
**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

Д.Л.Череднік, С.О. Даньшева, Ю.Є.Крот, Г.М.Подус

ФІЗИКА В БУДІВНИЦТВІ

**Навчальний посібник
до самостійного вивчення курсу**

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів*

**Харків
Фірма «БУРУН і К»
2014**

УДК: 691:620.179

ББК: 22.3я73

* **

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів лист № 1/11-13134 від 19.08.13.

Рецензенти:

О.М. Петченко, доктор фіз.-мат. наук, професор, зав.кафедрою фізики ХНАМГ

М.К. Подберезський, доктор педагогічних наук, директор навчально-дослідного інституту педагогіки та психології ХНПУ ім. Г.С. Сковороди

І.Ф. Омеляненко, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики ХНУБА

Д.Л. Череднік, С.О. Даньшева, Ю.Є. Крот, Г.М. Подус

* ** **Фізика в будівництві:** Навчальний посібник. – Харків: «БУРУН і К», 2014. – 136 с.

ISBN 978-966-****-**-*

Навчальний посібник «Фізика в будівництві» поєднує широке коло питань, які утворюють науку про матеріали і містить сучасну інформацію з фізики твердого тіла, у тому числі про наноструктуровані об'єкти, а також механічні, теплові, акустичні та радіаційні властивості будівельних матеріалів. Викладений теоретичний матеріал з фізики інтегровано з професійно спрямованими питаннями, зокрема, радіаційна безпека при спорудженні будівель з різних матеріалів, поведінка матеріалів в умовах експлуатації.

Окремий розділ посібника розкриває особливості організації самостійної роботи студентів над дисципліною «Фізика в будівництві». Текст посібника супроводжується значною кількістю ілюстрацій, прикладів, додатків.

На думку авторів, наведений в посібнику матеріал, послідовність його викладання, довідкові дані корисні всім студентам, які навчаються за напрямком «Будівництво».

УДК: 691:620.179

ББК: 22.3я73

© Д.Л.Череднік, С.О. Даньшева, Ю.Є. Крот, Г.М. Подус, 2014

ISBN 978-966-****-**-*

© Фірма «БУРУН і К», 2014

ВСТУП

За визначенням вчених-економістів сучасне світове промислове виробництво знаходиться в середині періоду домінування V технологічного укладу і початку реалізацій окремих наукових напрямків VI, який характеризується націленістю на розвиток і застосування біотехнологій, нанотехнологій, генної інженерії, мембранних і квантових технологій, фотоніки, мікромеханіки, термоядерної енергетики. Синтез досягнень в даних напрямках забезпечить вихід на принципово новий рівень функціонування виробництва. І хоча, за даними Інституту економічного прогнозування Національної Академії наук України, на частку VI технологічного укладу в нашій державі припадає менше 0,1 % промислової продукції, а основу виробництва складають III і IV технологічні уклади, на частку яких припадає відповідно 60% і 38%. Все ж молоді, яка навчається у вищих навчальних закладах, належить реалізувати свій інженерний потенціал саме в середовищі наукоємного виробництва, коли інтенсивний розвиток і оновлення техніки й технологій постійно змінюють якість та умови професійної діяльності.

На думку провідних фахівців Ради з акредитації в галузі техніки й технологій (Accreditation Board for Engineering and Technology - ABET), для ефективної трудової діяльності в умовах таких виробництв майбутній інженер повинен бути здатний до прийняття технічних рішень на винахідницькому рівні та готовий знаходити необхідну інформацію і самонавчатися. Аналогічні вимоги щодо кваліфікації інженера існують і в національних радах інших країн, які займаються оцінюванням якості інженерних освітніх програм у технічних університетах. Практичне розв'язання такого завдання, поставленого перед вищою технічною освітою, ґрунтується на тому, що весь навчальний процес, пов'язаний з інженерною підготовкою, повинен відбуватися у нерозривному зв'язку з фундаментальною підготовкою. За такої інтеграції кожен з напрямків підготовки отримує можливість додаткового розвитку. Професійно-орієнтована (спеціальна) підготовка, яка ґрунтується на фундаментальній освіченості, надає можливість для більш успішної і універсальної підготовки в професійній галузі. Адже створення нового можливе на базі стійких фундаментальних знань, які по суті не старіють, а лише доповнюються раніше невідомими й переходять на новий якісний рівень.

У підготовці майбутніх інженерів у ХНУБА даний підхід реалізується завдяки введенню до навчальних планів спеціальностей спеціальних курсів, які відносяться до варіативної їх частини. Зокрема, таким курсом є «Фізика в будівництві».

Частина I.

ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ КОНДЕНСОВАНОГО СТАНУ І БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

Ще на початку ХХ століття англійський вчений Джозеф Томсон, лауреат Нобелівської премії з фізики, дійшов висновку, що «в технічному прогресі беруть участь три компоненти: знання, енергія і матеріали». Оскільки матеріали є ключовим фактором, що визначає успішне вирішення інженерних проблем, а щодо теоретичного забезпечення сучасної цивілізації – необхідними матеріалами, то до їх основи покладено знання з фізики твердого тіла.

Даний курс ґрунтується на вивченні будови матеріалів, їх властивостей взагалі, а також ознайомлення з матеріалами і властивостями будівельних матеріалів, зокрема.

Тверді тіла складаються з атомів, молекул та іонів, які коливаються біля положень рівноваги. Як результат об'єднання цих частинок, виникає внутрішня мікроструктура (утворюються фази, зерна і т.п.). Атоми також мають внутрішню структуру. Їх властивості визначаються структурою електронних оболонок і ядер. Із внутрішньою структурою матеріалів нерозривно пов'язані їх фізичні властивості (механічні, теплові, електронні).

Механічні властивості виявляються при дії механічних зусиль і обумовлені внутрішньою мікроструктурою матеріалу. Теплові властивості пов'язані з внутрішньою енергією матеріалу, тобто рухом атомів і електронів.

Електронні властивості обумовлені рухом електронів.

Зв'язок між будовою і властивостями матеріалів простежується не тільки в простих за структурою матеріалах, але й у складних (так званих системних) матеріалах. До останніх можна віднести:

- матеріали з покриттям або зміненими поверхневими властивостями;
- агломераційні матеріали – штучні вироби, складові яких мають різко відмінні властивості (до них відносять бетон);
- армовані матеріали – матеріали, що складаються з однорідної матриці й армуючого матеріалу (до них відноситься залізобетон).

Розділ I.

БУДОВА ТВЕРДИХ ТІЛ

1.1 Мікроструктура твердого тіла

Тверде тіло – один із агрегатних станів речовини, що характеризується опором деформації і зміною об'єму. На мікрорівні кристалічне тверде тіло є сукупністю правильно розташованих взаємодіючих частинок (атомів, молекул, іонів). Кристалічна структура твердого тіла має певний порядок розташування частинок, який періодично багаторазово повторюється в усіх напрямках (трансляційна симетрія), і є так званим дальнім порядком упаковки частинок. Мінімальний об'єм, повторенням якого можна одержати весь кристал, називається елементарною коміркою, що являє собою «будівельний блок», використовуючи який, можна побудувати весь кристал.

Класифікація елементарних комірок заснована на двох типах симетрії: трансляційної (повторення в просторі) і поворотної (кристал повертається в початкове положення при обертанні на кут $360^\circ:2$, $360^\circ:3$, $360^\circ:4$, $360^\circ:6$). Нещодавно було винайдено так звані квазікристали – це певні сплави, що характеризуються дальнім порядком, але мають вісь симетрії п'ятого порядку (обертання на кут $360^\circ:5$).

Форма елементарних комірок може бути різною. На рисунку 1.1 зображено три найбільш розповсюджені типи структур: об'ємноцентрована й гранецентрована кубічні та гексагональна щільноупакована.

Відзначимо, що об'ємноцентровану ґратку можна розглядати як дві прості кубічні ґратки, вставлені одна в одну. В одній із підґраток атоми знаходяться в вершинах куба, а друга містить центральні атоми.

У техніці широке застосування мають полікристали, утворені з великої кількості хаотично розташованих зрощених монокристалів.

До твердих тіл умовно відносять також і аморфні тіла, фактично – це дуже в'язкі рідини. Такі тіла характеризуються відсутністю точки плавлення і трансляційної симетрії. В аморфних тілах існує лише ближній порядок, тобто порядок у розташуванні частинок, який зберігається на відстані лише сотень або тисяч періодів ґраток, а не сотень тисяч, як у кристалах.

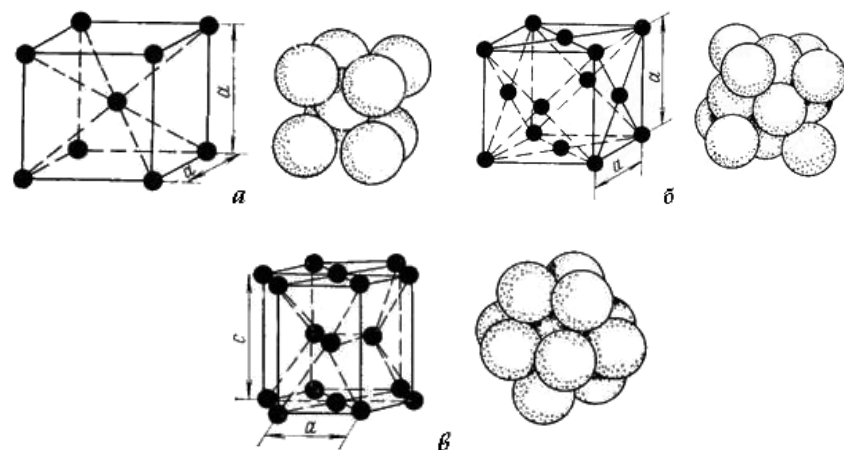


Рисунок 1.1 – Розташування атомів у комірках
 а – об'ємноцентрована кубічна; б – гранецентрована кубічна;
 в – гексагональна щільноупакована.

1.2 Зв'язок між структурою і властивостями

Між структурою і властивостями матеріалів існує нерозривний зв'язок. Властивості твердих тіл можна поділити на два класи: ізотропні й анізотропні.

Ізотропні властивості не залежать від напрямку, вони визначаються типом ґраток. Це так звані параметри статистичного характеру, до яких відносяться густина, теплоємність і т.ін.

Анізотропні (неоднакові в різних напрямках) властивості – це такі властивості, які залежать від напрямку та пов'язані з передаванням енергії від одних частинок до інших. Прикладом властивостей такого типу є пружність і теплопровідність. Причиною анізотропії є відмінність між міжплощинними відстанями в різних кристалографічних напрямках.

У якості прикладу речовини з анізотропними властивостями на рисунку 1.2,а зображено одну з структурних модифікацій Карбону – графіт. Графіт має шарувату структуру. Між атомами Карбону в межах даного шару існують міцні зв'язки, але зв'язки, що існують між сусідніми шарами, є слабкими. Відзначимо, що існують також інші структурні модифікації Карбону, наприклад, алмаз (рис.1.2,б). Структуру алмазу можна розглядати як систему двох гранецентрованих кубічних ґраток, усталених одна в одну і зсунутих уздовж діагоналі куба на чверть її довжини. Алмаз є найтвердішим природним мате-

ріалом. Інформація про властивості різних структурних модифікацій Карбону міститься в розділі 3 «Наноструктуровані об'єкти».

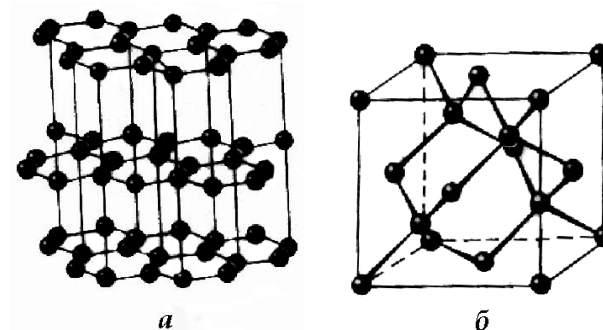


Рисунок 1.2
 а – структура графіту; б – структура алмазу

1.3 Взаємодія атомів в кристалічних ґратках

Положення атомів у кристалічних ґратках у стані рівноваги визначається тим, що сили притягання і відштовхування між атомами є неоднаковими. За таких умов потенціальна енергія твердого тіла повинна бути мінімальною. На рисунку 1.3 зображено залежність потенціальної енергії взаємодії двох атомів від відстані між ними.

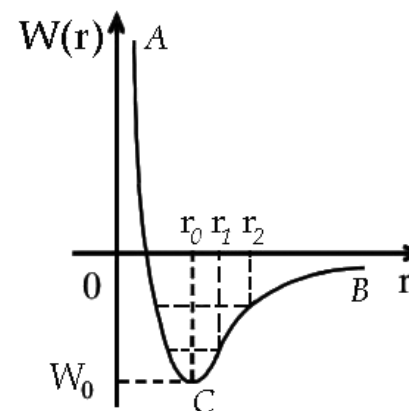


Рисунок 1.3 – Залежність потенціальної енергії взаємодії двох атомів від відстані між ними

Уважається, що за великих атомних відстаней потенціальна енергія дорівнює нулю. У випадку зменшення відстані між атомами потенціальна енергія зменшується, за деякої відстані вона проходить через мінімум і швидко зростає за подальшого зменшення відстані між атомами. Це зростання обумовлене тим, що густина твердих тіл є скінченною величиною.

Під дією зовнішнього навантаження відстань між атомами кристала змінюється, а також змінюється розташування атомів, що відповідає стану рівноваги в ґратках. Це призводить до відмінності в значеннях сил притягання й відштовхування атомів у ґратках і виникнення внутрішніх сил, здатних повернути атом у положення рівноваги.

Як видно з рисунка 1.3, графік залежності потенціальної енергії від відстані (крива АСВ) є несиметричним. Звичайно, його апроксимують функцією:

$$W = W_0 + \frac{1}{2}k(\Delta r)^2 - \frac{1}{3} \cdot b(\Delta r)^3, \quad (1.1)$$

де W_0 – мінімальна енергія, що відповідає «дну» потенціальної ями;
 k і b – параметри гармонічності й ангармонічності.

Якщо за деформації атоми зміщуються на малу відстань від положення рівноваги, то деформація пружна. При знятті зовнішнього навантаження деформований кристал відновлює попередні розміри і форму, і атоми повертаються в початкове положення. Тому при пружній деформації достатньо розглядати частину потенціальної кривої поблизу її «дна», де вона може бути описана квадратичною функцією.

Для пояснення впливу характеру взаємодії між атомами на властивості матеріалів досить часто використовують пружинну модель сильно зв'язаних атомів. У разі збільшення відстані між атомами пружини розтягуються, внаслідок чого виникає повертаюча сила. Якщо відстань між атомами зменшується, виникає сила відштовхування. Одновимірний варіант даної моделі зображено на рисунку 1.4. Якщо потенціальна енергія апроксимується рівнянням (1.1), то сила взаємодії між атомами виражається формулою

$$F = -\frac{dW}{dr} = -k(\Delta r) + b(\Delta r)^2, \quad (1.2)$$

За малих зсувів можна вважати, що $F = -k(\Delta r)$.



Рисунок 1.4 – Пружинна модель сильно зв'язаних атомів

1.4 Типи зв'язків у твердих тілах

Основні типи кристалічних твердих тіл розрізняються за характером сил взаємодії між частинками й видами частинок, розташованих у вузлах кристалічних ґраток. Можна виділити чотири типи кристалів із різними зв'язками.

1. Іонні кристали (NaCl, вуглекислий кальцій та інші солі). У вузлах кристалічних ґраток розташовані іони, між якими здійснюється гетерополярний зв'язок (рис. 1.5).

2. Атомні кристали (алмаз, графіт, германій). У вузлах кристалічних ґраток розташовуються атоми, що утримуються в вузлах ковалентними зв'язками квантово-механічного походження; валентні електрони сусідніх атомів, якнайменше пов'язані з атомом. Міцний ковалентний зв'язок виникає тільки між валентними електронами сусідніх атомів.

3. Металічні кристали. У вузлах кристалічних ґраток розташовуються позитивні іони металу. При утворенні кристалічних ґраток валентні електрони, слабо пов'язані з атомами, відриваються від атомів і колективізуються, тобто вже належать не одному атому, як за іонного зв'язку, і не парі сусідніх атомів, як за ковалентного зв'язку, а всьому кристалу.

4. Молекулярні кристали. У вузлах кристалічних ґраток розташовуються нейтральні молекули речовини, сили взаємодії між якими обумовлені незначним взаємним зсувом електронів у замкнених оболонках атомів і називаються Ван-дер-Ваальсівськими.

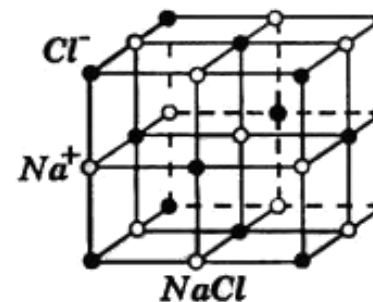


Рисунок 1.5 – Іонний зв'язок

Наведені вище основні типи зв'язків у чистому вигляді зустрічаються досить рідко. Прикладом матеріалу з різними типами зв'язків може бути графіт, що складається з атомів Карбону. Карбон – це найлегший з елементів, що має чотири валентні електрони. Як було відзначено в підрозділі 1.2, графіт має шарувату структуру. Шари матеріалу розташовуються один над одним. Кожен шар складається з атомів Карбону, з'єднаних міцними ковалентними зв'язками. Атоми розташовані в вузлах плоских комірок, що мають

форму поздовжніх шестикутників. Шари утримуються між собою слабкими силами Ван-дер-Ваальса. Міцність останніх є невеликою, тому, як згадано вище, графіт має значну анізотропію властивостей, що обумовлює те, що графітовий стержень легко розламати (так, зокрема, виконується рисунок олівцем на папері).

1.5 Дефекти в твердих тілах

Дефекти, які спостерігаються в твердих тілах, поділяють на точкові, лінійні й поверхневі.

Точкові дефекти – це вакансії (вакантні вузли) й атоми в міжвузловинах (рис.1.6,а, 1.6,б). Даний тип дефекта виникає внаслідок зовнішніх дій (нагріву, дії короткохвильового електромагнітного випромінювання, потоків елементарних частинок і т.ін.), коли окремі атоми кристалічних ґраток залишають свої положення у вузлах.

