазину опорів** не залежить від величини опору. Тому **абсолютна похибка**  $\Delta R = \varepsilon R$  збільшується зі збільшенням величини вимірювального опору.



## В лабораторії фізико-хімічних та фізичних методів досліджень властивостей будівельних матеріалів



### Дворкін Леонід Йосипович

Заслужений діяч науки і техніки України, академік Академії будівництва та член кореспондент Академії технологічних наук України, професор, почесний професор Національного ордена Дружби народів університету водного господарства та природокористування та Придніпровської державної академії будівництва і архітектури, член Нью-Йоркської академії наук, професор, д.т.н., завідувач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства, факультету будівництва та архітектури університету. До творчих здобутків належать 20 монографій, 33 підручника і посібника, 7 довідників, понад 70 авторських свідоцтв і патентів на винаходи в СРСР та Україні, Людина року 2004 і 2007.



Професор, д.т.н. Дворкін Л.Й. і доцент, к.х.н. Скрипник І.Г.



Професор, д.т.н. **Дворкін О.Л.** «Людина року- 2007» і доцент, к.т.н. **Лушнікова Н.В.**



Професор, д.т.н. **Дворкін О.Л.** і доцент, к.т.н. **Гарніцький Ю.В.**



Доцент, к.т.н. **Гарніцький Ю.В.** – відповідальний за навчально-методичну роботу, заступник декана ФБА з науково-дослідної роботи



Доцент, к.т.н. **Шестаков В.Л.** – ветеран кафедри



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Доцент, к.т.н. **Мироненко А.В.** – керівник ряду секцій Рівненської МАН учнівської молоді та навчально-науково-виробничого комплексу «Технолог»



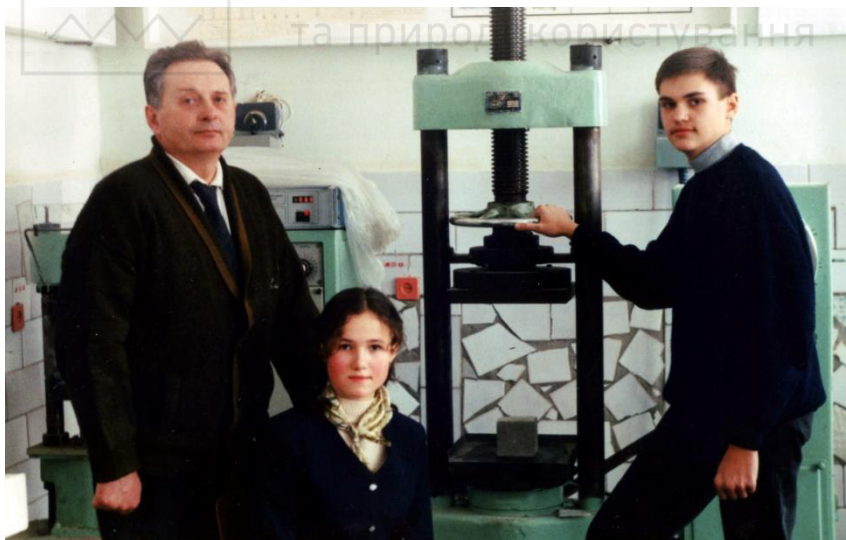
Доцент к.т.н. **Іжук О.О.** – відповідальний за дизайн і оформлення лабораторій кафедри, за навчальну практику студентів та куратор академічної групи студентів



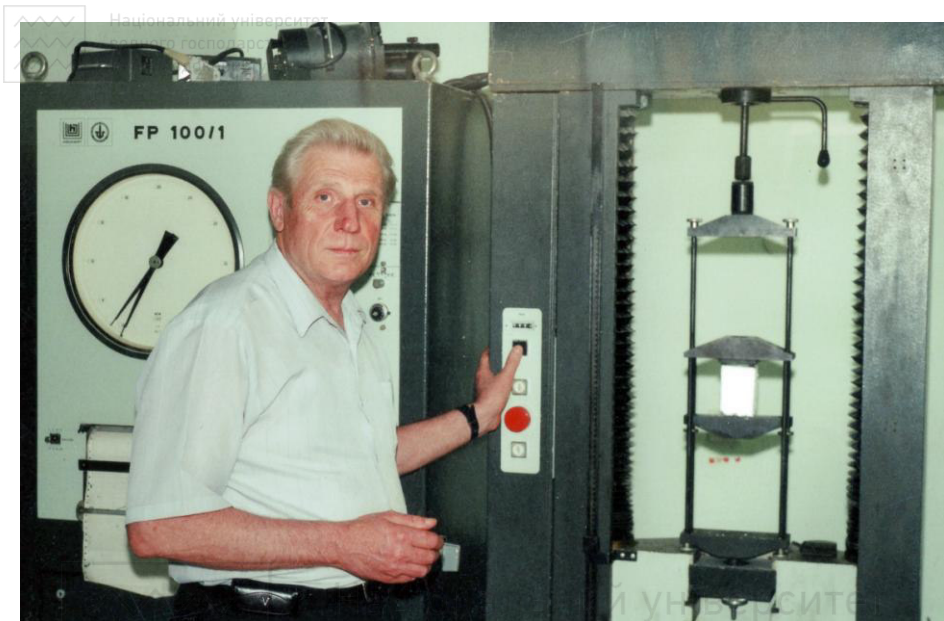
Національний університет  
природознавства  
та природокористування



Доцент, к.х.н. **Скрипник І.Г.** і доцент, к.т.н. **Ішук О.О.** та «Найуспішніший студент Рівненщини» **Ігор Шарабура**. «Студент року – 2007, 2008, 2009» в номінації «Комп'ютерний геній»