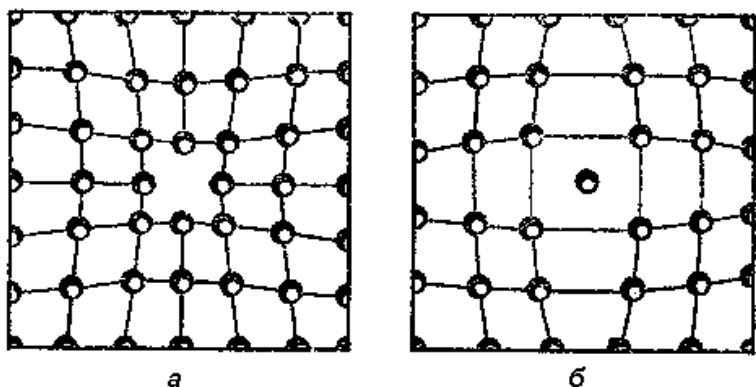


Рисунок 1.6 – Точкові дефекти в твердому тілі
а – вакантний вузол, б – домішковий атом у структурі

Точкові дефекти впливають на фізичні властивості: знижують рухливість носіїв струму або служать носіями струму, впливають на оптичні, магнітні, механічні властивості.

Лінійні дефекти - дислокації мають протяжність тільки в одному напрямку. На рисунку 2.5,а зображене розташування атомів, характерне для крайової дислокації (у верхній частині, у кристалічній ґратці, яка зображена на рисунку 2.5,а, присутня зайва атомна напівплощина). Саме з наявністю дислокацій пов'язується низька міцність монокристалів, яка спостерігається експериментально, порівнянно з теоретичною (див. підрозділ 2.7). Наявність дислокацій у матеріалах підтверджується різноманітними експерименталь-

ними методами. В наш час за допомогою спеціальної апаратури одержано тривимірне зображення дислокацій у наночастиках.

Поверхневі дефекти бувають двох типів: зовнішні й внутрішні. Зовнішній дефект – це недосконалість, обумовлена тим, що поверхня твердого тіла граничить із зовнішнім середовищем. За рахунок цього тверді тіла мають поверхневу енергію, для металів вона становить приблизно 1 Дж/м^2 . Внутрішні поверхневі дефекти з'являються в тих місцях, де відбувається перехід від однієї просторової орієнтації кристалічних ґраток до іншої. Такі внутрішні дефекти також мають поверхневу енергію, яка приблизно дорівнює 1 Дж/м^2 . Оскільки на поверхнях відбувається стрибкоподібна зміна густини матеріалу, кристалічної структури, орієнтації окремих кристалічних зерен, поверхневі дефекти істотно впливають на різні властивості матеріалу (механічні, оптичні та електричні).

1.6 Структура будівельних матеріалів

У будівельних матеріалах, що є штучними конгломератами, звичайно, розглядають два рівні внутрішньої будови:

— мікроструктурний рівень - рівень дослідження за допомогою мікроскопів (оптичного й електронного), а також вивчення рентгенівським та іншими методами, з високою роздільною здатністю;

— макроструктурний рівень – рівень дослідження матеріалу неозброєним оком або за допомогою мікроскопа з невеликим збільшенням.

Процес структуроутворення в будівельних матеріалах в основному полягає в створенні зародків кристалів у перенасичених рідинах. Збільшуючись в об'ємі, зародки зростаються один з одним і утворюють єдиний дрібнозернистий матеріал з різним характером міжзернових зв'язків.

Змінюючи ступінь переохолодження та вводячи різного роду домішки (пластифікатори), можна управляти ростом кристалів, впливати на структуру й міцність матеріалу. Залежно від природи дисперсних структур, їх поділяють на коагуляційні, кристалізаційні та конденсаційні.

У коагуляційних структурах зв'язок між частинками здійснюється через прошарок із слабкими Ван-дер-Ваальсівськими силами міжмолекулярної взаємодії. Такі матеріали характеризуються високою пластичністю і низькою міцністю. В конденсаційних структурах безпосередній контакт між частинками виникає за рахунок хімічних іонних зв'язків. Для таких матеріалів характерними є крихкість і висока міцність. Кристалізаційні структури виникають у процесі прямого вирощування із створенням просторової сітки або каркаса. За механічними властивостями дані структури подібні до конденсаційних структур. Види зв'язків у дисперсних структурах наведено на рисунку 1.7.

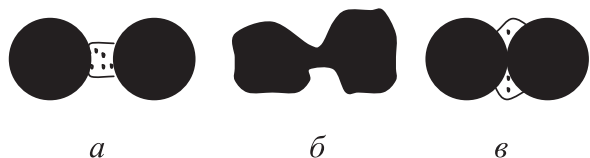


Рисунок 1.7 – Типи дисперсних структур
а – коагуляційна структура; б – кристалізаційна структура;
в – конденсаційна структура

У процесі змішування мінеральних в'язучих із водою спочатку виникає коагуляційна структура, а далі відбувається ріст кристалів. Можливим є утворення змішаних структур, наприклад, коагуляційно-кристалізаційної. Бетон із «плаваючим» заповнювачем зустрічається рідко. Для нього є характерною структура із кристалізаційними зв'язками.

Більшість будівельних матеріалів є композиційними. Для спрощення зручно розглядати композиційні системи, що складаються з двох компонентів: дисперсного середовища (матриці) і заповнювача різного розміру: піску, щебеню, волокна тощо. Матриця умовно вважається однорідною. Між матрицею й заповнювачем існують межі поділу. Завдяки цементуючій здатності в'язучої речовини частинки заповнювача скріплюються між собою в загальний спільний моноліт. Окрім в'язучої речовини, мікродисперсну структуру мають також шари, розташовані біля поверхні і контактної зони в матеріалі. Вони відділяють в'язучу речовину від поверхні іншого компоненту. Склад і структура тонких контактних шарів відрізняються від основної речовини.

Властивості композиційних матеріалів залежать від фізико-механічних властивостей середовища і заповнювача. На будь-якому рівні структуру бетону можна розглядати як систему «матриця – контактна зона – заповнювач». Через відмінність фізичних властивостей матриці, заповнювача та контактної зони структура бетону завжди є фізично неоднорідною, що обумовлює наявність в структурі власного поля механічних напружень. За наявності зовнішнього навантаження виникає неоднорідний напружено-деформований стан бетону. Матриця забезпечує передачу зусиль на зерна й волокна заповнювача, захищає заповнювач від механічних і корозійних впливів.

Композиційні будівельні матеріали в залежності від виду заповнювача поділяються на три класи:

- 1) із зернистим заповнювачем (дрібним і крупним);
- 2) із волокнистим заповнювачем (з орієнтованими і з неорієнтованими волокнами);
- 3) із газонаповненими частинками (з витягнутими і кулькоподібними порожнинами).

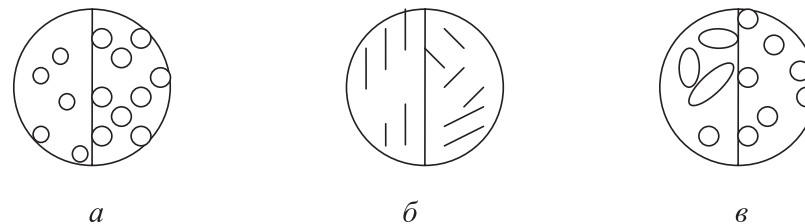


Рисунок 1.8 – Моделі композиційних матеріалів
а – із зернистим заповнювачем, б – з волокнистим заповнювачем,
в – з газонаповненими частинками.

1.7 Дефекти в будівельних матеріалах

У будівельних матеріалах зустрічаються всі розглянуті вище типи дефектів: точкові (вакансії і домішкові атоми), лінійні (дислокації), а також специфічні дефекти (відкриті й закриті пори, тріщини, включення сторонніх речовин, раковини та порушення структури, обумовлені недотриманням технологічного режиму). Відзначимо, що дислокації в неметалевих будівельних матеріалах були знайдені експериментально в кальциті й у гіпсі.

Присутність в кожному об'єкті дефектів (тріщин, пор) означає, що цілі групи атомів не взаємодіють між собою. Мікротріщини під навантаженням можуть зростати і перетворюватись на макротріщини. Специфічним дефектом будівельних матеріалів є пори (замкнені й відкриті), які в значній мірі впливають на міцність і теплопровідність. Дослідні дані показують, що за збільшення пористості міцність бетону та його теплопровідність різко зменшуються (див. розділи 2, 4).

Розділ 2. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

2.1 Загальні положення та класифікація

Механічні властивості матеріалів, які визначають за їх поведінкою під навантаженням – це сукупність показників, що характеризують опір матеріалу навантаженню, його здатність деформуватися при цьому, а також особливості його поведінки за тривалого навантаження. Навантаження твердого тіла можна здійснити різними способами: одновісним розтягуванням або стисненням, вигинанням, зрізом, зсувом, крученням (рис. 2.1). Основним серед перелічених видів навантаження є одновісне розтягування (або стиснення) та зсув.

Для опису поведінки різних матеріалів під навантаженням потрібно знати такі властивості: пружність, міцність, пластичність, твердість, в'язкість. Основні характеристики будівельних матеріалів наведені в додатку А. Всі механічні властивості твердих тіл можна поділити на два види: міцнісні (міцність, твердість) і деформаційні (пружність, пластичність, крихкість, в'язкість, повзучість).

Розглянемо основні параметри, які характеризують одновісну деформацію та зсув.

Напруження, σ , яке виникає в процесі одновісного розтягування (стиснення), обчислюється за формулою

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (2.1)$$

де F – прикладена сила;

S – початкова площа поперечного перерізу зразка.

Відносна деформація (відносне видовження) обчислюється за формулою

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}, \quad (2.2)$$

де $\Delta \ell$ – зміна довжини зразка, що відбулася при деформації;

ℓ – початкова довжина.

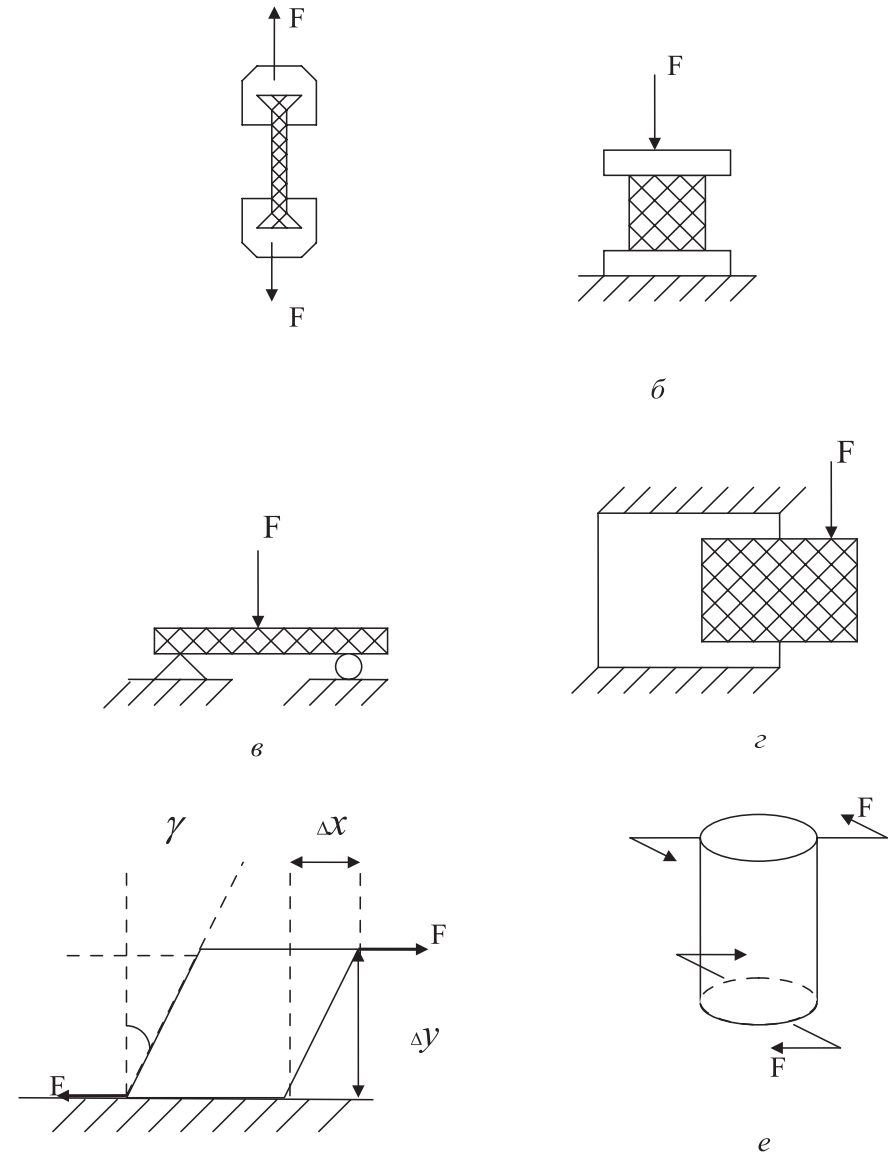


Рисунок 2.1 – Схеми навантаження твердих тіл
а – одновісний розтяг, б – одновісне стиснення, в – вигин,
г – зріз, д – зсув, е – кручення.

Деформація в одному напрямку (наприклад, уздовж осі z) супроводжується зміною розмірів уздовж осей x та y . Якщо деформація уздовж осі z є деформацією розтягу, ε_z , то вздовж напрямків x та y відбувається стиснення зразка. У разі ізотропного матеріалу деформації уздовж осей x і y є однаковими й негативними (переріз зразка зменшується).

Відношення $\mu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$ називається коефіцієнтом Пуассона. За незмінного

об'єму максимальне значення $\mu = 0,5$. Для реальних матеріалів $\mu \in [0,3 - 0,4]$.

Розглянемо основні параметри, що характеризують зсув. Під дію сили, таким чином, як це зображено на рисунку 2.1, д, всі шари, паралельні до деякої площини, зміщуються один відносно одного. Об'єм тіла при цьому не змінюється. Відносна деформація визначається як тангенс кута зсуву, γ .

$tgy = \frac{\Delta x}{\Delta y}$. За малих деформацій можна прийняти, що відносна деформація зсуву складає $\gamma = \frac{\Delta x}{\Delta y}$. Дія сили характеризується напругою зсуву, τ , (розрахункова величина), $[\tau] = \text{Па}$.

2.2 Пружна деформація твердих тіл

Пружна деформація в навантаженому матеріалі виникає практично миттєво в момент прикладання сили за будь-якого виду навантаження, особливо в випадках, коли напруження є малими. Пружна деформація є оборотною, тобто початкові розміри відновлюються після припинення дії зовнішнього навантаження. На початковому етапі навантаження залежність між прикладеною силою і деформацією є прямо пропорційною. За подальшого навантаження така залежність може мати різний характер для різних матеріалів (див. підрозділ 2.8) і визначається цілою низкою причин.

Розглянемо одновісну деформацію на початковому етапі навантаження. За розтягу або стиснення справедливий закон Гука, згідно з яким відносне видовження або стиснення, $\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$, є пропорційним до напруження:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{1}{E_c} \cdot \frac{F}{S}, \quad \text{або} \quad \sigma = E_c \cdot \varepsilon. \quad (2.3)$$

Даний закон є справедливим лише для малих відносних деформацій ($\varepsilon \approx 1 - 2\%$).

Коефіцієнт пропорційності, E_c , що виникає між зовнішнім напруженням і деформацією, називається статичним модулем пружності матеріалу.

Лінійність залежності між деформацією і напруженням обумовлена тим, що за невеликих прикладених навантажень сили взаємодії між атомами (сили зв'язку) є прямо пропорційними до зміни міжатомної відстані (це відповідає розгляду енергії міжатомних зв'язків поблизу «дна потенціальної ями», де її можна описати квадратичною функцією) (див. підрозділ 1.3). Сумарна зміна міжатомних відстаней призводить до видовження зразка на $\Delta \ell$.

Виходячи з того, що на початку деформації модуль Юнга σ є пропорційним до відносного видовження ε , пружна деформація вимагає затрати енергії (прикладена сила на деякій ділянці шляху виконує роботу). Енергія, «накачана» в зразок за пружного деформування, може бути представлена як площа під графіком «напруження – деформація». Енергія, що припадає на одиничний об'єм матеріалу, складає

$$\frac{W}{V} = \frac{1}{2} \cdot \sigma \varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E_c} \quad (2.4)$$

При знятті напруження енергія виділяється.

Значення модуля пружності безпосередньо пов'язане з енергією міжатомних зв'язків (див. рисунок 1.3,б). Матеріали, що характеризуються глибоким і вузьким мінімумом на кривій «енергія – міжатомна відстань», мають великий модуль пружності. Пружна поведінка твердих тіл пов'язана з їх температурою плавлення: чим вища температура плавлення, тим більший модуль пружності.

Розглянемо зсуви. Між дотичним напруженням τ , і відносною деформацією зсуву, γ , також існує прямо пропорційна залежність, тобто виконується закон Гука: $r \sim \gamma$. Відношення дотичної напруги τ , до відносної деформації зсуву називається модулем зсуву:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.5)$$

Як і модуль Юнга, модуль зсуву є сталим на ділянці пружних деформацій. Як правило, $G \approx (0,2 \div 0,3) E_c$.

Модуль Юнга, E , модуль зсуву, G , і коефіцієнт Пуассона, μ , пов'язані між собою співвідношенням

$$G = \frac{E_c}{2} (1 + \mu) \quad (2.6)$$

2.3 Модуль пружності будівельних матеріалів

Модуль пружності будівельних матеріалів може змінюватися в широкому інтервалі. Значення модуля пружності гірських порід потрібно знати, наприклад, для організації технологічного процесу їх подрібнення. Для більшості

гірських порід він має значення $E_c \in [10^9 - 10^{11}] \text{ Па}$, що порівнянно із значенням модуля пружності металів і сплавів. Модуль пружності за стиснення є в 1,5 – 4 рази більшим, ніж за розтягу.

Необхідно відзначити, що на пружність будівельних матеріалів впливає такий показник, як пористість. Навіть у випадку твердих будівельних матеріалів (наприклад, у кварцовому піску, вірменському туфі) пористість призводить до того, що криві «напруження – деформація» за навантаження і розвантаження мають петлі гістерезису, що свідчить про втрату частини «накопиченої» енергії, тобто про непружну деформацію. За повторних навантажень для слабких порід (вапняки, пісковики, гіпс) модуль пружності, одержаний за першого навантаження, є меншим, ніж за повторних.

Розглянемо модуль пружності бетону. Поведінка бетону не є пружною вже за невеликих навантажень, тому для нього строге поняття «модуль пружності» є неприйнятним. Можна говорити лише про умовне значення деякої величини, що характеризує пружні властивості бетону на деякій ділянці діючих напружень. Звичайно розглядають так звані «початковий модуль пружності» і «січний модуль пружності». Діаграма «напруження – деформація» для бетону наведена на рисунку 2.2.

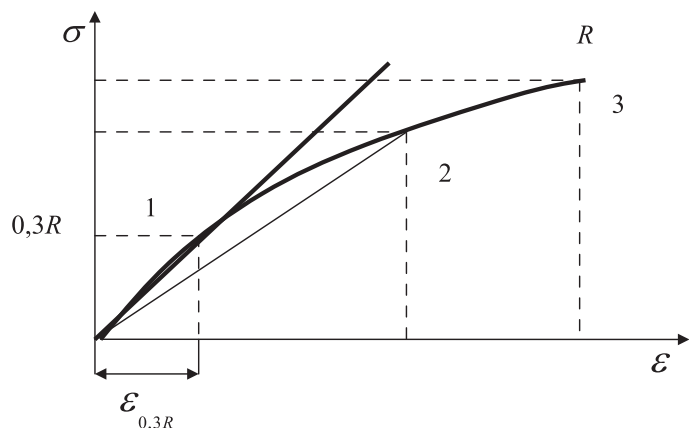


Рисунок 2.2 – Залежність «напруження – деформація» для бетону за центрального осьового стиснення

Напруження визначається стандартним способом, а межу короточасної міцності (точка 3 на діаграмі) в будівельній літературі прийнято позначати через R .

Початковим модулем пружності бетону, E_{c_0} , (статичним модулем пружності) називається модуль, що відповідає значенню деформуючого напруження, яке становить 30% від границі міцності:

$$E_{c_0} = \frac{0,3R}{\varepsilon_{0,3}}. \quad (2.7)$$

Напруження $0,3R$ і деформація, які використовуються для визначення початкового модуля пружності, наведені на рисунку 2.2. Згідно з європейськими нормами (EN1992-1), початковий модуль пружності бетону визначається за напруження $0,4R$. Початковий модуль пружності залежить від модулів пружності компонентів бетону і кількісного співвідношення між ними. Відношення значення напруження до значення деформації в будь-якій точці називається січним модулем.

Як уже згадувалося, на будь-якому рівні бетон можна розглядати як трьохкомпонентну структуру: матриця – контактна зона – заповнювач. Залежність, що визначає зв'язок між пружними властивостями компонентів бетону і об'ємів цих компонентів, описують емпіричними моделями, за використання яких одержують дуже складні залежності. Наприклад, для трьохкомпонентної моделі «матриця – контактна зона – заповнювач» емпірична залежність є такою:

$$E_{c_0} = \frac{2}{\frac{1}{E_3 V_3 + E_M V_M + E_K V_K} + \frac{V_3}{E_{3,МК}} + \frac{V_M}{E_{3,МК}} + \frac{V_K}{E_{3,МК}}}, \quad (2.8)$$

де E_3, E_M, E_K – модулі пружності заповнювача, матриці й контактної зони, V_3, V_M, V_K – відносна об'ємна концентрація заповнювача, матриці й контактної зони.

2.4 Експериментальне визначення модуля пружності бетону

Основний спосіб визначення модуля пружності заснований на вимірюванні деформації за зростаючого значення прикладеного напруження. У процесі визначенні модуля пружності навантаження повинно зростати ступенями, що становлять 10% від очікуваного руйнуючого навантаження. В межах кожного ступеня темп навантаження повинен становити $0,6 \text{ МПа/с}$.

Для знаходження модуля пружності можна використовувати також динамічні дії (наприклад, звукові хвилі). В даному випадку для визначення модуля пружності E_d , потрібно знати густину матеріалу й швидкість поширення в ньому поздовжніх хвиль.

Динамічним модулем пружності називається величина, що встановлює зв'язок між швидкістю поздовжніх хвиль, v , і середньою густиною ρ , бетону:

$$E_d = k\rho v^2, \quad (2.9)$$

де k – коефіцієнт, значення якого для бетону в середньому обирають таким, що дорівнює 0,745 з точністю, достатньою для практичних цілей.

На відміну від статичного навантаження, реакція на пружну дію під час динамічних випробувань виникає лише в досить коротких інтервалах часу, тому пружні зсуви характеризуються деяким запізнюванням (релаксацією). Наслідком цього є зменшення вимірюваних деформацій і збільшення динамічного модуля пружності. Для деяких матеріалів (металів, кераміки) за нормальних температур можна вважати, що статичний і динамічний модулі є однаковими, а для міцних гірських порід – близькими. Наприклад, для граніту: $\frac{E_d}{E_c} = 1,08$, для бетону: $\frac{E_d}{E_c} = 2,5$, для вапняку: $\frac{E_d}{E_c} = 2,5$. До збільшення цього відношення, крім особливостей процесу релаксації, призводить наявність в матриці пористості й мікротріщин.

2.5 Приклади застосування закону Гука для інженерних розрахунків

Задача 1. У процесі виробництва залізобетонних плит у кожному стержні арматури створюють попереднє напруження в 1 ГПа. Наскільки для цього потрібно розтягнути стержень довжиною 6,3 м?

Розв'язання. Попереднє напруження (натяг) арматури здійснюється її розтяганням перед бетонуванням. При затвердінні бетону попередньо розтягнута арматура стискається. Після зняття розтягуючого зусилля арматура в бетоні «прагне» стиснутися, але зчеплений з нею бетон перешкоджає цьому. Тому бетон виявляється стиснутим, внаслідок чого він має підвищену стійкість до утворення тріщин і водонепроникність, що забезпечує жорсткість конструкції.

Під час навантаження деформація арматури повинна дорівнювати значенню деформації бетонної матриці. Враховуючи це, на підставі закону Гука можна записати:

$$\Delta l = \frac{\sigma l}{E}.$$

Після підстановки числових даних одержимо:

$$\Delta l = \frac{10^9 \cdot 6,3}{2 \cdot 10^{11}} = 3,15 \cdot 10^{-2} \text{ (м)}.$$

Задача 2.2. При будівництві споруд із збірного залізобетону як несучі конструкції використовуються залізобетонні колони. Визначте деформацію

колони, яка має діаметр $d_1 = 32$ см, висоту $h = 4,5$ м та армована чотирма стержнями діаметром $d_2 = 2,5$ см, якщо вона стискається силою $F = 2 \cdot 10^6$ Н.

Розв'язання. Видовження колони Δh повинне бути однаковим як для сталевих стрижнів, так і для бетонної матриці. Згідно з законом Гука:

$$\Delta h = \frac{F_{cm} h}{S_{cm} E_{cm}} = \frac{F_{\sigma} h}{S_{\sigma} E_{\sigma}}.$$

Враховуючи, що зусилля, прикладене до колони, розподіляється між складовими частинами композиційного матеріалу (сталлю та бетоном), запишемо рівняння для загальної сили дії, що діє на колону:

$$F = F_{cm} + F_{\sigma},$$

де $F_{cm} = \frac{\Delta h}{h} S_{cm} E_{cm}$ – сила, що діє на стрижні (арматуру);

$$F_{\sigma} = \frac{\Delta h}{h} S_{\sigma} E_{\sigma} \text{ – сила, що діє на матрицю.}$$

Отже,

$$F = F_{cm} + F_{\sigma} = \frac{\Delta h}{h} S_{cm} E_{cm} + \frac{\Delta h}{h} S_{\sigma} E_{\sigma}.$$

З даного рівняння визначимо видовження колони Δh :

$$\Delta h = \frac{F h}{E_{cm} S_{cm} + E_{\sigma} S_{\sigma}},$$

$$\Delta h = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 4,5}{2 \cdot 10^{11} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{10} \cdot 7,9 \cdot 10^{-3}} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}.$$

Звернемо увагу на те, що складові даного композиційного матеріалу, які мають різні фізичні властивості, розглядаються як єдина система. При розрахунку конструкції з композиційних матеріалів необхідно брати до уваги, що армування буде ефективним, якщо модуль зміцнюючого компонента буде вищим за модуль пружності матриці (в даному випадку). Враховуючи, що армуючий матеріал повинен сприймати основне навантаження, найважливіше в даній задачі питання про те, яка частка навантаження сприймається стержнями. Відповіддю на дане питання є визначення відношення:

$$\frac{F_{cm}}{F_{\sigma}} = \frac{S_{cm} E_{cm}}{S_{\sigma} E_{\sigma}} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{10}}{7,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{10}} = 0,152.$$

Отже, лише приблизно 15% навантаження в даному випадку сприймають стержні, а 85% – матриця. Таким чином, щоб основне навантаження сприймала

арматура, необхідно збільшити S_{cm} , для чого потрібно брати більшу кількість стержнів більшого діаметра.

2.6 Пластична деформація твердих тіл. Теоретична міцність

Пластична деформація виникає за механічних напружень, що перевищують границю пружності. В даному випадку зразок після зняття зовнішнього навантаження не відновлює повністю свою форму й розміри. Деформація, що залишається після зняття навантаження, пов'язана з переміщенням частинок (атомів, молекул, іонів) усередині кристала на відносно великі відстані. Це викликає залишкову зміну форми, структури, властивостей без мікроскопічних порушень суцільності матеріалу, оскільки деформація відбувається шляхом ковзання або зрушення по певних площинах на ціле число міжатомних відстаней (рис. 2.3).

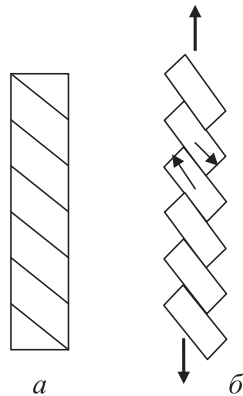


Рисунок 2.3 – Ковзання в монокристалі Zn

а – до прикладання навантаження; б – після прикладання навантаження до зразка (він має гексагональну, щільно упаковану структуру)

На рисунку 2.4 наведено приклад моделі, яка ілюструє механізм пластичної деформації методом ковзання.

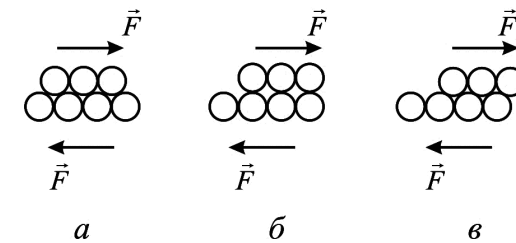


Рисунок 2.4 – Модель деформації методом зсуву за дії напруження зсуву

Під дією напруження зсуву верхній шар атомів (вигляд збоку) зміщується відносно нижнього. Якщо після збільшення навантаження атоми розташовуються поблизу «колишніх сусідів», не досягнувши положення б, деформація буде пружною (після зняття навантаження вони повернуться в початкове положення). Для переміщення з положення а в положення в необхідно прикласти силу достатню для того, щоб атоми опинилися в положенні б. Подальше ковзання (переміщення в положення в) відбудеться самостійно. В цьому випадку матиме місце залишкова деформація. Можна довести, що необхідне напруження для одночасного зсуву всієї верхньої площини відносно нижньої складає $0,1G$ (G – модуль зсуву). Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними про міцність металевих тонких монокристалів доводить, що одержане теоретичне значення міцності є приблизно на три порядки вищим за знайдене експериментально.

2.7 Ковзання шляхом руху дислокацій

Низька міцність монокристалів порівняно із значенням теоретичної міцності привела дослідників до висновку про участь дислокацій у деформації кристалів. Розглянемо механізм ковзання шляхом руху дислокацій. На рисунку 2.5,а зображено кристалічну ґратку, в якій присутня крайова дислокація.

На площині ковзання обривається розташована вертикально зайва напівплощина (тобто знаходиться ядро крайової дислокації). При русі дислокації уздовж площини ковзання від одного вузла ґратки до іншого ядро здійснює невелике переміщення. В результаті зайва напівплощина, що займала певне положення в кристалічній ґратці, з'єднується з атомною площиною, що знаходиться під площиною ковзання, а сусідня атомна площина стає зайвою напівплощиною, тобто невелике узгоджене переміщення атомів ядра дислокації є еквівалентним руху дислокації з одного місця в інше (рис. 2.5,б).

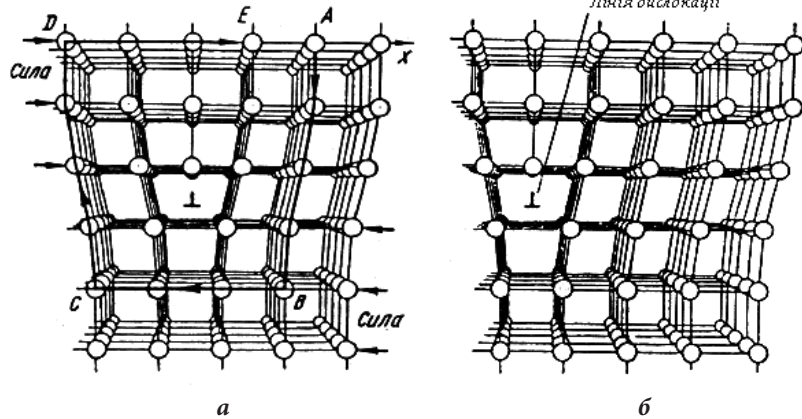


Рисунок 2.5 – Механізм руху крайової дислокації в кристалі вздовж площини ковзання

На рисунку 2.6 зображено, як після проходження дислокації через кристал одна з площин кристалічної ґратки зсувається відносно іншої.

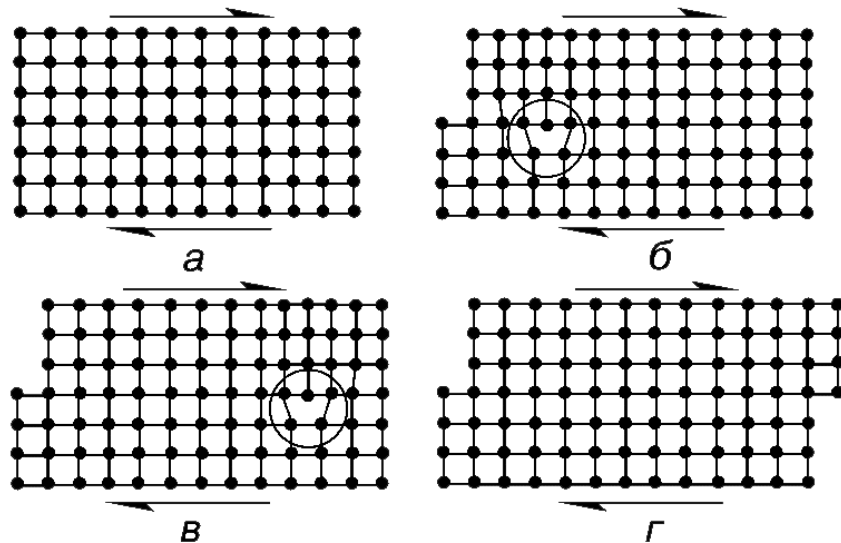


Рисунок 2.6 – Утворення залишкової деформації зсуву, яка утворюється при русі крайової дислокації через кристал уздовж площини ковзання

2.8 Аналіз діаграм напруження – деформація для різних матеріалів

У підрозділі 2.2 було розглянуто початкову ділянку діаграми «напруження – деформація» (деформація складала приблизно $0,1 \div 0,3\%$). На даній ділянці за різних способів навантаження залежність між напруженням і деформацією прямо пропорційною. Характер залежності змінюється за збільшення прикладеного навантаження. Крива « $\sigma - \epsilon$ » є найважливішою характеристикою механічних властивостей матеріалу (його «паспортом»). Така залежність має різний характер для різних матеріалів і зазнає значних змін під час варіювання температури, структури і т.ін.

На рисунку 2.7 представлено криві «напруження – деформація» для моно- і полікристалів алюмінію.

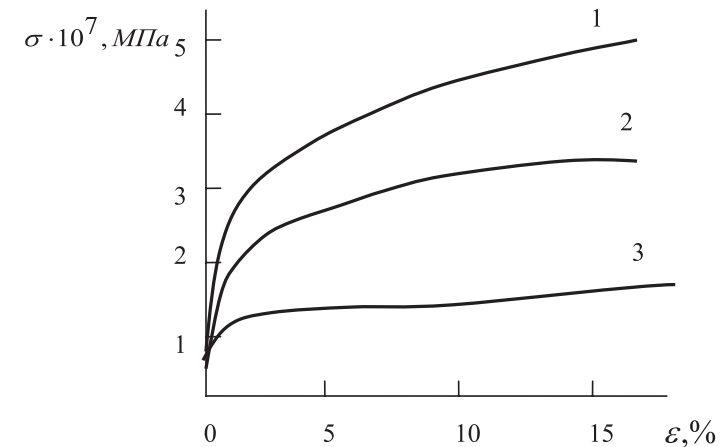


Рисунок 2.7 – Криві «напруження – деформація» для моно- і полікристалів алюмінію

1 – розмір зерен 0,03 мм; 2 – розмір зерен 0,5 мм; 3 – монокристали

Звернемо увагу на криву 3. Вона має майже горизонтальну ділянку (так звана «площадка текучості»), що є характерним в основному для монокристалів, але за деяких умов може характеризувати й полікристалічні метали (Cu, Fe та ін.).

У багатьох матеріалів «площадка текучості» відсутня, при цьому залежність « $\sigma - \epsilon$ » має параболічний характер. Це стосується й бетону (рис. 2.2).

Для аналізу різних ділянок діаграми «напруження – деформація», на рисунку 2.8 наведено теоретичну залежність « $\sigma - \epsilon$ », де початкова ділянка малих деформацій витягнена вздовж горизонтальної осі, а інші ділянки – вздовж вер-

тикальної осі. Звернемо увагу на характерні точки й ділянки цієї залежності.

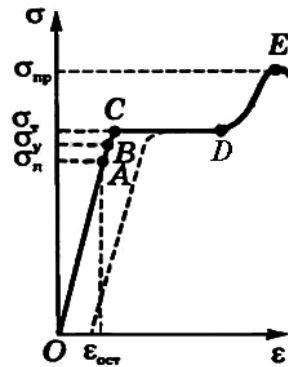


Рисунок 2.8 – Теоретична залежність «напруження – деформація»

Точка А позначає границю пропорційності (вводиться умовно, між пружною і пластичною деформаціями), точка В – границю пружності (напруження, що відповідає деформації 0,02%), точка С – границя текучості (напруження, що відповідає залишковій деформації 0,2%). Ділянка CD – «площадка текучості» (ділянка легкого ковзання, що характеризується малим опором пластичній деформації). Ділянка DE зображує деформаційне зміцнення, що характеризується зростанням опору матеріалу деформації. Точка Е позначає найбільший опір зміні форми, яка не відновлюється, для будівельних матеріалів це напруження позначається через R.