Доцент, к.т.н. **Мироненко А.В.** із учнями комплексу «Технолог», серед яких **Максим Кундос**



Доцент, к.т.н. **Безусяк О.В.** – відповідальний за випробувальну лабораторію якості будівельних матеріалів, дипломне проектування студентів



Доцент, к.т.н. **Безусяк О.В.**





Доцент, к.т.н. **Житковський В.В.** – відповідальний за науково-дослідну роботу та щорічний науково-практичний семінар, за виробничу практику студентів та куратор академічної групи студентів



Доцент, к.т.н. **Лушнікова Н.В.** – відповідальна за методичну роботу, куратор академічної групи студентів



Доцент, к.т.н. **Бордюженко О.М.** із студенткою – відповідальний за підготовку студентів до щорічної фахової олімпіади та сайт кафедри, координатор європейської кредитно-трансферної системи, куратор академічної групи студентів, профгрупорг



Старший викладач **Ніхаєва Л.І.** – відповідальна за працевлаштування випускників та старший куратор студентів спеціальності **ТБКВіМ**, секретар кафедри і громадський інспектор з охорони праці



Старший викладач **Тімофєєва Л.В.** - ветеран кафедри



Завідувач лабораторіями кафедри **Зінченко С.В.** – відповідальний за техніку безпеки і охорону праці на кафедрі



Асистент к.т.н. **Поліщук-Герасимчук Т.О.**



**Віталій Івасюк** – аспірант



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



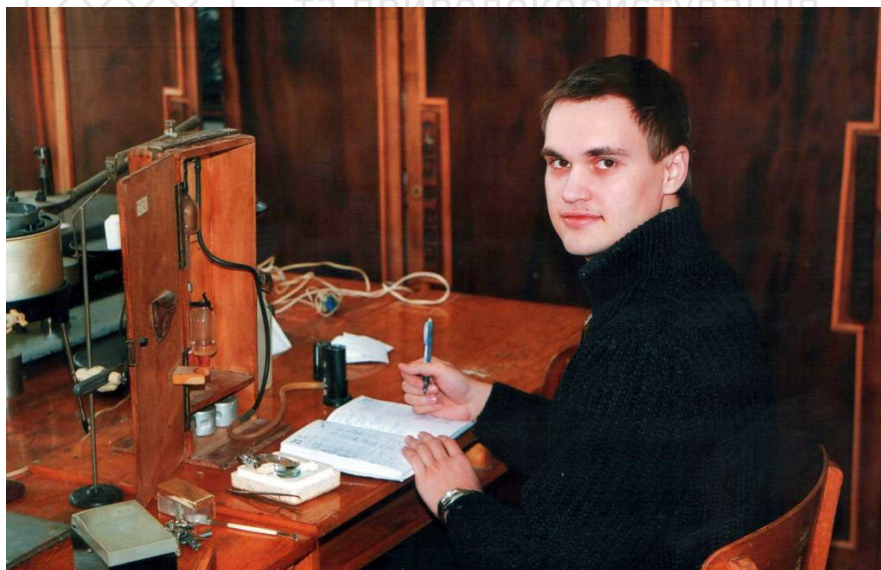
**Ірина Ковалик** – аспірант  
водного господарства