Легке ковзання («площадка текучості») обумовлюється рухом дислокацій. Механізм ковзання шляхом руху дислокацій описаний в підрозділі 2.7. Низька міцність звичайних кристалів пояснюється рухом дислокацій, цей факт можна довести на підставі результатів досліджень механічних властивостей тонких монокристалічних бездислокаційних ниток – «вусів», здатних витримувати напруження зсуву $\sigma = G/20$, яке є на декілька порядків вищим, ніж для звичайних кристалів і близько до розрахункових значень теоретичної міцності (розділ 2.6).

При аналізі кривих «напруження – деформація» для різних матеріалів було звернено увагу, що опір матеріалу зростає відповідно до збільшення значень пластичної деформації (ділянка деформаційного зміцнення). Спочатку (за малих навантажень) пластична деформація відбувається відносно легко, але потім потрібно прикладати все більше напруження для її здійснення.

Деформаційне зміцнення також пояснюється теорією дислокацій. Як згадувалося, наявність дислокацій необхідна для виникнення пластичної деформації і сприяє легкій пластичній течії матеріалів, але при великій

кількості вони збільшують міцність матеріалу. Завдяки взаємодії дислокацій одна з одною і з іншими дефектами відбувається гальмування руху дислокацій.

Деформаційне зміцнення виконує важливу роль в інженерній практиці:

1) воно є способом підвищення міцності, 2) зміна властивостей матеріалу при деформації вимагає вживання заходів обережності для запобігання розтріскуванню матеріалу в результаті втрати ним пластичності.

2.9 Границя міцності. Шляхи підвищення міцності

Міцність – це здатність матеріалу чинити опір руйнуванню і незворотній зміні форми. Міра міцності – це границя міцності, напруження, що відповідає навантаженню, за якого матеріал починає руйнуватися. В пластичних, тобто в'язких матеріалах за такого напруження на ділянці майбутнього розриву починається утворення «шийки» – значного видовження і одночасно зменшення площі поперечного перерізу.

Міцність матеріалів змінюється в широких межах. Наприклад, типові значення границі міцності для заліза і сталі приблизно становлять 300 МПа і 790 МПа відповідно. Для бетону це значення за стиснення становить приблизно 50 МПа. Реальна міцність виробу обмежується або виникненням пластичної текучості (мала міцність), або крихким руйнуванням матеріалу (велика міцність). В ідеальному випадку слід було б поліпшити обидві ці характеристики, проте повною мірою це здійснити неможливо, оскільки підвищення міцності є результатом зниження пластичності.

Пластична деформація звичайно відбувається шляхом переміщення дислокацій, тому зміцнити матеріал можна або створенням бездислокаційної структури, або введенням перешкод на шляху руху дислокацій. Бездислокаційні матеріали, наприклад, ниткоподібні металеві кристали, мають високу міцність, оскільки ковзання в них відбувається лише в результаті одночасного зсуву всіх атомів, розташованих в даній площині. Проте прагнення підвищити міцність матеріалу таким шляхом не завжди є доцільним. Відзначимо, що міцні ниткоподібні кристали можна вводити до композиційного матеріалу як армуючу складову (рис. 2.10).

Частіш за все зміцнення здійснюється за допомогою процесів, які впливають на створення структури і, таким чином, впливають на рух дислокацій. До таких процесів відносяться: легування, механічна деформація, різні перетворення в твердому стані.

У будівництві широко використовується такий традиційний матеріал, як залізобетон. Але, якщо на початку ХХ століття при розрахунку залізобетонних конструкцій значення допустимого напруження для бетону обирали таким, щоб воно не перевищувало 5 МПа, а для сталі 105 – МПа, завдяки розвитку технологій виготовлення бетону й арматурних сталей, у процесі виробництва

залізобетону використовуються бетони з нормативним опором руйнуванню більшим за 100 МПа, а сталі приблизно рівним 1000 МПа.

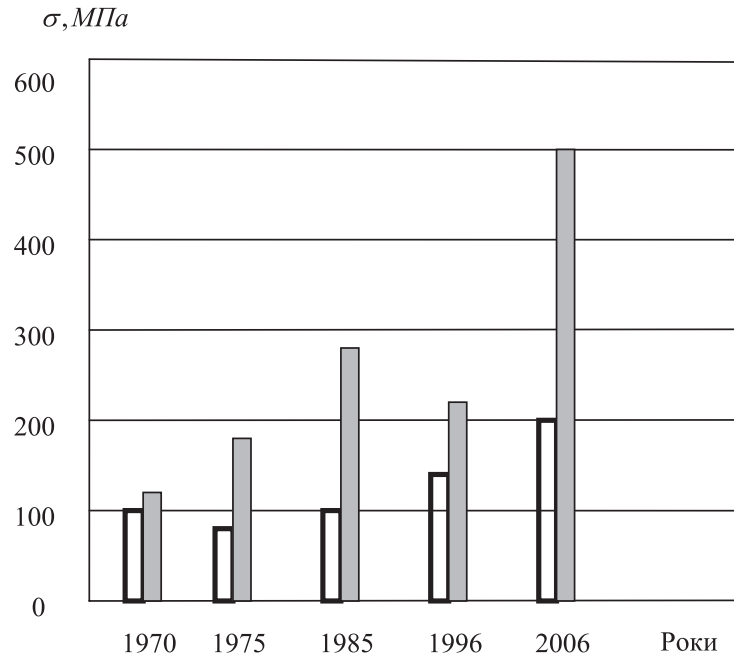


Рисунок. 2.9. Динаміка розвитку технології виготовлення високоміцних бетонів

□ - одержані на об'єктах, ■ - одержані в лабораторіях (світова практика)

На діаграмі, наведеній на рисунку 2.9, показано, як змінювалася міцність бетону протягом останніх років. Слід зазначити, що на сьогодні немає чіткого визначення, який бетон слід віднести до високоміцного. За деякими даними, високоміцним вважається бетон з границею міцності більшою за 120 МПа, так як у такому бетоні змінюється характер руйнування за стиснення (бетон стає крихким).

Існує багато технологічних способів підвищення міцності бетону. З фізичної точки зору доцільне застосування мікрволокон, що підвищують границю міцності матеріалу за рахунок ефекту об'ємного дисперсійного армування. Приклад зміцнення мідної матриці волокнами з вольфраму наведено на рисунку 2.10 (детально дане питання розглядається в третьому розділі).

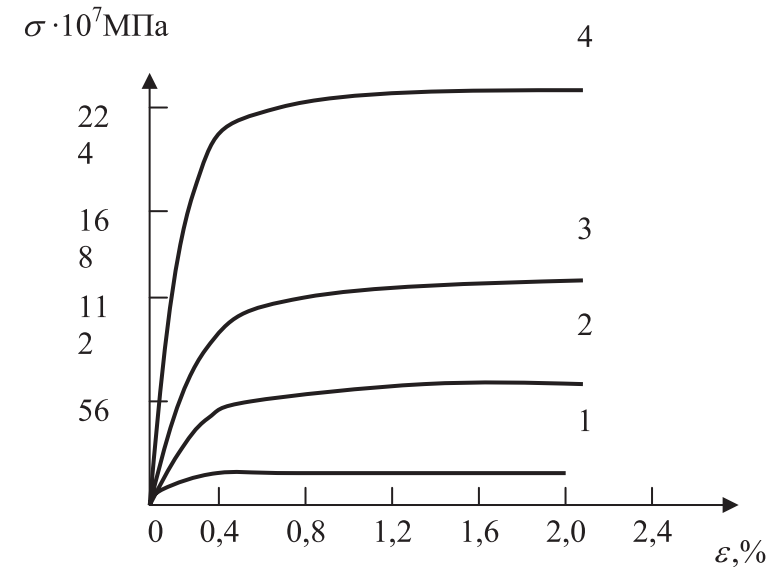


Рисунок 2.10 – криві « $\sigma - \epsilon$ » композиційного матеріалу (мідь, армована вольфрамовими волокнами)

1 – мідь; 2 – об'ємна частка волокон W 11,9%;
3 – об'ємна частка волокон W 46,5%; 4 – вольфрамове волокно

2.10 Механічне руйнування під дією прикладеного навантаження

Уся історія механіки – це боротьба з тріщинами. За рахунок енергії, накопиченої за пружної деформації, можуть утворюватись нові поверхні або тріщини.

Розрізняють два види руйнування: крихке і пластичне. У першому випадку пластичної деформації не існує або вона маленька (квазікрихке руйнування). Звичайно прагнуть запобігти крихкому руйнуванню, оскільки це може бути непередбаченою та катастрофічною подією. Проте в деяких випадках крихке руйнування є корисним, наприклад, при подрібненні гірських порід. У другому випадку є значна пластична деформація, при цьому до початку руйнування можуть утворюватись внутрішні дефекти структури. Енергія, необхідна для пластичної деформації, може в 1000 разів перевищувати енергію, необхідну для крихкого руйнування.

При зниженні температури характер руйнування матеріалу змінюється (має місце перехід від в'язкого руйнування до крихкого). Крихке руйнування

матеріалу може відбуватися або шляхом сколу по певних кристалографічних площинах, межах зерен, межах розділу фаз у композиційних матеріалах (шляхом розповсюдження так званих силових тріщин), або шляхом збільшення тріщин, що утворилися в результаті руху і взаємодії дислокацій. Прикладами руйнування шляхом сколу є розщеплювання слюди та скол графіту.

У випадку дислокаційного механізму руйнування можна виділити три стадії розвитку тріщин:

1. Утворення зародків тріщин шляхом об'єднання дислокацій (часто мікротріщини присутні в початковому матеріалі до навантаження).
2. Докритична стадія – повільне збільшення тріщин, за якого опір зовнішній дії залишається практично сталим.
3. Закритична стадія – лавиноподібне збільшення розтинаючої однієї або декількох тріщин, що були або виникли в матеріалі при збільшенні навантаження.

2.11 Критерій Гріффітса

Основи механіки крихкого руйнування створив у 1920 році англійський вчений А.Гріффітс. Він довів, що збільшення тріщини виявляється енергетично вигідним. Тріщина, як і розріз, викликає концентрацію напружень біля її вершини, де напруження значно більші, ніж очікувані за простого зменшення площі перерізу зразка. Напруження біля вершини тріщини, залежить від прикладеного напруження, довжини (глибини) тріщини, і радіуса кривизни біля вершини тріщини. Розподіл напружень біля вершини тріщини наведено на рисунку 2.11.

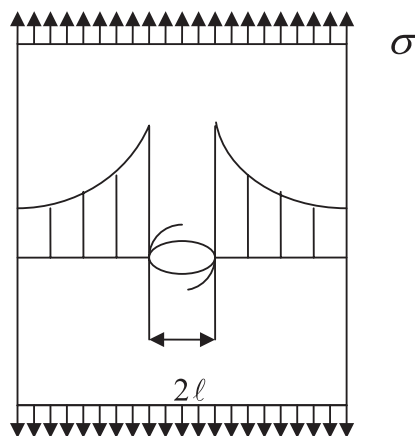


Рисунок 2.11 – Концентрація напружень у пластині

Як довів Гріффітс, напруження біля вершини тріщини можна розрахувати за формулою

$$\sigma_k = 2\sigma \sqrt{\frac{\ell}{r}}. \quad (2.10)$$

Концентрація напружень різко збільшується, якщо радіус кривизни біля вершини тріщини за розміром стає сумірним із радіусом атома. При цьому відношення напружень $\frac{\sigma_k}{\sigma}$ може досягати 10^2 і навіть 10^3 .

У випадку, якщо напруження біля вершини хоча б однієї з тріщин досягає теоретично небезпечної величини, тріщина, яка до цього не збільшувалася, починає катастрофічно поглиблюватися. Тріщина начебто розрізає атомні ланцюжки, при цьому значна частина навантаження припадає на атомний зв'язок біля кінця тріщини. Таким чином, тріщина (як сказав Дж. Гордон) «є тим інструментом, за допомогою якого прикладена слабка зовнішня сила розриває могутні міжатомні зв'язки» [7].

При руйнуванні без істотної пластичної деформації необхідне повне відділення сусідніх атомів кристалічної ґратки (рис.2.12).

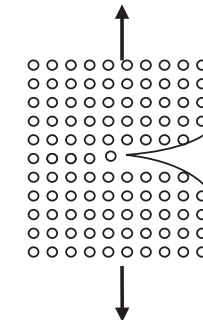


Рисунок 2.12 – Руйнування вздовж кристалографічної площини при сколі

Якщо до розриву прикладене напруження, σ_k , то при цьому буде виконуватись робота (на одиницю площі):

$$A = \sigma_k \cdot r_0, \quad (2.11)$$

де r_0 – міжатомна відстань.

Внаслідок цього виникають дві нові площини, для утворення яких необхідна енергія:

$$\Delta W_{пруж} = \gamma \cdot 2 \ell, \quad (2.12)$$

де γ – поверхнева енергія одиниці площі;

2ℓ – довжина (глибина) тріщини.

Під час розвитку й поширення тріщин матеріал поблизу них розвантажується, внаслідок чого виділяється запасена енергія пружної деформації. З підрозділу 2.2 вже відомо, що пружна енергія на одиницю об'єму визначається рівнянням

$$\Delta W_{\text{пруж.}} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (2.13)$$

де E – модуль Юнга.

Якщо прийняти, що об'єм, у якому виділяється енергія, дорівнює об'єму циліндра одиничної висоти, $V = \pi \ell^2 \cdot 1$, (рис. 2.11), то енергія, що виділяється, складатиме

$$\Delta W_{\text{пруж.}} = -\frac{1 \cdot \pi \ell^2 \sigma_{\kappa}^2}{2E} = -\frac{1}{2} \frac{\pi \ell^2 \sigma_{\kappa}^2}{2E}. \quad (2.14)$$

Дана величина є від'ємною, тому що збільшення тріщини супроводжується вивільненням енергії. Тріщина буде мимоволі збільшуватися, якщо за нескінченно малого зростання її довжини виділятиметься більше пружної енергії, ніж потрібно для утворення двох поверхонь, тобто за $|\Delta W_{\text{пруж.}}| \geq |\Delta W_{\text{нов.}}|$ відбувається зруйнування матеріалу. Зміна загальної енергії при поширенні тріщини в граничному випадку буде дорівнювати нулю (максимум загальної енергії знаходиться за умови, що похідна від загальної енергії по довжині тріщини дорівнює нулю):

$$\frac{dW}{d\ell} = \frac{d(W_{\text{нов.}} + W_{\text{пруж.}})}{d\ell} = \frac{d\left(-\frac{\pi \ell^2 \sigma^2}{2E} + 2\gamma \ell\right)}{d\ell} = 0. \quad (2.15)$$

Розв'язання даного рівняння відносно дозволяє визначити критичне напруження:

$$\sigma_{\kappa} = \left(\frac{2\gamma E}{\pi \ell_{\kappa}}\right)^{1/2}. \quad (2.16)$$

Формула 2.16 має назву критерію Гріффітса (ℓ_{κ} – критична довжина тріщини Гріффітса). Як можна побачити з формули 2.16, необхідне для руйнування напруження σ_{κ} є обернено пропорційним до квадратного кореня з довжини тріщини. Отже, критичне значення напруження у разі поширення тріщини зменшується.

Для даного матеріалу кожному напруженню відповідає своя критична довжина тріщини. Тріщина, довжина (глибина) якої перевищує ℓ_{κ} , може збільшуватися за даного прикладеного напруження із швидкістю 1,5 – 2 км/с.

Значення напруження, необхідного для руйнування є більшим для матеріалів із великим значенням модуля пружності та поверхневої енергії і зменшується за наявності глибоких поверхневих тріщин.

Зусилля, які викликають стиснення, на відміну від зусиль розтягання можуть передаватися через існуючі тріщини, не призводячи до концентрації напружень. В результаті цього крихкі матеріали за стиснення мають вищу міцність, ніж при розтягу. Добре відомо, що бетон використовується в основному за стискуючих навантажень і майже не використовується в умовах розтягу.

2.12 Пластичне руйнування

Теорія Гріффітса ґрунтується на уявленні про зародження тріщин в умовах пружної деформації і не враховує можливості пластичної деформації. Пластична деформація відбувається як до появи тріщини, так і в процесі її поширення і сприяє зростанню радіуса кривизни в вершині тріщини, внаслідок чого роль тріщини як концентратора напруження зменшується.

В'язкий, позбавлений крихкості матеріал перед руйнуванням зазнає великої пластичної деформації, тобто має місце пластичне руйнування. Пластичне (в'язке) руйнування більш сприятливе для уникнення катастрофічного непередбачуваного руйнування.

2.13 Границя міцності бетону при стисненні

Границя міцності при стисненні є основним нормованим показником якості. Оскільки бетон, як і інші будівельні матеріали, є неоднорідним, то границя міцності визначається за середніми арифметичними значеннями результатів вимірювань для серії зразків.

Формування міцності відбувається протягом тривалого часу й за сприятливих умов продовжується десятки років. Це обумовлено так званим «клінкерним фондом» – негідратованим цементом у структурі цементного каменю. Процеси гідратації продовжуються тривалий час.

Основним нормованим показником якості бетону є границя міцності в проектному віці (для портландцементу – це 28 діб).

Границя міцності цементного каменю, як і будь-якого пористого матеріалу, визначається рецептурними й технологічними факторами. Як приклад, на рисунку 2.13 зображено вплив пористості (Π) на міцність.

Базовим зразком для визначення границі міцності бетону при підборі складу в лабораторіях і контролю якості в виробничих умовах є зразок кубічної форми. Розмір зразка залежить від найбільшої крупності заповнювача. За кордоном для визначення міцнісних характеристик використовуються також зразки в вигляді пірамід і призм.

Раніше за своєю міцністю будівельні матеріали розділялися на марки. У нормативних документах марки вказувалися в кгс/м², наприклад, бетон марки М200 (додаток А). Чим вищою є марка, тим вищою буде якість конструктивного будівельного матеріалу.

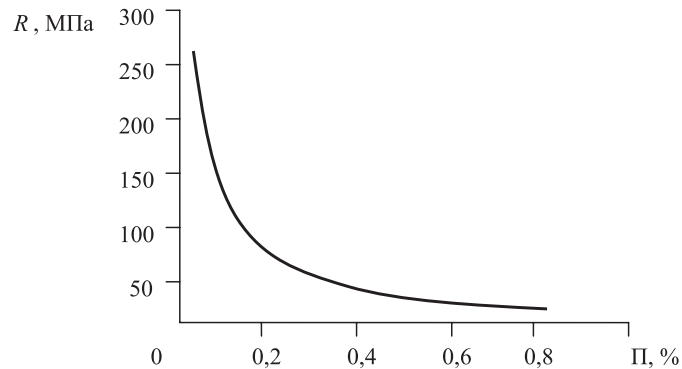


Рисунок 2.13 – Залежність границі міцності бетону від загальної пористості

За теперішніх часів міцність бетону в проектному віці характеризують класами міцності на стиснення і осьове розтягування. Класами називається значення границі міцності з номінального ряду, гарантоване із забезпеченням 0,95, що відповідає значенню кубічної міцності бетону на стиснення в МПа із забезпеченістю 0,95. Клас бетону позначається буквою В англійського алфавіту (від фр. «beton»).

Для бетонів встановлені такі класи за міцністю на стиснення: В 3,5; В 5; В 7,5; В 10; В 12,5; В 15; В 20; В 25; В 30; В 35; В 40; В 45; В 50; В 55; В 60; В 65; В 70; В 75; В 80 (загальний час навантаження не повинен перевищувати 30 секунд). За європейськими нормами (норми EN 206 – 1) класи позначаються через С (від англ. «concrete»).

2.14 Коефіцієнт варіації міцності бетону

Границя міцності бетону одного класу за масового виробництва, навіть за використання одних і тих самих матеріалів не є сталою величиною: від замісу до замісу міцність бетону змінюється у бік збільшення або зменшення від деякої середньої величини. Деяке відхилення значень показників властиві будь-якій однорідній продукції (так звана мінливість однорідної продукції). Статична мінливість границі міцності бетону залежить від неточності дозування, неоднорідності ущільнення та інших чинників. Величина, яка визначається відношенням середнього квадратичного відхилення, S , до середнього арифметичного значення міцності, називається коефіцієнтом варіації:

$$C_v = \frac{S}{\bar{R}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (R_i - \bar{R})^2}{n-1}}}{\bar{R}}, \quad (2.17)$$

де n – число вимірювань,
 R_i – поточне значення міцності.

Середньогалузеве значення коефіцієнта варіації міцності бетону складає $C_v = 13,5\%$. Зв'язок між гарантованою міцністю, яка визначається класом бетону В, і середньою міцністю в партії, \bar{R}_y , задається рівнянням:

$$\bar{R}_y = \frac{B}{1 - 1,64C_v}. \quad (2.18)$$

Коефіцієнт варіації міцності, C_v , залежить від класу бетону. Це обумовлено сталістю значення середньоквадратичного відхилення, що не перевищує 4МПа для бетонів високих класів, починаючи з бетону класу В25 (рис. 2.14).

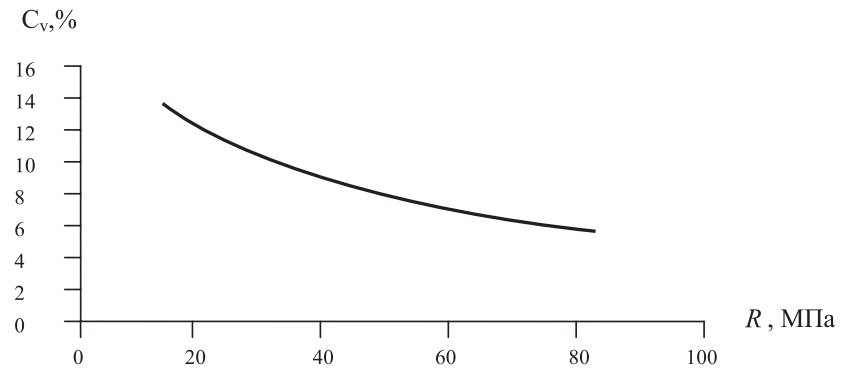


Рисунок 2.14 – Залежність коефіцієнта варіації міцності від міцності бетону

2.15 Фізичні основи механізму руйнування бетону за стиснення.

На будь-якому рівні структура бетону може розглядатися як система «матриця – контактна зона – заповнювач». Через відмінність фізичних властивостей матриці, контактної зони і заповнювача структура бетону є фізично неоднорідною, що обумовлює наявність у структурі поля напружень.

Під дією зовнішнього навантаження в структурі бетону виникає додаткове зовнішнє поле напружень, яке при суперпозиції з власним полем обумовлює неоднорідний напружено – деформований стан бетону.

При цьому відношення діючого локального напруження в будь-якій точці до рівня локальної міцності в даній точці буде різним. У зв'язку з цим руйнування бетону під час дії навантаження відбуватиметься не одночасно в усіх точках зразка, а в першу чергу в найбільш навантажених, де рівень напружень досягає значення локальної міцності. Тому процес руйнування

розглядається як процес утворення й розвитку мікротріщин та їх об'єднання у макротріщини. Мікротріщини в бетоні при стисненні фіксуються при рівні напружень приблизно $0,13 R$.

За навантаження бетонного зразка центральним осьовим стискуючим навантаженням відбувається стиснення зразка у напрямку дії навантаження. В поперечному напрямку виникають розтягуючі напруження, тому має місце розширення в поперечному напрямку (рис. 2.15,а).

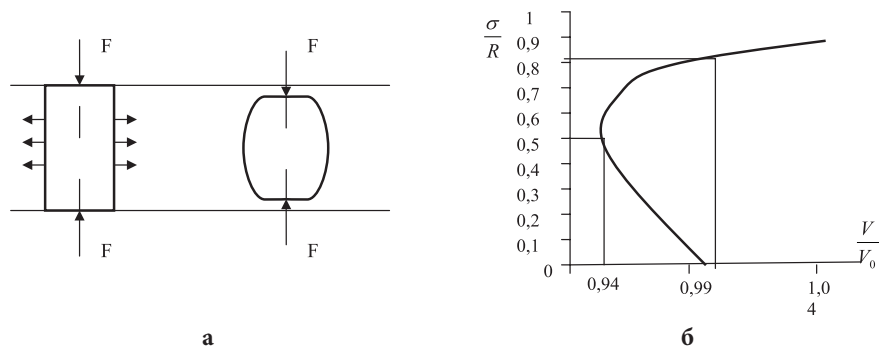


Рисунок 2.15

а – схема руйнування;

б – схема зміни об'єму зразка за центрального осьового стиснення.

Згідно з теорією О.Я. Берга, який вперше описав приведену схему руйнування, мінімальне значення об'єму зразка V відповідає початку розвитку мікротріщин у бетоні, перш за все в контактній зоні цементного каменю із заповнювачем (так звана нижня межа утворення мікротріщин). Рівень напруження, за якого об'єм зразка стає знову початковим, V_0 , відповідає утворенню магістральної макротріщини. Утворення макротріщини фактично призводить до розділення зразка як мінімум на дві самостійні частини.

Характер руйнування залежить від значення сили тертя між опорними гранями зразка та плитами преса. Якщо сила тертя є великою, то опорні грані утримуються від поперечного ковзання, тому середня частина зразка руйнується в першу чергу (рис. 2.16,а). Якщо змастити опорні грані куба (наприклад, натерти парафіном), куб завдяки вільному поперечному розширенню розпадається на ряд шарів, поділених вертикальними тріщинами (рис.2.16,б).

У неоднорідному матеріалі, яким є бетон, тріщини можуть розповсюджуватися не тільки в одному з матеріалів-компонентів (матриця, наповнювач), але й по зоні контакту. Якщо стійкість до тріщин контактної зони є достатньо великою (її міцність є вищою за міцність у кожного з матеріалів), то тріщина,

що існує на поверхні контакту, буде поширюватись всередину одного або обох матеріалів, а не по поверхні контакту. Якщо стійкість контактної зони є недостатньою, то тріщина поширюється по поверхні контакту.

Розподіл напружень в бетоні в залежності від ступеня жорсткості включень і матриці методом фотопружності вивчав І.Н. Ахвердов. Він довів експериментально, що в бетоні залежно від співвідношень компонентів і характеристик контактної зони тріщини можуть розвиватися в різних зонах матеріалу.

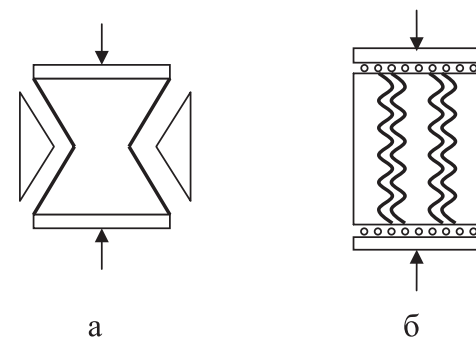


Рисунок 2.16 – схема руйнування крихких бетонів

а – за стиснення куба із закріпленими опорними гранями,

б – за стиснення куба з вільними опорними гранями

2.16 Фізичні методи оцінювання міцності бетону

Існує багато неруйнівних методів оцінювання якості будівельних матеріалів і виробів (зокрема з бетону), які детально розглянуті в [12]. Нижче наведено опис трьох широко використовуваних методів оцінювання міцності бетону, два з яких відносяться до методу локального руйнування (методом механічного випробування), а один – до методу фізичного неруйнівного контролю якості.

Зупинимося на використанні методів локального руйнування. В процесі проведення останніх експлуатаційні якості конструкції в цілому не погіршуються або незначно погіршуються. Існують такі методи механічних випробувань: метод пружного відскоку, метод пластичних деформацій і метод локальних руйнувань.

Метод пружного відскоку ґрунтується на залежності між характеристиками пружної деформації матеріалу й властивостями міцності на стиск. Конструктивні особливості приладів для проведення випробувань даним

методом визначає один із двох різних принципів: відскоку бойка від ударника-ковадла, притисненого до поверхні випробовуваного матеріалу, і відскоку від поверхні самого матеріалу. Використовують переважно прилади, сконструйовані за першим принципом, наприклад, молоток Шмідта. Основною частиною цього приладу є порожнистий циліндр, усередині якого є спіральна пружина. Пружина охоплює напрямний стержень, уздовж якого може пересуватися бойок. Прилад закінчується ударником з наконечником із загартованої сталі. Перед початком кожного випробування пружині надають однакової потенціальної енергії (для звичайних об'єктів – приблизно 2 Дж). Приведений до руху звільненою пружиною наконечник б'ється об поверхню бетону й відскакує. Уздовж лінії відскакування знаходиться шкала (її довжина складає 75 мм, кількість поділок – 100), відлік роблять у поділках шкали. Висота відскоку залежить від пружних властивостей матеріалу. Деформації зазнає шар бетону завтовшки 30...40 мм. Міцність матеріалу на стиск визначають за градувальною кривою, яка описує залежність границі міцності від висоти відскоку наконечника.

За збільшення твердості поверхні бетону частина енергії удару, яка визначає відскок, буде більшою, тобто міцність бетону тим більша, чим більший відскок.

Методи пластичних деформацій ґрунтуються на оцінюванні локальних деформацій, спричинених прикладеними до деталі конструкції зосередженими навантаженнями. Використовують залежність розмірів відбитка, одержаного на поверхні досліджуваного матеріалу внаслідок вдавлювання в нього індентора, від міцнісних характеристик матеріалу. Таке вдавлювання можна виконати або статичним, або динамічним впливом. Для визначення міцності за діаметром відбитка також використовується калібрувальний графік. Якщо твердість поверхні бетону збільшується, діаметр відбитка зменшується, тобто міцність бетону тим менша, чим більший діаметр відбитка. Перевагою розглянутих методів є їхня технологічна простота, а недоліком – те, що міцність матеріалу визначається за станом його тонкого поверхневого шару, товщиною не більше ніж 3-4 см. Метод пластичних деформацій є більш трудомістким, ніж метод пружного відскоку.

У нашій країні використовується також прилад, який є модифікацією молотка Шмідта, – прилад типу КМ (Київський метробуд). За його допомогою можна реалізувати не тільки метод відскоку, а й метод відбитка. Наконечник ударника закінчується індентором у вигляді сталеві кульки. У процесі проведення випробування на поверхні матеріалу (наприклад, бетону) лишається відбиток, діаметр якого, d , вимірюють. У випадку контролю бетонів для підвищення точності вимірювання діаметра поверхню матеріалу посипають крейдою й кладуть на неї копіювальний папір; тоді утворюється контрастний відбиток. Можна зробити інакше: покласти на контрольовану поверхню

аркуш білого паперу, а вже на нього – копіювальний папір. Діаметр відбитка вимірюють за допомогою лупи з десятиразовим збільшенням і ціною поділки 0,1 мм у двох взаємно перпендикулярних напрямках, потім визначають його середнє значення.

Пружину, що рухає наконечник з кулькою, в початковому положенні можна стиснути по-різному, тобто вона може мати різну початкову енергію. Звичайно реалізують одне з двох стандартних значень енергії. Діаметр відбитка повинен дорівнювати 3,5...6,5 мм. Якщо значення діаметра не потрапить до цього діапазону, удар повторюють з іншою енергією.

Для визначення міцності бетону використовують спеціально сконструйовані прилади статичної дії типу штампа НДІЗБ або прилади ударної дії, наприклад прилад (молоток) Кашкарова.

У випадку використання штампа, як і в випадку використання приладу КМ, кладуть аркуш білого й аркуш копіювального паперу. За діаметром, d , відбитка штампа на білому папері, одержаним внаслідок вдавлювання гідравлічним домкратом штампа в бетон, користуючись градувальною кривою залежності діаметра від радіуса штампа і сили вдавлювання, визначають міцність бетону.

Розглянемо приклади розв'язання задач, що ілюструють описані вище методи визначення міцності.

Задача 1. Оцінювання міцності бетону одним із методів неруйнівного контролю якості (методом пружного відскоку) заснована на залежності між границею міцності за стиснення бетону і висотою відскоку бойка від ударника, притиснутого до бетону (рис.2.17,а). Користуючись тарировальною кривою (рис. 2.18,а), визначити міцність бетону, яка відповідає відскоку бойка на 27 мм. Знайти відповідний цьому відскоку коефіцієнт відновлення матеріалу бойка, якщо стиск пружини (від бойка) дорівнює 70 мм.

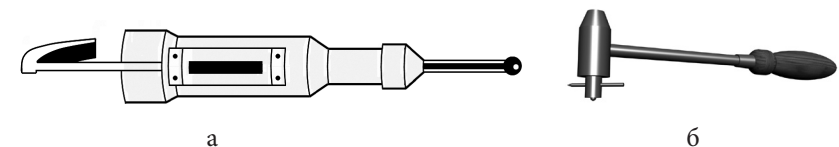


Рисунок 2.17 – прилади для визначення міцності бетону
а – методом пружного відскоку; б – методом відбитку

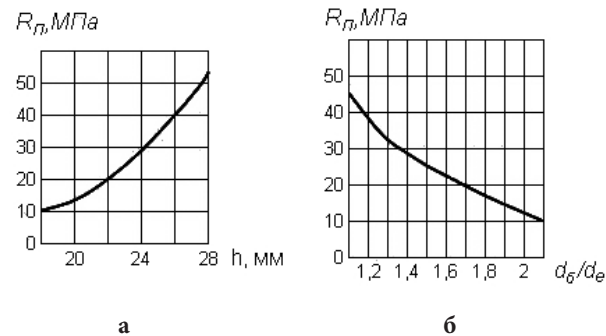


Рисунок 2.18 – Тарирувальні криві для визначення міцності бетону
а – методом пружного відскоку; б – методом відбитку

Розв'язання. Відповідно до тарирувальної кривої (рис.2.18, а) міцність бетону становить 47 МПа, а коефіцієнт відновлення –

$$K = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} = \sqrt{\frac{27}{70}} = 0,62.$$

Звернемо увагу на те, що в цьому і в наступних двох прикладах перед визначенням міцності попередньо були побудовані так звані тарирувальні криві - залежність досліджуваної характеристики від міцності, що одержується в процесі стандартних випробувань контрольних кубів (руйнівний контроль). Це пов'язано з тим, що зміна складу бетону, наприклад, типу заповнювача (щебеню), співвідношення заповнювача й цементу можуть привести до різних характеристик міцності бетону. Тому одержувані результати можуть бути цілком достовірними лише для даної партії виробів. Не маючи тарирувальних кривих, можна тільки орієнтовно оцінити міцність виробу.

Задача 2. За визначення міцності виробу методом відбитка під час удару об поверхню залізобетонної конструкції водночас утворюються два відбитки: перший (діаметром d_6) на бетоні, другий (діаметром d_c) – на введеному в молоток еталонному стержні (рис. 2.17, б). Користуючись тарирувальною кривою (рис. 2.18, б), визначити середнє значення міцності бетону в залізобетонній колоні, якщо за удару молотка одержані відбитки: d_6 : 6,8; 7,0; 6,9; 7,1; 7,3; 6,8; 6,8; 7,2; 7,1; 6,9 мм; d_c : 4,6; 4,8; 4,7; 4,4; 5,0; 4,6; 4,8; 4,4; 4,3; 4,7 мм.

Розв'язання. Відповідно до умови задачі середнє значення відношення складає $d_6 / d_c = 1,5$. Тоді міцність бетону знаходиться за тарирувальною кривою (рис 2.18,б). $R = 27$ МПа.

Перейдемо до оцінювання міцності за використання методів неруйнівного контролю якості. Найбільш розповсюдженим є ультразвуковий імпульсний метод контролю, що відноситься до класу активних акустичних методів.

Нагадаємо, що акустичні методи поділяють на дві великі групи: 1) методи, які ґрунтуються на використанні випромінювання й приймання акустичних хвиль (активні методи); 2) методи, які ґрунтуються тільки на прийманні хвиль (пасивні методи).

Схеми активних методів (рис. 2.19) містять генератор електричних сигналів, 1, випромінювач коливань, 2, об'єкт дослідження, 3, приймач коливань, 4, підсилювач електричних коливань, 5, блок індикації, 6, який реєструє час проходження сигналу крізь об'єкт і зміну форми сигналу внаслідок його взаємодії з об'єктом.

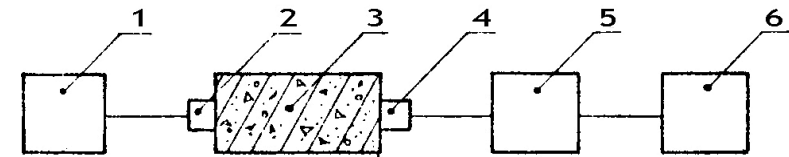


Рисунок 2.19 – Принципова схема активного акустичного методу контролю

Практично за всіх методів акустичного контролю, які використовують біжучі хвилі, застосовують ультразвуковий імпульсний метод.