**Михайло Борисюк** – старший лаборант



Старший лаборант **Тетяна Ніхаєва** із аспірантом **Максимом Кундосом**



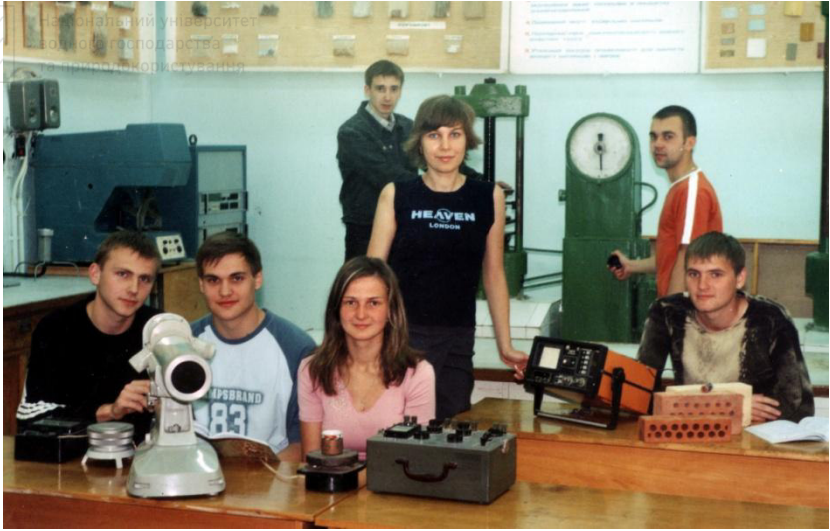
Аспірант **Максим Кундос**



**Руслан Кулакевич** – аспірант



**Наталія Поштова** – старший лаборант



**Поліщук-Герасимчук і Максим Кундос із одногрупниками**



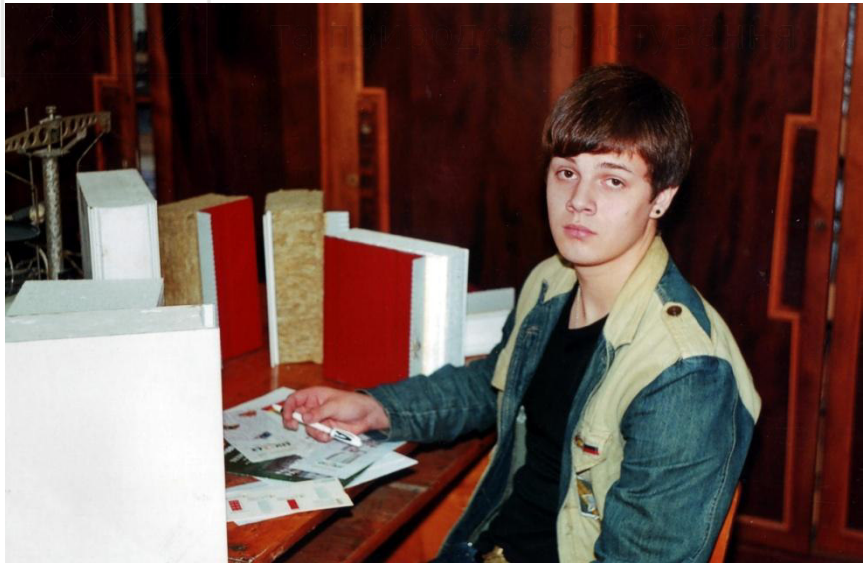
**Доцент, к.т.н. Лушнікова Н.В. і аспірант Віталій Івасюк**





Студентка Людмила Мамай

Національний університет  
водного господарства



Єгор Орещук «Студент року – 2007; 2008» в номінації «Науковець»



Студентка **Ірина Шимко**



Студентка **Оксана Перова**



Студентки **Ірина Шимко** і **Оксана Перова**



Студентка **Олена Дубчак**



Студенти **Олександр Вовк і Володимир Гайдук**



Доцент, к.т.н. **Іщук О.О.**



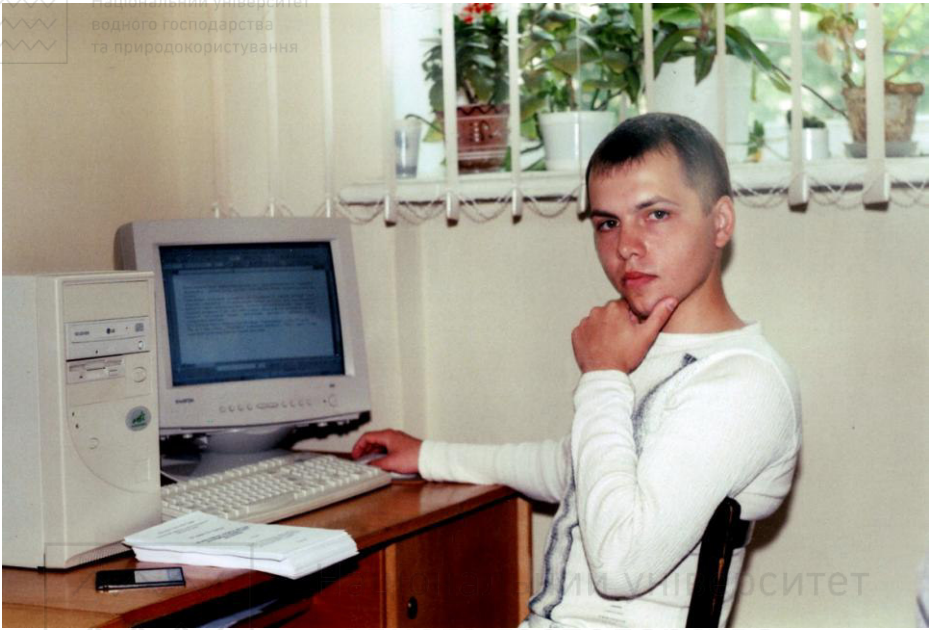
Студент Єгор Орешук із учнем Віталієм Савчуком



Студентка Олена Дубчак



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Студент Сергій Харчишин



Студент Ігор Якимчук



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



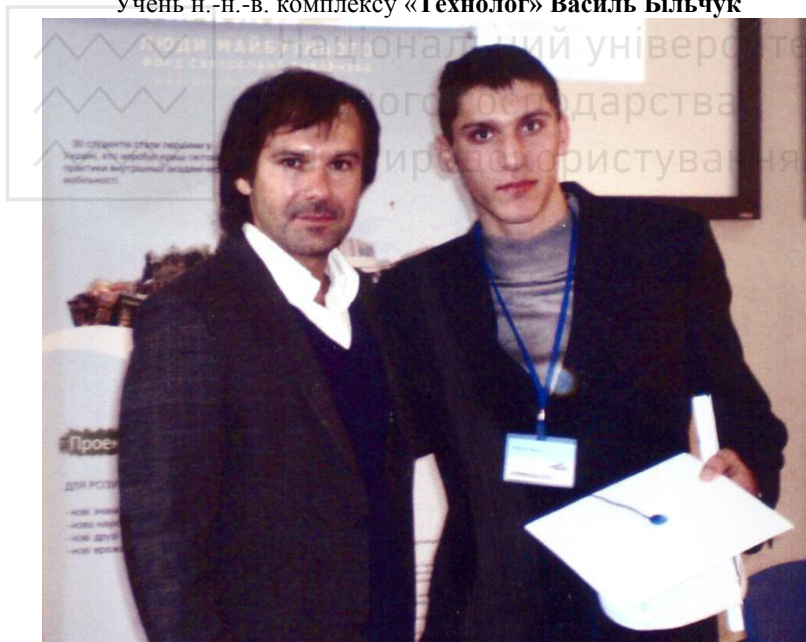
Доцент, к.х.н. **Скрипник І.Г.**, головний конструктор Здобунівського МП«Квант» **Талашок О.І.** і учень комплексу «Технолог» **Василь Більчук** під час творчої зустрічі



Доцент, к.х.н. **Скрипник І.Г.** і учень н.-н.-в. комплексу «Технолог» **Василь Більчук** в лабораторії кафедри



Учень н.-н.-в. комплексу «Технолог» Василь Білчук



Студент Василь Білчук із Святославом Вакарчуком, переможець конкурсу фонду Святослава Вакарчука «Люди майбутнього» в проєкті «Освіта країною - 2010» (Київ)





Студентка **Антоніна Селях** представляє матеріали своєї роботи на Всеукраїнському щорічному науково-практичному семінарі «**Структура, властивості та склад бетону**»



Учасники семінару



Національний університет водного господарства та природокористування



Студентка **Олена Дубчак** захищає дипломний проект



Студентка **Надія Кушнер** захищає дипломний проект



Державна екзаменаційна комісія по захисту дипломних робіт і проєктів



Під час захисту дипломних робіт і проєктів **Оксана Перова** та **Сергій Харчишин** із одногрупниками



Завідувачі кафедрами академіки, д.т.н., професори **Дворкін Л.Й.** і **Бабич Є.М.** та декан факультету будівництва і архітектури, член-кореспондент Академії будівництва України, к.т.н., професор **Масюк Г.Х.** в президії під час урочистого вручення випускникам дипломів фахівців, здобувших вищу освіту в університеті і направлених на роботу



Із поздоровленням і побажанням виступає професор, д.т.н. **Дворкін Л.Й.**



Дипломи і направлення на роботу вручає професор, к.т.н. **Масюк Г.Х.**



Дипломи і направлення на роботу вручає професор, д.т.н. **Бабич Є.М.**

# Трибуна Студента

Четвер,  
25 жовтня  
2007 року  
№ 10(2066)  
Газета виходить  
з 1930 року

Національний університет водного господарства та природокористування

## Співпраця МАН і університету приносьть свої плоди

На базі оздоровчо-спортивного комплексу Київського національного університету ім. Т.Шевченка, що в с. Берегово (АР Крим), відбулася вже традиційна Міжнародна школа-семинар на тему: „Спектроскопія молекул і кристалів”. Організатори заходу

Міністерство освіти і науки, Мала академія наук учнівської молоді та Київський національний університет ім. Тараса Шевченка.

У семінарі взяли участь 170 учасників з понад 10 країн світу. Рівне представляли двоє одинадцятикласників - Олександр Мороз з Рівненського ліцею-інтернату, Максим Колодежний з Гошанської районної гімназії та

десятикласник ліцею при Рівненському державному гуманітарному університету Андрій Шахрайчук.

Вони доповіли про результати своїх науково-дослідницьких робіт, послушали лекцій та побували на практичних заняттях провідних українських та зарубіжних вчених.

Примітно те, що серед десяти призерів семінару є учні науково-технічного відділення Рівненської МАН учнівської молоді та навчально-науково-виробничого комплексу „Технолог”, що діє на кафедрі технології будівельних виробів і

матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування. Це Олександр Мороз та Максим

Колодежний. Вони виступили з доповідями „Застосування емсійного спектрального аналізу та експрес-методу термо-ЕРС для визначення вмісту кремнію та вуглецю в сталях, чавунах і виробих з них” та „Синтез і дослідження будови карбамідно-



формальдегідних сполук”, які були підготовлені під керівництвом кандидата хімічних наук, доцента кафедри технології будівельних

окрім грамот, вони отримали запрошення вступити на фізичний факультет Київського національного університету ім. Т.Шевченка від декана цього факультету.

До речі, навчально-науково-виробничий комплекс „Технолог” при кафедрі ТВВіМ НУВГП створений у 1994 році. І відкрили його для того, щоб виявити обдарованих дітей з середніх шкіл, гімназій, ліцеїв та профтехучилищ нашої області. Тут, у процесі занять, учні отримують вміння працювати зі спеціальною літературою, проводити дослідження, опрацьовувати отримані результати, готувати реферати, огляди, доповіді. А ще — беруть участь у

Всеукраїнських конкурсах. Так, за роки існування комплексу 33 найкращих його вихованця вступили на спеціальність технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів за співбесідою на бюджетну форму навчання.

Наразі у навчально-виробничому комплексі діє три секції: „Промислове, технологічне обладнання та технології”, „Хімія” (за напрямом технологія будівельних матеріалів) та „Техніко-технологічна” (за напрямком цільової розробки для



виробів і матеріалознавства **Ігоря Скрипника.**

За свої науково-дослідницькі роботи, наполегливість та терпіння,

промислових підприємств). Всього ж цього року в ННВК „Технолог” навчається біля 30 учнів.

**Наталія ПАРХОМЧУК**



## Нагорода для старанних - перемога

Наприкінці листопада у Рівному завершився конкурс „Студент року – 2007”, який уже другий рік поспіль проводить Рівненська міська молодіжна громадська організація „Фундація регіональних ініціатив”. Конкурс відбувався в рамках широкомасштабного проекту „Дієві органи студентського самоврядування – впливова студентська громада”, метою якого є сприяти формуванню сучасної молодіжної еліти, виявленню та підтримці талановитої молоді у різних сферах.

Цього разу у конкурсі брали участь 97 учасників з дев'яти вищих навчальних закладів Рівного та Рівненської області. Студенти змагалися у восьми номінаціях: спортсмен, митець, журналіст, громадський діяч, комп'ютерний геній, підприємець, науковець, волонтер.

Компетентне журі обрало по три фіналісти в кожній номінації, але лише один із них отримав право називатися переможцем. Гідне місце серед студентів року посіли і вихованці Національного університету водного господарства та природокористування.