У практиці визначення міцнісних властивостей бетону вимірюють головним чином швидкість поширення поздовжніх ультразвукових хвиль. Сутність ультразвукового імпульсного методу полягає у визначенні швидкості проходження крізь бетон фронту поздовжньої ультразвукової хвилі, v . Для цього необхідно знати час проходження сигналу на ділянці заданої довжини (бази прозвучування). Міцність бетону, R , визначають за побудованою залежністю: $R = f(v)$, так званою, тарирувальною кривою. Існує ультразвукова апаратура, яка дає змогу реєструвати результати вимірювань в одиницях міцності бетону.

Розглянемо приклад, який ілюструє один із ультразвукових способів визначення міцності.

Задача 3. Визначити динамічний модуль пружності й міцність бетонного зразка розмірами $(7 \times 7 \times 21,4)$ см³, якщо час проходження ультразвукового імпульсу через зразок 56,3 мкс. Тарирувальна крива для знаходження міцності бетону за швидкістю ультразвуку – на рис 2.20. Густина бетону 1400 кг/м³.

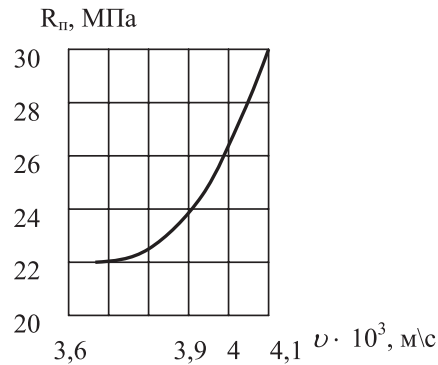


Рисунок 2.20 – Тарирувальна крива для знаходження міцності бетону за швидкістю ультразвуку

Розв'язання. Швидкість ультразвукової хвилі визначається відношенням довжини зразка бази прозвучування до часу проходження сигналу:

$$v = \frac{\ell}{t} = \frac{21,4 \cdot 10^{-2}}{56,3 \cdot 10^{-6}} = 3,8 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Динамічний модуль пружності, E_d , згідно з формулою (2.9) визначається так:

$$E_d = \rho \cdot v^2 = 20,2 \text{ (ГПа)}.$$

Міцність бетону, знайдена за тарирувальною кривою (рис.2.20), складає 22,7 МПа.

Розділ 3. НАНОСТРУКТУРОВАНІ ОБ'ЄКТИ. НАНОТЕХНОЛОГІЇ В БУДІВНИЦТВІ

3.1 Загальні положення

Ще 30-40 років тому найперспективніші науково-технічні галузі у більшості людей ототожнювалися з терміном (виразом) «мікро»: мікроелектроніка, пізніше мікропроцесорна техніка, мікродомішки, дослідження матеріалів на мікрорівні.

Сьогодні все частіше використовується термін «нано» (що в перекладі з грецької означає «карлик»). Ще недавно терміни «нанокристали», «нанотехнології» були відомі тільки вузькому колу фахівців, а сьогодні вони стали звичними для всіх. Можна сказати, що раніше люди мали справу з об'єктами розміром приблизно 10^{-6} м, тоді як сьогодні такий розмір становить 10^{-9} м. «Метричне» визначення нанооб'єктів пов'язане з тим, що зменшення розміру кристалів до деякого критичного значення призводить до значної зміни їх властивостей. Такі ефекти найвиразніше спостерігаються за розмірів 10 нм.

Як свідчать численні дослідження, властивості нанокристалічних структур відрізняються як від властивостей окремих атомів і молекул, так і від властивостей масивних тіл, що складаються з величезного числа частинок. Можна сказати, що нанорозмірні структури займають проміжне положення між мікрооб'єктами й окремими атомами.

Характерною ознакою наноструктурованих об'єктів є самоорганізація, «самозбірка» речовини на атомно-молекулярному рівні без безпосередньої участі людини (наприклад, утворення молекулярних кластерів типу фуллерену).

Розуміння закономірностей об'єднання атомів і молекул в нанорозмірні утворення, здатність контролювати умови такого об'єднання дозволяють сформулювати велику кількість нових наноструктур, вивчати нові явища і властивості самих нанооб'єктів і на основі цього створювати нові матеріали.

Науковий інтерес до нанокompatитних структур викликаний в першу чергу очікуванням різних розмірних ефектів для частинок, розміри яких не

перевищують відповідного масштабу для певного фізичного явища, тобто співвідносні значенню характерної довжини або менші значення величини, що фігурує в теоретичному описі будь-якої властивості або процесу (наприклад, довжина вільного пробігу електронів, довжина хвиль пружних коливань і т.ін.). У широкому розумінні під розмірними ефектами мають на увазі комплекс явищ, пов'язаних із зміною властивостей речовин за зменшення розмірів до малих атомних сегрегацій та зростання ролі поверхневої енергії, що відбувається одночасно. При цьому принципово змінюється сутність фізичних явищ, які лежать в основі властивостей наноматеріалів. Для пояснення властивостей необхідний перехід від законів класичної ньютонівської механіки до квантової теорії, і відповідно розгляд таких фізичних об'єктів, як атоми (квантові точки), ланцюжки атомів (одновимірні наноструктури), тонкі плівки (двовимірні ґратки), а також тривимірні об'ємні ґратки.

Нанокристалічні стани твердих тіл вивчають, досліджуючи будову та властивості або малих атомних агрегацій, які мають назву молекулярних кластерів і містять менше 10^3 атомів, або компактних матеріалів, що включають молекулярні кластери або утворення з них. Відзначимо, що нанокристалічними називають полікристалічні наддрібнозернисті матеріали з розміром зерен меншим за 40 нм.

Властивості ізольованих наночастинок вивчають з початку ХХ століття. У 1931 році був створений електронний мікроскоп, що дозволив вивчати нанооб'єкти, а в 1959 році американський фізик Р. Фейнман зробив доповідь, в якій звернув увагу на проблему мініатюризації різних пристроїв, актуальну й у фізичній електроніці, і в машинобудуванні, і в інформатиці. Робота Р. Фейнмана вважається основоположною в галузі нанотехнологій. Інтенсивне дослідження компактних нанокристалічних речовин почалося після того, як німецькі фізики Г. Бінніг і Е. Руска, а також швейцарський фізик Г. Рорер розробили методи отримання компактних наноматеріалів і був створений скануючий зондовий мікроскоп, що дозволив побачити окремі атоми, а через 10 років і маніпулювати ними (Нобелівська премія 1986 р.).

Окрім наукового інтересу, наноматеріали викликають великий прикладний технологічний інтерес. У широкому значенні слова під нанотехнологіями розуміють будь-які операції з об'єктами, що мають розмір $\approx 10^{-9}$ м.

Відзначимо, що відмінність властивостей малих частинок від властивостей матеріалу в цілому відома давно і використовується в різних галузях техніки (раніше використовувався термін «ультрадисперсні системи»). Наприклад, як уже згадувалося, ниткоподібні монокристали і полікристали (волокна або «вуси»), що характеризуються надвисокою міцністю, використовуються як наповнювачі легких композиційних матеріалів. Дуже важливе застосування малих частинок металів і сплавів для каталіз-хімічних реакцій у промисловій хімії.

Виділимо основні напрямки сучасного розвитку нанотехнологій.

1 Створення матеріалів з окремих атомів шляхом самозбірки без прямої участі людини (технологія bottom up – «знизу догори»). Таким способом уже одержані прості молекулярні конструкції (весь світ облетіла «нанофотографія» - слово, «написане» окремими атомами ксенону на поверхні монокристала нікелю).

2 Мініатюризація електронних приладів. Зменшення розмірів електричних пристроїв (поява нанодіодів, нанотріодів і т.ін.) веде до створення могутніх процесорів і модулів пам'яті великої ємності. В даний час розміри наноелектронних напівпровідникових пристроїв у перерізі складають 200-300 атомів. Маленький розмір (наприклад, розмір нанотранзистора становить 50 нм) призводить до того, що в наноелектричних пристроях міжелектродна відстань є меншою за довжину вільного пробігу електронів у повітрі, тому нановироби не вимагають вакуумних оболонок.

Наночастинки й наносири вже широко застосовуються у виробництві сучасних електронних приладів на основі наноелектронної елементної бази. Прикладом є шаруваті наноструктури, в яких чергуються надтонкі шари двох різних речовин: оксидів, товщиною від кількох до ста параметрів кристалічних ґраток. Подібна структура є кристалом, у якому разом із звичними ґратками, утвореними періодично розташованими атомами, існує надґратка з шарів різного складу, що повторюються. Завдяки тому, що товщина наносири порівнянна з дебройлівською довжиною хвилі електрона, в надґратках реалізується квантовий розмірний ефект. Використання ефекту розмірного квантування в подібних наноструктурах дозволяє вдосконалювати електронні пристрої (підвищувати швидкість, збільшувати інформаційну пам'ять і т.ін.). У теперішній час виготовляють наноелектронні чіпи для виробництва мікросхем пам'яті, ємність яких становить десятки гігабайт.

3 Поліпшення і створення нових властивостей матеріалів, у тому числі й будівельних. Прикладний технологічний інтерес до наноматеріалів викликаний можливістю значної модифікації і навіть принципової зміни властивостей відомих матеріалів, а також новими можливостями, що відкривають нанотехнології в створенні матеріалів і виробів, які містять структурні елементи нанометрового розміру. Можна стверджувати, що створення технологій управління властивостями твердих тіл, заснованих на включенні до їх складу нанорозмірних частинок, є на сьогодні однією з головних матеріалознавчих проблем, вирішуваних провідними науковими центрами світу.

Відзначимо, що за останні 25 років дослідження в галузі наноструктурованих об'єктів були тричі відмічені присудженням Нобелівської премії. Починаючи з 2000 року, програми розвитку нанотехнологій діють в багатьох розвинених країнах світу.

3.2 Об'ємні й нанокристалічні фази Карбону (графіт, алмаз, карбін, фуллерен, нанотрубки, графен)

Розглянемо структури та властивості молекулярних кластерів – нової структурної модифікації речовини. Найбільш відомі наноструктури Карбону. Карбон – найлегший з елементів, що мають чотири валентних електрони. До 1971 року вважалося, що існують лише дві структурні модифікації Карбону, відомі з давніх часів: графіт і алмаз. Як було відмічено у підрозділі 1.2, графіт є шаруватою структурою. «Складчасті» шари розташовуються один над одним, повторюючись через кожні два шари. Кожен шар складається з атомів Карбону, розташованих у вузлах плоских осередків, що мають форму поздовжніх шестикутників, ковалентно пов'язаних один з одним. Сусідні шари утримуються між собою слабкими силами Ван-дер-Ваальса. Властивості графіту надзвичайно анізотропні. Графіт можна розглядати як двовимірну плоску структуру.

Що ж до алмазу, то його ґратка – це тетраедрична структура, що є жорстким каркасом однієї гігантської молекули (монокристала). Кожен атом зв'язаний міцним ковалентним зв'язком з іншими атомами. Відстань між частинками є сталою і дорівнює 0,15 нм. Алмаз є найтвердішим із природних матеріалів (це тривимірна просторова форма Карбону).

У 1971 році в СРСР був одержаний диплом на відкриття карбіну – ланцюжково-лінійної модифікації Карбону. Він був одержаний штучно, але потім його виявили в природних умовах. Значення Карбону в сучасній науці й техніці неможливо переоцінити. П.Уокер, редактор книжкової серії «Chemistry and Physics of Carbon», 30 років тому назвав Карбон «давно відомим, але завжди новим елементом». І дійсно, з 1986 року інформація про нові структури (наноструктури) з Карбону посипалась як з «рога достатку».

Існування різних наноструктур обумовлене розвинутою поверхнею нанооб'єктів і зміною термодинамічних умов фазових перетворень в даних об'єктах. Найвідомішими наноструктурами Карбону є: фуллерен, нанотрубки, графен. Четвертою, після графіту, алмазу й карбіну аллотропічною формою чистого Карбону є сферична, яка складається з 60 атомів (фуллерен C_{60}), вперше була синтезована в 1985 році. Молекулу фуллерена можна уявити як сферичний багатокутник, складений із 20 шестикутників і 12 п'ятикутників у кожній з його 60 вершин. Така модель нагадує футбольний м'яч діаметром м. Названа дана форма Карбону фуллереном на честь архітектора Б. Фуллера, який в 1959 р. побудував павільйон, каркас якого мав вигляд півсфери, що складався з металевих багатокутників. Учені із США і Великобританії Р. Керл, Х. Крото і Р. Смоллі для отримання фуллерена C_{60} використовували лазерне випаровування графіту в «атмосфері» гелію. За відкриття цієї форми Карбону їм у 1996 році була присуджена Нобелівська премія.

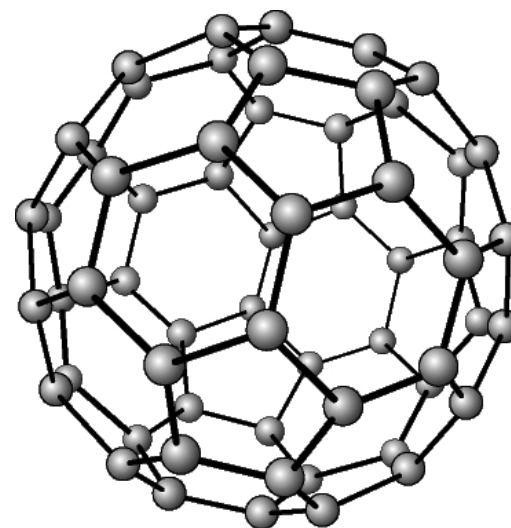


Рисунок 3.1 – Фуллерен

Усередині молекули C_{60} простір пронизаний електромагнітним полем. Геометрична форма молекули C_{60} має схожість із найважливішими біологічними структурами живих організмів: фрагментами молекул ДНК, вірусами і т.ін.

Фуллерен можна розглядати як сферичну форму графіту, оскільки механізми міжатомного скріплення і в фуллерені, і в об'ємному графіті є аналогічними. Перетворення кристалічного фуллерена на алмаз відбувається навіть за кімнатної температури й тиску $\rho = 20$ ГПа, а за нагрівання фуллерена до температури $T = 1500$ К для його перетворення в алмаз достатній тиск $\rho = 7$ ГПа (для аналогічного перетворення графіту на алмаз потрібна температура $T = 1500$ К і тиск 30-50 ГПа).

Фуллерен зустрічається і в природних умовах (мінерал шунгіт). В даний час синтезовано новий клас молекулярних кристалів, що мають склад $M_m C_n$, де M – атом металу (Ti, Zr, Hf, V), m і n – кількість атомів металу і Карбону. Співвідношення $M_m : C_n = 1,5 - 2,0$, атоми металів включені у фуллеренову комірку.

Серед синтезованих молекулярних кристалів центральне місце посідає молекула C_{60} , що має найбільшу стабільність. Фізичні властивості фуллерена і його сполук інтенсивно досліджуються.

Розглянемо приклад, що характеризує незвичайні властивості фуллерена, а саме структурування води гідратованим фуллереном (водним розчином C_{60}).

Як відомо, звичайна вода складається з вільних і впорядкованих молекул. Частина впорядкованих молекул води – це так звані мерехтливі кластери, сферичні утворення, подібні до тих структур води, які властиві живому орга-

нізму. Кластери існують мільярдне частки секунди. Вони то розпадаються, то з'являються знову, за що одержали назву мерехтливих. На відміну від алмазу й графіту, фуллерен розчиняється в органічних розчинниках та в воді.

Для отримання водного розчину фуллерена його спочатку розчиняють в органічному розчиннику, який потім додають у воду і обробляють ультразвуком. При цьому окремі молекули фуллерена «скидають» оболонку з органічного розчинника і «закутуються» водною оболонкою, перетворюючись на гідратований фуллерен. Кожна молекула фуллерену розміром в 1 нм утримує навколо себе впорядкований водний кластер, поперечні розміри якого в 20 – 80 разів більші за розмірами його самого. Таким чином, гідратований фуллерен структурує воду і утримує її в цьому стані дуже довго. Водні розчини фуллерену мають найширший спектр корисних властивостей. Наприклад, якщо для отримання цементного розчину замість води використовувати водний розчин фуллерену, то відбувається збільшення рухливості цементного розчину, внаслідок чого міцність бетону збільшується.

Модифікація методики отримання фуллерену призвела до створення нанотрубок (З. Індзіма, 1991 р.). Нанотрубки містять приблизно 10^6 атомів, мають довжину ≈ 10 мкм (є інформація про одержання нанотрубок довжиною й до 1 см) і діаметр 0,9 нм. Одиначні екземпляри нанотрубок зустрічаються в сажі. Нанотрубки мають високу міцність, тому використовуються для виготовлення зондів тунельного мікроскопа, для армування різних матеріалів. У Японії розроблено матеріал «наногума», що має унікальні в'язко-пружні властивості в інтервалі температур, який перевищує 1000 К.

Перейдемо до розгляду двовимірних кристалів. Нобелівська премія 2011 року присуджена вихідцям із Росії: А. Гейму і К. Новоселову (зараз Андрій Гейм працює в Англії, а Костянтин Новоселов – в Голландії) за «революційні експерименти з двовимірним матеріалом – графеном» (висновок Нобелівського комітету). Графен – це двовимірний кристал товщиною в один атомний шар, який завдяки своїй структурі має незвичайні властивості. Він є цікавим об'єктом і для теоретичних досліджень, і для практики, – застосовується в електроніці. Свого часу Л.Д. Ландау заявляв, що «термодинаміка не допустить існування двовимірних кристалів». У графені кожен атом зв'язаний у площині з трьома електронами, а четвертий, зайвий, забезпечує велику електропровідність матеріалу.

Відстань між атомами графена є меншою, ніж між атомами алмазу (0,14 і 0,15 нм відповідно), тому міцність на розрив графену є більшою, ніж на розрив алмазу. Завдяки високій рухливості електронів графен характеризується високим значенням коефіцієнта теплопровідності (у 5 разів більше, ніж у міді). Висока міцність і велика теплопровідність забезпечать даному матеріалу широке застосування в наноелектроніці (міцні прозорі екрани, відведення тепла від електронних пристроїв і т.ін.)

3.3 Нанотехнології в будівництві

У будівельній індустрії вже почалося використання нанотехнологій. У таблиці 3.1 наведено перелік наночастинок, що знаходять застосування в будівельній практиці.

Основними продуктами нанотехнологій у будівництві в даний час є нанопорошки, різні за розмірами, формою і властивостями. Вони можуть виконувати роль абсорбентів, каталізаторів і модифікаторів хімічних реакцій в матеріалах. Поліпшення властивостей матеріалів, що спостерігається в процесі використання нанопорошків і нанокластерів, пов'язане з фізико-хімічними процесами і явищами, що відбуваються на поверхні взаємодіючих фаз. Для цього на поверхні частинок необхідно сформувати структури, які забезпечують прискорення хімічних реакцій, посилення молекулярної взаємодії і т.ін.