Так, у номінації „студент-науковець” переміг **Стор Орещук**, що навчається на другому курсі факультету водного господарства за спеціальністю водопостачання та водовідведення. Варто зазначити, що це не перша перемога здібного юнака. Він почав займатися науковою роботою ще з 9-го класу, навчаючись у Рівненському НВО „Колегіум” та у секції „Цільові розробки за замовленням наукових установ та промислових підприємств” техніко-технологічного відділення Рівненського міського центру творчості учнівської молоді. А продовжив свої дослідження у секції „Промислове технологічне обладнання та технології” науково-технічного відділення Рівненської Малої академії наук учнівської молоді. Його наставниками є кандидат хімічних наук, доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП І.Г.

**Скрипник** та директор Рівненської МАН О.А. Андрєєв. Як розповів Ігор Гаврилович, Стор Орещук активно та результативно займається науково-дослідницькою роботою, є призером міського конкурсу-захисту науково-дослідницьких робіт МАН України. За винахідницьку роботу



нагороджений дипломом Президії Ради Рівненської обласної організації товариства винахідників і рационалізаторів. Крім цього, він має патент на корисну модель та дві опубліковані праці, ще чотири подано та прийнято до опублікування. Стор не зупиняється на досягнутому і продовжує науково-дослідну роботу в лабораторіях фізико-хімічних і фізичних методів дослідження матеріалів та технологій полімерних будівельних матеріалів університету.



У номінації „студент-комп'ютерний геній” переміг Ігор **Шарабура**. Ігор – першокурсник факультету будівництва та архітектури НУВГП, навчається на спеціальності технологія будівельних

конструкцій, виробів і матеріалів. Ще до вступу в університет він вже має два патенти України на корисну модель, 10 друкованих наукових праць, 29 відзнак. Тепер до цих перемог додається ще й перемога на конкурсі „Студент року – 2007”. Ігор планує досягти нових вершин і надалі активно займається науково-дослідною та пошуковою роботою.

Обидва наші переможці є вихованцями навчально-науково-виробничого комплексу „Технолог”. Цей комплекс діє на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП. Він був створений у 1994 році для того, щоб виявити обдарованих дітей з різних навчальних закладів Рівного та Рівненської області. У ННВК „Технолог” студенти набувають навичок працювати з спеціалізованою літературою, проводити дослідження, готувати реферати, доповіді, огляди. Нині у навчально-науково-виробничому комплексі „Технолог” діє чотири секції – „Промислове, технологічне обладнання та технології”, „Хімія” (за напрямком технологія будівельних матеріалів), „Техніко-технологічна” (за напрямком цільові розробки за замовленням наукових установ та промислових підприємств) і „Сільськогосподарська техніка, обладнання та технології”. До речі, Стор та Ігор були нагороджені нагрудними відзнаками „МАН”, „Технолог” і „ТБВМ” та медалями ННВК „Технолог” ім. Гулі Королювої.

Однак, це далеко не всі перемогі студентів „водного”. Четверокурсник механіко-енергетичного факультету Віталій Бондарчук переміг у номінації „студент-спортсмен”. Крім головних переможців, є ще й лауреати. Лауреатом у номінації „студент-науковець” стала Оксана Драганчук, студентка факультету екології та природокористування, у номінації „студент-журналіст” – Наталія Гнеушева, студентка факультету менеджменту.

**Жанна ЖОВТЕНКО**  
На фото: Ігор Шарабура (вгорі)  
Стор Орещук (внизу)



водного господарства та природоохоронного

## Водники – студенти року

Завершився обласний конкурс «Студент року – 2008», який організувала «Фундація регіональних ініціатив».

Переможцями у номінації «студент-науковець» стали двоє студентів НУВГП.

Так, **Сгор Орещук**, третьокурсник факультету водного господарства, переміг у номінації «студент-науковець», а **Василь Більчук**, студент першого курсу факультету будівництва та архітектури, став лауреатом у цій же номінації.

До речі, минулого року **Сгор Орещук** також став переможцем у цій номінації. Злібний юнак почав займатися науковою роботою ще з 9-го класу, навчаючись у Рівненському НВО «Колетум» та у секції «Цільові розробки за замовленням наукових установ та промислових підприємств» техніко-технологічного відділення



**Сгор Орещук**

товариства винахідників і раціоналізаторів, золотою медаллю ННВК «Технолог» ім. Гулі Корольової. Має патент на корисну модель та десять опублікованих праць.

Василь Більчук, хоча лише першокурсник, але вже теж має свої

«студент комп'ютерний геній». Ще до вступу в університет він вже мав два патенти України на корисну модель, 10 друкованих наукових праць, 29 візків. Ігор активно займається науково-дослідною та пошуковою роботою.

Наставниками **Сгора Орещука**, **Василя Більчука** та **Ігора Шарабури** є кандидат хімічних наук, доцент кафедри технологій будівельних виробів і

матеріалознавства **Г.І. Скрипник** та директор Рівненської МАН **О.А. Андрєєв**. Наші переможці – вихованці навчально-науково-виробничого комплексу «Технолог». Цей комплекс діє на кафедрі технологій будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП у ННВК «Технолог» учні середніх навчальних



**Василь Більчук та Г.І. Скрипник**

Рівненського міського центру творчості учнівської молоді. А продовжив свої дослідження у секції «Промислове технологічне обладнання та технології» науково-технічного відділення Рівненської Малої академії наук учнівської молоді. Вже понад чотири роки **Сгор** займається експериментальними та науково-аналітичними дослідженнями. В основному його роботи стосуються плазмодії, гідрофобізації неорганічних солей та добрив, портландцементу, нанотехнологій, утилізації гідроксидів заліза питної води тощо. **Сгор** – призер міського конкурсу-захисту науково-дослідницьких робіт МАН України. За винахідницьку роботу нагороджений дипломом Президії Ради Рівненської області організації



досягнення. Він із золотою медаллю закінчив Здовбицьку школу. Вчився у Рівненській Малій академії наук учнівської молоді. Результати своїх науково-дослідних робіт представив у доповідях, опублікованих і поданих до опублікування статей та заявках на винаходи. Крім цього, **Василь** має диплом II ступеня Всеукраїнської олімпіади з географії, диплом переможця другого етапу Всеукраїнського конкурсу-захисту науково-дослідницьких робіт учнів-членів Малої академії наук України, срібну медаль ННВК «Технолог» ім. Гулі Корольової.

Переможцем у номінації «найуспішніший студент Рівненщини» став студент другого курсу факультету будівництва і архітектури НУВГП **Ігор Шарабура**, який набрав 148 sms-голосів. **Ігор** теж вже має свої досягнення. Так, минулого року він переміг у номінації



**Ігор Шарабура**

закладів та студенти набувають навичок працювати зі спеціалізованою літературою, проводити дослідження, готувати реферати, доповіді, огляди. Комплекс створений у 1994 році для того, щоб виявляти обдарованих дітей з різних навчальних закладів Рівного та Рівненської області. Нині у навчально-науково-виробничому комплексі «Технолог» діє чотири секції – «Промислове, технологічне обладнання та технології», «Хімія» (за напрямком технологія будівельних матеріалів), «Техніко-технологічна» (за напрямком цільові розробки на замовлення наукових установ та промислових підприємств) і «Сільськогосподарська техніка, обладнання та технології».

**Жанна ЖОВТЕНКО**





## Василь Більчук та Ігор Шарабура – студенти року

Василь Більчук став переможцем у номінації "студент-науковець", а Ігор Шарабура – лауреатом у номінації "студент-комп'ютерний геній" обласного конкурсу "Студент року – 2009".



**Василь Більчук** (на фото) навчається на другому курсі факультету будівництва та архітектури і вже вдруге бере участь у цьому конкурсі. Минулого року він теж став переможцем у номінації "студент-науковець". Василь вже має чимало досягнень. Із золотою медаллю закінчив Здобитицьку школу. Вчився у Рівненській Малій академії наук учнівської молоді. Результати своїх науково-дослідних робіт він представив у доповідях, опублікованих і поданих до опублікування статей та заявок на винаходи. Крім цього, студент має диплом II ступеня Всеукраїнської олімпіади з географії, диплом переможця другого етапу Всеукраїнського конкурсу-захисту

науково-дослідницьких робіт учнів-членів Малої академії наук України, срібну медаль ННВК «Технолог» ім. Гулі Корольової.



**Ігор Шарабура** (на фото) - третьокурсник факультету будівництва та архітектури. У конкурсі бере участь ще з першого курсу і вже має чимало нагород.

Так, у 2007 році він переміг у номінації "студент-комп'ютерний геній", а 2008 став "найуспішнішим студентом Рівненщини". Ігор ще до вступу в університет займався науково-дослідною та пошуковою роботою. Він має два патенти України на корисну модель, 10 друкованих наукових праць, 29 визнач.

Наставниками Василя Більчука

та Ігора Шарабури є кандидат хімічних наук, доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства **І.Г.Скрипник** та директор Рівненської МАН **О.А.Андрєєв**. Наші переможці - вихованці навчально-науково-виробничого комплексу "Технолог". Цей комплекс діє на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП. У ННВК «Технолог» учні середніх навчальних закладів та студенти набувають навичок працевлаштування зі спеціалізованою літературою, проводять дослідження, готувати реферати, доповіді, огляди. Комплекс створений у 1994 році для того, щоб виявляли обдарованих дітей з різних навчальних закладів Рівного та Рівненської області. Нині тут діє чотири секції – "Промисловство, технологічне обладнання та технології", "Хімія" (за напрямком - технологія будівельних матеріалів), "Техніко-технологічна" (за напрямком - цільові розробки на замовлення наукових установ та промислових підприємств) і "Сільськогосподарська техніка, обладнання та технології".

**Довідка "Трибуна студента"**

Кращих студентів визначають у Рівному вже вчотверте. Цього року на конкурс було подано майже 300 анкет. Серед них – молоді науковці, громадські діячі, спортсмени, журналісти. Організатори конкурсу: Рівненська обласна державна адміністрація, Рівненське міське управління у справах сім'ї, молоді та спорту та Фондація регіональних ініціатив.

**Жанна ЖОВТЕНКО**

## Про креативність у рік креативності

У Польщі відбулася XII міжнародна наукова конференція „Креативність і підприємливість як фактор підвищення якості та організації виробництва”, яку традиційно організовує Університет Марії Кюрі-Скłodовської (<http://www.umcs.lublin.pl>, м. Люблін) в м. Казімерж Дольни (<http://www.kazimierzdolny.pl>). Тематика конференції відповідає проголошеному ЄС 2009 року як року креативності та інноваційності.

У конференції взяли участь близько 200 учасників з Польщі, Великої Британії, Німеччини, Росії та України. Серед них, згідно з угодою про наукову співпрацю між університетами та на запрошення організаторів конференції, і представники НУВГП – доцент кафедри економічної теорії Дмитро Нікітенко та асистент кафедри економіки підприємств Марина Аверкіна, які виступали з науковими доповідями.



Як розповів Дмитро Нікітенко, на пленарному засіданні конференції були заслухані виступи польської наукової еліти (prof. dr hab. Elżbieta Skrzypczak, prof. dr hab. inż. Romuald Kolman, prof. dr hab. Tadeusz Wawak та інші), в яких висвітлювалася роль креативності і підприємливості у створенні інновацій та підвищенні якості у виробництві й вищій школі.