Таблиця 3.1 – Властивості будівельних матеріалів, на які впливають різні наночастинок

Нанокластери	Матеріали та вироби	Властивості
Карбонові нанотрубки	Бетон	Механічна міцність. Запобігання тріщинам
	Кераміка	Поліпшення механічних і теплових властивостей
	Сонячні батареї	Підвищення ефективності
Наночастинки SiO_2	Бетон	Механічна міцність
	Кераміка	Хладоагент, пропускання світла, стійкість до вогню
	Вікна	Вогнезахист, протидивбання
Наночастинки TiO_2	Цемент	Швидка й більш повна гідратація
	Вікна	Супергідрофільність, самоочищення
	Сонячні батареї	Підвищення ефективності
Наночастинки Fe_2O_3	Бетон	Підвищення міцності на стиснення, стійкість до абразивного зносу
Наночастинки Cu	Сталь	Зварюваність, стійкість до корозії, можливість формування

Відзначимо, що розвиток нанотехнологій неможливий без нових підходів щодо проектування і будівництва споруд, де буде налагоджене виробництво nanoоб'єктів. Приміщення, призначені для традиційних промислових виробництв, не відповідають суворим вимогам щодо параметрів повітряного середовища, температурно-вологісного режиму, а також акустичних і анти-

статичних параметрів приміщень, призначених для такого виробництва. Це визначає нові вимоги щодо проектування будівель, обрання матеріалів і технологій, що використовуються в процесі їх зведення.

У зв'язку з тим, що застосування нанооб'єктів у будівництві є досить різноманітним, зупинимося лише на одному аспекті: підвищення міцності бетону за використання нанотехнологій.

Результати використання в будівництві досягнень фундаментальних досліджень нанооб'єктів вже сьогодні виглядає вражаюче. Це створення дослідних зразків бетонів з міцністю 500 – 600 МПа, що більш ніж вдесятеро перевершує міцність звичайних бетонів. При цьому міцність на розтягування складає 70 - 80 % від міцності на стиснення, порівняно з 10 - 15% для звичайного бетону. Отже, створено нові конструкційні матеріали з унікальними міцнісними і деформаційними характеристиками. В нинішній час уже застосовуються на об'єктах і продовжують розроблятися високопластичні бетонні суміші, що дозволяють одержувати високоміцні бетони для підземного й висотного будівництва. Їх міцність складає приблизно 100 МПа.

Як приклад, відзначимо, що в 2011 році в Росії побудований кілометровий міст через Волгу, покриття якого виконане з легкого конструкційного фібробетону на основі базальтової мікрофібри, модифікованої нанокластерами Карбону. Цей матеріал має підвищену міцність на розтяг і є легшим за звичайний бетон (покриття із звичного бетону було б важчим приблизно на 30%).

Зауважимо, що нанобетон почали вивчати приблизно 10 років тому. Один з експериментів полягав у тому, що до бетонної суміші, призначеної для приготування фібробетону, додали нанокластери Карбону в кількості, що не перевищує 10 г/м³. Виявилось, що це кардинально поліпшило властивості розчинів і бетонів, змінило структуру цементного каменю: нанокластери служили центрами кристалізації гідросилікатів і гідроалюмінатів кальцію, підсилюючи ефект дисперсійного армування за рахунок зростання мікрОВОЛОКОН.

Проте широкого впровадження даної технології в промисловість того часу не відбулося, так як виникла проблема рівномірності розподілу декількох грамів нанокластерів у кубічному метрі бетонної суміші. Для її вирішення карбонові нанокластери було запропоновано наносити на поверхню базальтової мікрофібри.

Зараз технологія отримання нанобетонів удосконалена. Відомо, що для збільшення рухливості бетонної суміші та скорочення потреби в воді до суміші терпкої речовини, заповнювача і води додають пластифікуючі добавки. Молекули пластифікаторів абсорбуються на поверхні частинок цементу. Ту саму роль виконують наноініціатори, змішувані з пластифікаторами. За рахунок цього відбувається зростання мікрОВОЛОКОН, тобто має місце внутрішнє молекулярне армування, зменшується потреба в воді, що дозволяє знизити вагу готових виробів, зменшити ймовірність появи тріщин, підвищити зчеплення з арматурою.

Використання суперпластифікаторів у поєднанні з мікро- і нанокремнеземною фіброю дозволяє одержати бетони, міцність яких досягає 500 - 600 МПа.

Розділ 4. ТЕПЛОВІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

4.1 Теплофізичні характеристики матеріалів

Теплові властивості матеріалів визначають на підставі спостереження за їх поведінкою при передачі їм теплової енергії (кількості теплоти, Q , або δQ) зовнішніми джерелами. Основними теплофізичними характеристиками матеріалу, які визначають можливості його практичного застосування, є: теплоємність, коефіцієнти теплопровідності й лінійного розширення.

Згідно з визначенням, теплоємність – це величина, яка дорівнює відношенню кількості теплоти, δQ , що надається тілу, до зміни температури, яка відбулася внаслідок отримання тілом цієї кількості теплоти.

Молярна теплоємність – це кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1 моля речовини на 1 К:

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT}. \quad (4.1)$$

Питома теплоємність – кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1кг речовини на 1К:

$$c = \frac{\delta Q}{mdT}. \quad (4.2)$$

Ураховуючи те, що одержана тілом кількість теплоти використовується тільки на збільшення його внутрішньої енергії (енергії теплового руху молекул) на , відповідно до першого закону термодинаміки: $\delta Q = dU$. Тому молярну теплоємність можна визначити як похідну внутрішньої енергії за температурою:

$$C = \frac{dU}{\nu dT}. \quad (4.3)$$

Коефіцієнт теплопровідності вводиться як коефіцієнт пропорційності в рівнянні Фур'є, що описує перенесення енергії через речовину у формі теплоти (рис. 4.1)

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (4.4)$$

де $q = \frac{\delta Q}{dSdt}$ – густина теплового потоку (величина, яка визначається енергією, що надається тілу у формі теплоти за одиницю часу через одиничну площу перпендикулярно до осі x);

$\frac{dT}{dx}$ – складова градієнта температури, що визначає швидкість змінювання температури на одиницю довжини в напрямку нормалі до даної площі (знак «-» означає, що енергія переноситься у напрямку зниження температури);

λ – коефіцієнт теплопровідності, що чисельно дорівнює густині теплового потоку за одиничного градієнта температури.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення, α , за визначенням дорівнює відносній зміні лінійних розмірів зразка за підвищення його температури на 1К:

$$\alpha = \frac{1}{\ell_0} \cdot \frac{d\ell}{dT}, \quad (4.5)$$

де ℓ_0 – лінійний розмір зразка за температури $T = 273\text{K}$.

В інтервалі високих температур, при яких $\frac{d\ell}{dT} = \text{const}$, зміну лінійних розмірів можна оцінити, користуючись наближеною формулою

$$\ell_0(t) = \ell_0(1 + \alpha t), \quad (4.6)$$

де t – температура, °С.

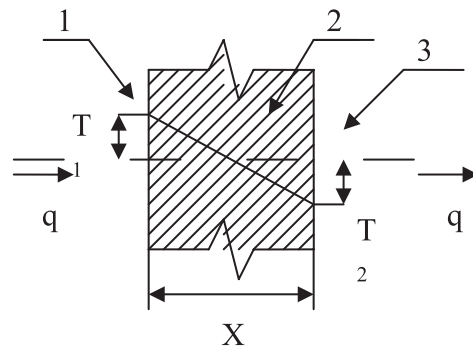


Рисунок 4.1 – Теплопередача через огорожувальну конструкцію
1 – приміщення, що має температуру; 2 – плоска стінка;
3 – навколишнє середовище, що має температуру.

4.2 Класичні уявлення про теплові властивості твердих тіл

Тверде тіло можна розглядати як сукупність окремих частинок (атомів, молекул, іонів), розташованих упорядковано в вузлах кристалічної ґратки (див. підрозділ 1.1). Тепловий рух – це коливання частинок поблизу їх положень рівноваги, яке відбувається за гармонічним законом (за законом синуса або косинуса). Частинка, що здійснює такий рух, називається гармонічним осцилятором. Оскільки кожен атом коливається уздовж трьох координатних осей, йому ставлять у відповідність три незалежні гармонічні осцилятори, а для N атомів їх буде $3N$. Середня енергія гармонічного осцилятора, який має один ступінь вільності, визначається такими чином: $\overline{W}_{(1)} = kT$. Внутрішня енергія всього кристала, що містить атомів, обчислюється за формулою

$$U = 3NkT, \quad (4.7)$$

де k – стала Больцмана.

Внутрішня енергія одного моля речовини

$$U = 3N_A kT = 3RT, \quad (4.8)$$

де N_A – стала Авогадро;

R – універсальна газова стала (для твердого тіла не розрізняються теплоємності за сталого тиску й сталого об'єму, тобто $C_p = C_v$).

Молярна теплоємність обчислюється за формулою

$$C = 3N_A k = 3R. \quad (4.9)$$

Дана формула, згідно з якою молярна теплоємність твердих тіл не залежить від температури, одержала назву закону Дюлонга і Пті.

Дослідні дані узгоджуються з цим результатом лише за високих температур і лише для простих речовин. У твердих тілах, що мають складну будову, в процесі поглинання ними теплової енергії можливі різноманітні рухи атомів (наприклад, обертальний рух), внаслідок чого зростає енергія, необхідна для підвищення температури, тобто збільшується теплоємність.

За низьких температур теплоємність зменшується і за $T \rightarrow 0$ прямує до 0. Цей результат не можна пояснити в рамках класичної теорії. Для його пояснення використовуються уявлення квантової механіки.

4.3 Елементи квантової теорії теплоємності

Енергія, що припадає на один ступінь вільності осцилятора, рух якого підпорядковується законам класичної механіки: $W_{(1)} = kT$. Згідно з положен-

нями квантової механіки можливі значення енергії осцилятора визначаються формулою:

$$W_n = h\nu \left(n + \frac{1}{2}\right), \quad (4.10)$$

де h – стала Планка;

ν – частота;

n – квантове число ($n = 0, 1, 2, \dots$);

При цьому в основному стані ($n = 0$) енергія осцилятора:

$$W_0 = \frac{h\nu}{2}, \quad (4.11)$$

тобто за відсутності теплового руху (за $T = 0$) атоми твердого тіла здійснюють так звані «нульові» коливання, аналога яких не існує в класичній механіці.

Використовуючи методику обчислення середніх значень, вживану в квантовій статистиці, можна знайти середнє значення енергії квантового осцилятора:

$$\overline{W}_n = \frac{h\nu}{2} + \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}. \quad (4.12)$$

На відміну від класичного осцилятора, середня енергія квантового осцилятора залежить від частоти. За високих температур ($kT > h\nu$) виходить класичне значення енергії: $\overline{W}_{(1)} = kT$. У протилежному граничному випадку, коли $kT < h\nu$, середня енергія дорівнює енергії «нульових» коливань:

$$W_0 = \frac{1}{2} h\nu_0.$$

Перейдемо до розгляду моделі теплового руху атомів у твердому тілі з позицій квантової механіки. В квантовій теорії враховується, що між частинками існує взаємодія, якою знехтувати не можна. Проте, не дивлячись на інтенсивну взаємодію частинок, що коливаються, можна вважати, що теплові коливання і в такому випадку є гармонічними, але це коливання не окремих атомів, а коливання з різними частотами всього кристала, що розглядається в розрахунках як пружне середовище.

Теоретичну формулу, що описує залежність теплоємності від температури, в першому наближенні одержав Ейнштейн. Він виходив з того, що коливання всіх атомів відбуваються з однією частотою. За Ейнштейном, теплоємність для 1 моля обчислюється за формулою

$$C = 3R f(\nu, T), \quad (4.13)$$

де $f(\nu, T)$ – функція Ейнштейна.

Це спрощення виявилось надмірним, так як теоретична залежність теплоємності від температури не збігалась з експериментальною за низьких температур.

Дебай уточнив теорію, розроблену Ейнштейном, припустивши, що коливання кристала характеризуються безперервним спектром власних частот осциляторів в межах від 0 до ν_{max} .

Максимально можлива частота коливань, ν_{max} , пов'язана з мінімально можливою довжиною хвилі, що чисельно дорівнює двом періодам ґраток і відповідає максимальній енергії фонона (див. підрозділ 4.4):

$$\nu_{max} = \frac{kT_D}{h}, \quad (4.14)$$

де T_D – температура Дебая.

Формула, яку одержав Дебай, описує температурну залежність теплоємності як в області низьких температур (теплоємність пропорційна T^3 – це закон Дебая), так і в області високих температур (теплоємність не залежить від температури – це закон Дюлонга і Пті). При цьому виявилось, що теплоємність починає помітно відхилятися від закону Дюлонга і Пті за так званої характеристичної температури Дебая, T_D .

Величина температури Дебая, T_D , є фундаментальною характеристикою твердих тіл і вказується в таблицях. Наприклад, для свинцю, міді, германію і алмазу значення T_D складають 90K, 315K, 366K, 1190K відповідно.

Розрахована Дебаєм і Ейнштейном залежність теплоємності твердого тіла від температури зображена на рисунку 4.2.

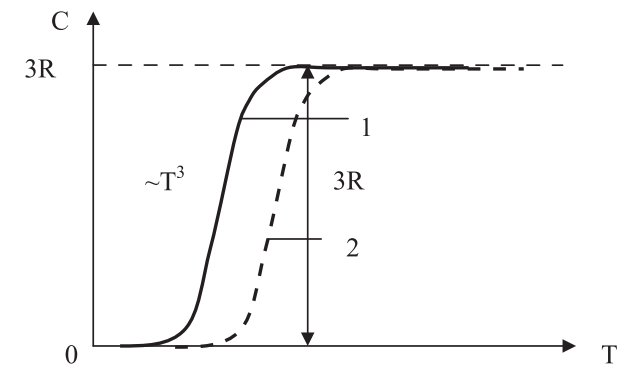


Рисунок 4.2 – Залежність теплоємності від температури
1 – теоретична залежність, розрахована Ейнштейном;
2 – теоретична залежність, розрахована Дебаєм.

4.4 Поняття про фонони

Відповідно до законів квантової механіки при переході квантового осцилятора з одного енергетичного стану в інший квантове число, n , змінюється на одиницю. Тому від час переходу осцилятора із збудженого стану, $n > 1$, в основний, $n = 1$, послідовно змінюється його енергія (найменша порція енергії становить $W_{(1)} = h\nu$). Квант енергії акустичної хвилі назвали фононом. Між світловими частинками (фотонами) і звуковими частинками (фононами) існує формальна аналогія. Але швидкість фононів дорівнює швидкості звуку, і на відміну від фотонів, фонони не можуть існувати поза кристалом, тобто вони є квазічастинками.

Квазічастинки – це особливий вид колективного руху багатьох (а іноді й усіх) частинок системи.

За абсолютного нуля температур система знаходиться в основному стані, тепловий рух відсутній, число фононів дорівнює нулю ($N_\phi = 0$). За підвищення температури система переходить у збуджений стан з дискретними значеннями енергії. У слабо збудженому стані енергію збудження можна подати у вигляді суми енергій елементарних збуджень – фононів. Число фононів пропорційним до температури ($N_\phi \approx T$). «Газ» фононів за низьких температур ($T > T_d$) можна вважати ідеальним.

Оскільки число фононів є невеликим, вони рідко «зіштовхуються» один з одним, з домішковими атомами і дефектами кристалічних ґраток. Тому середня довжина вільного пробігу фононів сумірна з лінійними розмірами кристала і не залежить від температури.

В області високих температур ($T > T_d$) число фононів продовжує збільшуватися, оскільки кожен гармонічний осцилятор випромінює все більшу їх кількість. Імовірність зіткнення фононів один з одним різко збільшується, «газ» квазічастинок стає неідеальним, зростає ймовірність зіткнення фононів з домішками й дефектами кристалічних ґраток. При цьому середня довжина вільного пробігу зменшується обернено пропорційно до температури.

4.5 Залежність коефіцієнта теплопровідності кристалічних ґраток твердих тіл від температури

Класична модель пояснює теплопровідність твердих тіл тим, що атоми або молекули ділянок тіла, де температура є вищою, мають більшу енергію і передають її сусіднім атомам або молекулам, що мають меншу енергію. Температурну залежність коефіцієнта теплопровідності класична теорія пояснити не може.

З позицій квантової механіки основними носіями теплової енергії в кристалічних ґратках є фонони. Із зміною температури значення коефіцієнта теплопровідності змінюється через дві основні причини. За низьких температур ($T \ll T_d$) із зростанням температури збільшується число фононів,

які беруть участь в перенесенні тепла, тому коефіцієнт теплопровідності збільшується. За високих температур ($T \gg T_d$) різко зростає число зіткнень фононів один з одним, у результаті чого значення починають зменшуватися. Тому в середньому інтервалі температур завжди спостерігається максимум залежності, $\lambda = \lambda(T)$ (рис. 4.3).

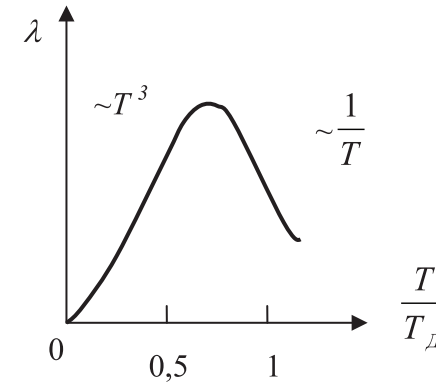


Рисунок 4.3 – Залежність коефіцієнта теплопровідності кристалічних ґраток від температури

Відзначимо також вплив на теплопровідність кристалічних ґраток ангармонізму коливань їх атомів. Чим більшим є параметр ангармонічності (див. підрозділ 4.6), тим більше зіткнень за одиницю часу зазнають фонони, і тим меншою є довжина їх вільного пробігу.

Установлено також, що λ залежить від маси атомів і жорсткості зв'язку між ними. Чим менша маса атомів і чим більша жорсткість їх зв'язку, тим більшим буде значення λ . За кімнатної температури найбільші значення коефіцієнта теплопровідності мають графен ($\lambda \approx \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) і алмаз ($\lambda \approx \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$).