Другий та третій день були присвячені сесійним засіданням, де розглядалися наступні теми:

знання як чинник інноваційності та креативності; людина як джерело креативності; креативність та інноваційність в практиці; методи управління підприємством в умовах ризику; інтелектуальне підприємництво та управлінські талантами; підприємливість та їх наслідки для практики.

**На фото: рівненські науковці Д. Нікітенко і М. Аверкіна з польським професором Е. Скішпек (посередині).**

Національний  
водногосподарський  
та природокористувацький

## Василь Більчук апробує практику студентської мобільності

Студент НУВГП Василь Більчук став переможцем конкурсу «Освіта Країною», організованого фондом Святослава Вакарчука «Люди Майбутнього», та отримав грант на навчання у Національній університеті «Львівська політехніка».

Тепер Василь опановуватиме науки на факультеті будівництва та інженерії доквілля університету «Львівська політехніка». Протягом навчання він ще й отримуватиме стипендію.

Василь Більчук навчається на другому курсі факультету будівництва та архітектури Національного університету водного господарства та природокористування. Він – переможець у номінації «студент-науковець» загальнонаціонального конкурсу «Студент року – 2009». До речі, саме після перемоги у цьому конкурсі йому запропонували спробувати свої сили у конкурсі «Освіта Країною».

Окрім цього, злітний юнак має й багато інших звершень: у 2008 році він теж став переможцем у номінації «студент-науковець» конкурсу «Студент року – 2008», має диплом II ступеня Всеукраїнської олімпіади з географії, диплом переможця другого етапу Всеукраїнського конкурсу захисту науково-дослідницьких робіт учнів-членів Малої академії наук України, срібну медаль ННБК «Технолог» ім. Гулі Корольової, а ще



із золотою медаллю закінчив Здобвицьку школу. Ще до вступу в університет Василь активно займався науково-дослідною роботою у Рівненській Малій академії наук учнівської молоді і навчально-науково-виробничому комплексі «Технолог» при кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП.

Результати своїх науково-дослідних робіт представив у доповідях, опублікованих і поданих до опублікування статтях та заявках на винаходи. Так, Василь вже опублікував чотири статті у журналі «Енергозбереження Полісся», дві

статті у збірнику наукових праць «Вісник НУВГП», у науково-технічному і виробничому журналі «Бетон и железобетон в Украине», у журналі «Екологія». А ще подав дві заявки на хорисну модель у Державний департамент інтелектуальної власності України.

Василь займається не лише науково-дослідною роботою, він ще й брав участь у змаганнях з футболу, серед академічних груп першого курсу факультету його команда посіла перше командне місце.

Наставниками Василя Більчука є кандидат хімічних наук, доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства І.Г.Скрипник та директор Рівненської МАН О.А.Андрєв.

### Довідка

У конкурсі «Освіта Країною» взяли участь понад 150 студентів з різних навчальних закладів України. Лише 30 з них стали переможцями і тепер протягом двох місяців навчатимуться у іншому навчальному закладі країни. Адже мета проєкту – адаптація до українських реалій кращих світових освітніх практик, надання можливості українським студентам повчитись в іншому видіту освітньому закладі, де вони отримують фахівців аналогічної спеціальності, із зарахуванням навчальних дисциплін (кредитів) та модулів.

Жанна ЖОВТЕНКО

## Від мовної свідомості – до національної

21 лютого у світі відзначають Міжнародний день рідної мови. Історія цього свята – яскраве свідчення того, як із мовної свідомості народу виростає національна свідомість. У 1947 р. після розпаду Британської Індії постала держава Пакистан у складі двох етнічно й мовно відмінних земель: на Заході переважала урду, на Сході – бенгалі. Єдиною державною мовою було проголошено урду, хоча її розуміли лише 2% бенгалців.

21 лютого 1952 р. під час розгону мирної демонстрації на підтримку бенгальської мови загинуло п'ять студентів, які хотіли говорити рідною мовою на своїй землі. Кривава подія переросла в «Мовний рух» і 1956 р. бенгальська мова набула державного статусу. Мовний рух дав початок потужному національному рухові, що призвело до утворення 1971 р. незалежної держави Бангладеш. На пошану загинувих студентів 21 лютого за рішенням ЮНЕСКО світ відзначає Міжнародний день рідної мови.



Дню рідної мови було присвячене відкрите засідання літературної студії, що працює при кафедрі українознавства, педагогіки і психології, у якому взяли участь усі небайдужі до рідного слова. Перед студентами виступили завідувач кафедри Л.Д.Малевиц, ст. викладач М.М.Дзюба. Гостю «Поетичного дересьля» була член Національної спілки письменників, кандидат

філософії Стефанія Українець, яка представила свою нову збірку «Відкриваючі води», відповіла на численні запитання студентів, які зацікавлено ознайомилися з творчістю поетеси. Як справжній майстер рідного слова С.Українець дала цінні поради літераторам-початківцям.

У методичному кабінеті кафедри розгорнуто художню виставку «Мова – оселя буття духу народу». У представлених роботах студенти зробили спробу осмислити роль мови в житті суспільства і в житті окремої людини (роботи «Спочатку було слово...», «Мова – зодчий народу, народ – зодчий мови», «Розкіш людського спілкування»), історію української мови («Нашій єсеністості – тисячліт!», «Дорога до світла») та її сучасні проблеми («Суржик – мова убогих»).

Леся МАЛЕВИЦ,  
завідувач кафедри  
українознавства, педагогіки і  
психології

## та при Спілка ректорів внесла свої пропозиції до умов прийому у ВНЗ

Ректор Національного університету водного господарства та природокористування, голова ради ректорів вищих навчальних закладів Рівненщини Василь Гурин провів прес-конференцію для місцевих засобів масової інформації щодо організації прийому до вищих навчальних закладів України у 2010 році.

Він розповів про збори Спілки ректорів вищих навчальних закладів України, які днями відбулися в Києві. У захолі взяли участь віце-прем'єр-міністр Володимир Семіноженко, міністр освіти і науки Дмитро Табачник, секретар комітету Верховної Ради України з питань науки і освіти Катерина Самойлик, президент Національної академії педагогічних наук Василь Кремень, голова Спілки ректорів ВНЗ, ректор КНУ імені Т.Шевченка Леонід Губерський, голова ЦК профспілки працівників освіти і науки Леонід Сачок, представники адміністрації Президента України та Секретаріату Кабінету Міністрів, ректори вищих навчальних закладів, представники прийому до вищих навчальних закладів у 2010 році.

Зміни стосуються, насамперед, розділів VI (Порядок прийому заяв та документів для вступу до вищих навчальних закладів), VII (Організація і проведення конкурсу) та VIII (Допуск до участі у конкурсі за результатами вступних екзаменів на основі повної загальної освіти).

Зокрема, пропонується внести такі зміни:

– Вступники на заочну, дистанційну та вечірню форми навчання, які здобули повну загальну

середню освіту до 2008 року, можуть брати участь у конкурсному відборі на навчання на підставі сертифіката Українського центру оцінювання якості освіти або результатів вступних

правилами прийому до вищого навчального закладу, нижче 124 балів з кожного предмету за умови, якщо кількість балів з профільних загальноосвітніх предметів (предмету), визначених правилами прийому до вищого навчального закладу, становить не нижче 180 балів з кожного предмету.

– Для конкурсної вибори осіб, які на основі повної загальної середньої освіти вступають для здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня молодшого спеціаліста, бакалавра (спеціаліста, магістра медичного та ветеринарно-медичного спрямувань), враховується середній бал документа про повну



випробувань, що проводиться приймальною комісією вищого навчального закладу з конкурсних предметів. Вступники мають право подавати сертифікати Українського центру оцінювання якості освіти, видані у 2008, 2009 або у 2010 році.

– Вступник може подати заяву та документи не більше, ніж до п'яти вищих навчальних закладів України та не більше, ніж на три напрями підготовки (спеціальності) у кожному з них, про що робиться відмітка на зворотному боці сертифіката Українського центру оцінювання якості освіти, засвідчена печаткою приймальної комісії вищого навчального закладу.

– Вищий навчальний заклад за рішенням приймальної комісії може допустити до участі у конкурсному відборі для вступу на навчання вступника, який подає сертифікат Українського центру оцінювання якості освіти, кількість балів якого з непрофільних загальноосвітніх предметів (предмету), визначених

загальною середньою освітою за 200-бальною шкалою, розробленою Українським центром оцінювання якості освіти, шляхом додавання до суми балів сертифіката з конкурсних предметів (результатів вступних випробувань).

– Для осіб, які не атестовані з української мови та літератури, приймальна комісія з урахуванням наявності педагогічних і науково-педагогічних кадрів може встановлювати вступний екзамен з тієї мови, оцінки з якої виставлені в документі про освітній (освітньо-кваліфікаційний) рівень.

– Право брати участь у конкурсі за результатами зовнішнього незалежного оцінювання або за результатами вступних випробувань з конкурсних предметів у вищому навчальному закладі за їх вибором при вступі на навчання без відриву від виробництва мають особи, які отримали повну загальну середню освіту у 2007 році і раніше.

Анна ЄЗЕРСЬКА

## Абсолютний переможець



Петро Артемчук, вихованець Ігора Скрипника, доцента кафедри технології будівельних виробів та матеріалознавства НУВГП, став абсолютним переможцем Всеукраїнського конкурсу юних рационалізаторів та винахідників "Природа-людина-виробничо-екологія" (секція "Фізика"). Десятикласник Рівненського міського природничо-математичного ліцею "Елітар" отримав це високе звання за авторську роботу на тему "Експрес-метод та прилад для визначення ефективності фільтр-осаджувачів

феромангітних домішок у рідинах, газів і силічних матеріалах". А його наставник Ігор Скрипник відзначений подякою.

Окрім цього, Петро Артемчук має чимало й інших перемог. Він посів друге місце на Всеукраїнському конкурсі Intel LEKO – Україна, має патент та дві заявки на винаходи, опублікував три статті у журналі "Енергозбереження Полісся" тощо.

Отож, сподіваємося, незабаром наш університет отримає ще одного талановитого студента.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Навчально-методичне видання

*Ігор Гаврилович Скрипник*

## **Фізико-хімічні методи досліджень будівельних матеріалів**

**Лабораторний практикум навчально-методичного забезпечення  
дисципліни**

*Друкується в авторській редакції*

Підписано до друку 7.10.2010 р. Формат 60×84 1/16.

Папір друкарський №1. Гарнітура Times. Друк різнографічний.

Ум.-друк арк. 11 Обл.-вид. арк. \_\_\_\_\_

**Тираж 15 прим. Зам. № \_\_\_\_\_**  
**Віддруковано ТМ «ДОЦЕНТ»**  
**33028, Рівне, вул. Соборна, 17 (ЦУМ)**  
**тел. 45-44-45**  
**www.docent.rv.ua**

Редакція, фото і дизайн Ігоря Скрипника  
Дизайн, комп'ютерні графіка та набір Олександра Вовка і Василя Більчука  
Обробка фотографій Олександра Вовка та Ігоря Шарабури

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного  
реєстру видавців, виготовників і розповсюджувачів видавничої*

*продукції РВ №49 від 29.05.2009 р.*