Для кількісного аналізу коефіцієнта теплопровідності будемо виходити з того, що тепло в ґратках переноситься «газом» фононів. Скористаємося рівнянням для коефіцієнта теплопровідності ідеального газу, замінивши вхідні його характеристики на характеристики «газу» фононів:

$$\lambda = \frac{1}{3} \ell_{\text{фон}} \nu_{\text{фон}} c \rho, \quad (4.15)$$

де $\ell_{\text{фон}}$ – середня довжина вільного пробігу фононів;
 $\nu_{\text{фон}}$ – середня швидкість звуку;
 c – питома теплоємність;

ρ – густина.

Розглянемо на основі даної формули залежність коефіцієнта теплопровідності від температури.

За низьких температура $T \ll T_D$ і $\ell_{\text{фон}} = \text{const}$. Оскільки теплоємність є пропорційною кубу температури, а швидкість звуку практично не залежить від температури, то $\lambda \sim T^3$.

За високих температур $T \gg T_D$ і $\ell_{\text{фон}} \sim T^{-1}$; $c = \text{const}$ (згідно з законом Дюлонга – Пті); $v_{\text{фон}} = \text{const}$. Тому, згідно з 4.15, $\lambda \sim T^{-1}$.

Таким чином, уявлення про «газ» фононів дозволяє пояснити експериментальну температурну залежність коефіцієнта теплопровідності кристалічних ґраток.

Розглянута теорія теплових властивостей кристалічних ґраток використовує модельні уявлення про потенціальну енергію взаємодії атомів і про «газ» фононів. Такими спрощеними уявленнями можна обмежитися при описі властивостей діелектриків. У випадку металів разом із внеском до теплофізичних властивостей ґраток (фононним внеском) необхідно враховувати електронний внесок. За рахунок вільних електронів теплоємність і теплопровідність металів є більшими, ніж у діелектриків.

4.6 Класична модель теплового розширення кристалічних ґраток. Температурний коефіцієнт лінійного розширення

Ще однією тепловою властивістю твердих тіл, широко використовуюваною на практиці є теплове розширення, яке не може бути поясненим у рамках гармонічного наближення взаємодіючих атомів.

Справді, звернемося до потенціальної кривої взаємодії атомів, зображеної на рисунку 1.3. За абсолютного нуля температур сусідні атоми розташувались би на відстанях r_0 , що відповідають мінімуму потенціальної енергії. За підвищення температури збільшуються теплові коливання атомів поблизу їх положень рівноваги. В процесі коливань кінетична енергія атомів перетворюється на потенціальну і навпаки. Якщо б крива, $W = f(r)$, була симетричною, коливання атомів повинні були б супроводжуватися їх зміщенням від положень рівноваги вліво і вправо на однакові відстані. Але крива, $W = f(r)$, є несиметричною (рис.1.3), тому перетворення кінетичної енергії на потенціальну при коливаннях супроводжуються зміщенням атомів вліво і вправо на різні відстані (віддалення атомів створює сили притягання менші, ніж сили відштовхування за зближення атомів). Із збільшенням температури середнє положення атомів, що коливаються, зміщується вправо від r_0 , відстань між сусідніми атомами збільшується, що врешті призводить до теплового розширення кристала.

Таким чином, причиною теплового розширення кристалічних ґраток є несиметричність потенціальної кривої, $W = f(r)$, яка, згідно з формулою (1.1), визначається за параметром ангармонічності. Чим більшою є ангармонічність коливань, тим більшим буде теплове розширення тіла. Твердіші матеріали характеризуються меншим коефіцієнтом теплового розширення. У випадку симетричних структур коливання атомів є однаковими за всіма напрямками, а теплове розширення є ізотропним. У некубічних структурах теплове розширення є анізотропним.

4.7 Теплофізичні характеристики будівельних матеріалів

Розглянуті в попередньому розділі теплові характеристики твердих тіл мають велике значення для будівельної індустрії, оскільки економія енергетичних ресурсів за експлуатації житлових і цивільних будівель значною мірою визначається тепловтратами через зовнішнє огороження. Тому забезпечення заданих теплових характеристик матеріалів і їх подальше поліпшення має важливе значення для економії теплової енергії за експлуатації будівель (в наш час тепловтрати через захисні конструкції оцінюються приблизно в 50% від загальних тепловтрат будівель).

Очевидно, що незадовільний теплозахист, окрім зайвої витрати теплової енергії, призводить до некомфортних умов перебування людей у приміщеннях, утворення вологи на стінах, їх промерзання і т.ін.

У процесі технічних розрахунків, окрім питомої теплоємності та теплопровідності, λ , використовується, так званий, коефіцієнт теплоупровідності:

$$d = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (4.16)$$

де ρ – густина матеріалу.

Даний коефіцієнт пов'язує теплові характеристики, питому теплоємність, c , і теплопровідність, λ , з густиною матеріалу, ρ , від якої багато в чому залежать теплові властивості легких будівельних матеріалів.

У таблиці 4.1 наведено дані про питому теплоємність і теплопровідність матеріалів, зокрема будівельних, за $t = 20^\circ\text{C}$.

Слід враховувати, що характеристики деяких матеріалів, наведені в різних довідниках, іноді помітно відрізняються, тому ці дані в ряді випадків є оцінками.

Як видно з таблиці 4.1, питома теплоємність різних неорганічних матеріалів має близькі значення (це стосується багатьох гірських порід).

Якщо значення питомої теплоємності неорганічних матеріалів є близькими до теплоємності повітря за сталого тиску, то теплоємність незначно залежить від пористості матеріалу. Матеріали, що мають органічне походження, мають більшу теплоємність, ніж матеріали неорганічного походження (на-

приклад, теплоємність деревини більше, ніж удвічі перевищує теплоємність бетону).

Таблиця 4.1 – Питома теплоємність і теплопровідність деяких матеріалів

Матеріал	$c, \frac{kJ}{kg \cdot K}$	$\lambda, \frac{W}{m \cdot K}$
Бетон	0,84 – 1,04	0,7 – 1,2
Керамзитобетон	0,66	0,7
Цегла	0,92	0,7
Деревина	2,39	0,1 – 0,2
Скло	0,78	0,75
Сталь	0,48	47
Вода	4,19	0,58
Крига	2,09	2,32
Повітря	$c_p=1, c_v=0,72$	0,024
Пінопласт	—	0,05

Очевидно, що повна теплоємність виробу, яка визначається добутком маси на питому теплоємність, є тим більшою, чим більша маса виробу. Тому будівлі з масивними зовнішніми стінами повільно нагріваються і повільно охолоджуються, тобто мають велику теплостійкість, яка визначається відношенням теплоємності будівлі до її тепловтрат.

Як уже згадувалося, питома теплоємність матеріалів (у тому числі й будівельних) залежить від їх густини. Приклади дослідження показали, що в разі зведення дамби з гідротехнічного бетону за зміни його середньої густини на 8% його питома теплоємність змінилась на 18%.

Питома теплоємність неоднорідних матеріалів, якими є й будівельні, обчислюється як відношення суми теплоємностей компонентів до маси матеріалу.

$$c = \frac{c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (4.17)$$

Оскільки питома теплоємність сталі є практично вдвічі меншою за питому теплоємність бетону, то очевидно, що теплоємність залізобетону буде меншою, ніж теплоємність бетону.

Теплоємність залежить від вологості матеріалу, φ , (нагадаємо, що вологістю матеріалу за масою називається величина, яка визначається відношенням збільшення маси вологого матеріалу порівняно з сухим до маси матеріалу в сухому стані).

Питома теплоємність вологого матеріалу розраховується за формулою:

$$c_s = \frac{c + 0,0419 \cdot \varphi}{1 + 0,01 \cdot \varphi} \quad (4.18)$$

Оскільки питома теплоємність води є приблизно в 20 разів більшою, ніж бетону, то теплоємність вологого бетону значно збільшується порівняно з теплоємністю сухого (за вологості 5% приблизно на 20%).

У таблиці 4.1 наведено також значення коефіцієнта теплопровідності деяких матеріалів, у тому числі й будівельних.

Слід зазначити, що, на відміну від теплоємності й густини значення коефіцієнтів теплопровідності, різних гірських порід, використовуваних як заповнювач для бетонів, є істотно різними. Наприклад, при зміні густини породи на 8% коефіцієнт теплопровідності змінюється удвічі.

Таким чином, для інженерної практики потрібні надійні методи управління коефіцієнтом теплопровідності бетону за допомогою регулювання рецептурно-технологічних чинників.

За близьких до кімнатної температур теплопровідність більшості будівельних матеріалів збільшується під час підвищення температури, що можна пояснити збільшенням кінетичної енергії молекул речовини. Закон зміни теплопровідності з температурою в інтервалі від 0 до 1000 С є аналогічним до закону зміни коефіцієнта лінійного розширення з температурою (див. 4.1), оскільки обидва процеси обумовлені одними й тими самими причинами:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta t), \quad (4.19)$$

де λ і λ_0 – теплопровідності відповідно за даної температури й за $t=0^\circ\text{C}$;
 β – температурний коефіцієнт теплопровідності.

Залежність коефіцієнта теплопровідності пінобетону від температури наведена на рисунку 4.4.

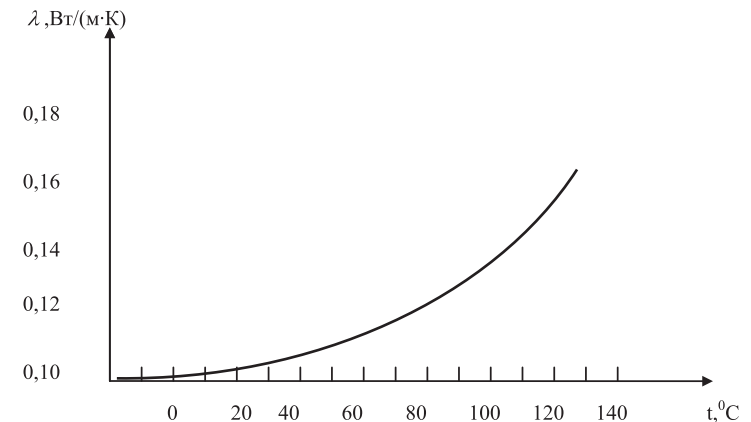


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для пінобетону

Повітряні пори, які існують в легких бетонах, знижують теплопровідність, оскільки повітря погано передає теплову енергію і теплопровідність здійснюється тільки «скелетом» матеріалу. Тому коефіцієнт теплопровідності залежить від середньої густини матеріалу, тобто фактично від пористості (пористістю називається відношення сумарного об'єму всіх пор до об'єму матеріалу). Розрахункові значення коефіцієнта теплопровідності цементного каменю від густини наведено на рисунку 4.5.

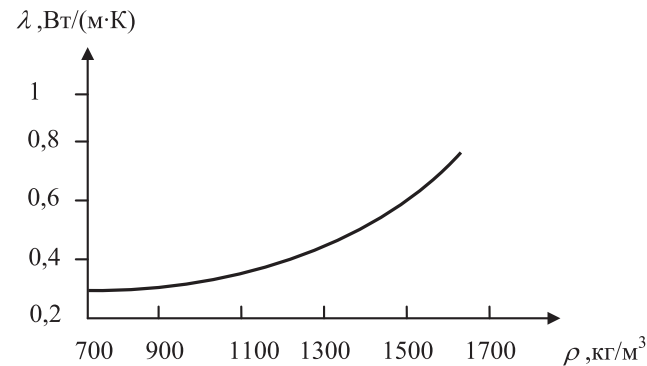


Рисунок 4.5 – Залежність коефіцієнта теплопровідності від густини цементного каменю

Останніми роками з'явилися нові теплоізоляційні матеріали, що містять до 98% закритих пор і мають коефіцієнт теплопровідності близький до λ повітря. Проте для всіх матеріалів зберігається загальний принцип: зростання коефіцієнта теплопровідності при збільшенні середньої густини матеріалу.

Зупинимось на властивостях теплоізоляційних будівельних матеріалів, які мають пористу або волокнисту структуру. Їхнє основне призначення – знизити втрати тепла в огорожувальних конструкціях. Очевидно, що чим менший їхній коефіцієнт теплопровідності, тим краща теплоізоляція. За видом сировини ці матеріали поділяються на органічні і неорганічні. До неорганічних матеріалів належать мінеральна вата, піноскло, газобетон тощо; до органічних – деревина, газонаповнені пластичні маси комірчастої структури. В будівництві використовують в основному два типи теплоізоляційних матеріалів: плити, мати і таке інше з мінеральної вати і плити зі штучних пластичних мас, наприклад, пінопласт (пінополістирол).

Вибір теплоізоляційного матеріалу залежить від умов його експлуатації, особливо від вологісного режиму. Наявність води в порах легкого бетону призводить до істотного зростання теплопровідності, оскільки коефіцієнт теплопровідності води в 20 разів більший за коефіцієнт теплопровідності повітря,

у разі промерзання матеріалу зростання теплопровідності виявляється ще більшим. На рисунку 4.6 показано вплив вологості на теплопровідність цеглини.

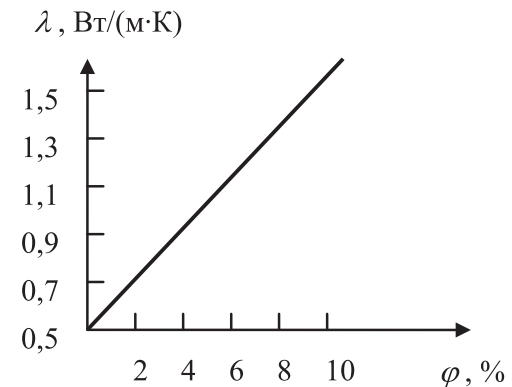


Рисунок 4.6 – Залежність теплопровідності цеглини від її вологості

Ще однією важливою теплотехнічною характеристикою захисних конструкцій є термічний опір R_T . Цю характеристику можна ввести на підставі розгляду формальної аналогії між теплопровідністю і електропровідністю.

Таблиця 4.2 – Таблиця аналогій між теплопровідністю та електропровідністю

Теплопровідність	Електропровідність
Закон Фур'є $q = \lambda grad T$, q – густина теплового потоку, Вт/м ² , λ – теплопровідність, Вт/(м·К) T – температура, К	Закон Ома $j = -\frac{1}{\rho_e} grad \phi$, j – густина струму, А/м ² , ρ_e – питомий опір, Ом·м, ϕ – електричний потенціал, В
Термічний опір $R_T = \frac{\delta}{\lambda}$, $\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$	Електричний опір $R_e = \rho_e \frac{\ell}{S}$, Ом, ℓ – довжина, S – площа перерізу провідника
Для однорідної теплопровідної ділянки $q = \frac{T_1 - T_2}{R_T}$	Для однорідної ділянки кола $I = \frac{\phi_1 - \phi_2}{R_e}$, I – сила струму

Як видно з таблиці 4.2, термічний опір визначається відношенням товщини стінки до її теплопровідності. Опори у електричному колі та у теплопровідній ділянці можуть з'єднуватись. Наприклад, результируючий термічний опір при послідовному з'єднанні, так само як на однорідній ділянці електричного кола, дорівнює сумі опорів $R_T = \Sigma R_{Ti}$.

Для того, щоб збільшити термічний опір зовнішніх стін, потрібно використовувати як мінімум двошарові конструкції, що включають міцний зовнішній шар і внутрішній шар з низькою теплопровідністю.

Термічний опір захисних конструкцій зовнішніх стін згідно з ДБН 2.6-31: 2006 для 1,2,3,4 кліматичних зон України повинен складати 2,8; 2,5; 2,2; 2,0 $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$ відповідно (забезпечення більше 5 $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$ недоцільно з погляду на витрати енергії).

Зазначимо, що досягти великих значень термічного опору огорожувальних конструкцій можна двома шляхами: або використовуючи одношарові конструкції, виконані з матеріалів, що мають велике значення R_T (наприклад, з блоків пористого бетону товщиною не менше 30 см), або, як згадувалося, використовуючи багатошарові огорожувальні конструкції. Недолік одношарових огорожувальних конструкцій – у приміщеннях, де стіни виконані з бетону, взимку вогко. Одношарові стіни із звичайної керамічної або силікатної цегли не відповідають нормативним параметрам з теплозбереження. З таких матеріалів виготовляють багатошарові конструкції, до складу яких входить утеплювач (наприклад, плити з мінеральної вати). При цьому можна використовувати як внутрішнє, так і зовнішнє утеплення. У першому випадку зовнішнє середовище виявляється в зоні низьких температур. Це різко знижує теплову інерцію огорожувальної конструкції (стіни швидко нагріваються і швидко охолоджуються). При цьому за шаром утеплювача на внутрішньому боці конденсується волога, що призводить до зволоження стін. Система зовнішньої теплоізоляції дозволяє мати точку роси (див. підрозділ 4.8) у зовнішньому теплоізоляційному шарі або навіть за його межами. Тому застосування зовнішньої теплоізоляції дозволяє легше досягати достатнього рівня теплотривкості огорожувальної конструкції.

Тепер розглянемо коефіцієнт лінійного розширення будівельних матеріалів.

Широке застосування в будівельній практиці залізобетону зумовлене тим, що його складові частини – бетон і сталь – мають близькі коефіцієнти лінійного розширення $(10...12) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ і $(10...12,2) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ відповідно.

Під впливом термічних і усадкових деформацій в спорудах великої протяжності можуть утворитися неприпустимі за умов експлуатації перекося або розриви. Щоб цього не відбулося, влаштовують температурно-усадкові (деформаційні) шви. Відстань між швами беруть з урахуванням термічного розширення матеріалів.

4.8 Використання теплофізичних характеристик будівельних матеріалів у процесі проведення деяких інженерних розрахунків

Задача 1. Якою повинна бути товщина цегляних стін цеху, щоб не відбувалася конденсація вологи на стінах з боку цеху? Зовнішня температура -20°C , а внутрішня $+20^\circ\text{C}$. Відносна вологість повітря 70%, густина теплового потоку 100 Вт/м^2 .

Розв'язання. Задана в умові задачі відносна вологість повітря в приміщенні вказує, наскільки водяна пара близька до насичення:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{нас}}},$$

де ρ – густина водяної пари;

$\rho_{\text{нас}}$ – густина насиченої пари при даній температурі.

Згідно з даними задачі при φ абсолютна вологість складає 70%. Тоді густина водяної пари

$$\rho = 0,7 \cdot \rho_{\text{нас}},$$

(значення $\rho_{\text{нас}}$ наводяться в довідкових таблицях).

Під час охолодження пари (без зміни об'єму) її густина залишається сталою, а густина насиченої пари при цьому зменшується. Досягши деякої температури t , яка має назву точка роси, відносна вологість досягає 100%, наявна в повітрі водяна пара конденсується на внутрішніх поверхнях стін.

Графічно залежність густини насиченої пари від температури показана на рисунку 4.7.

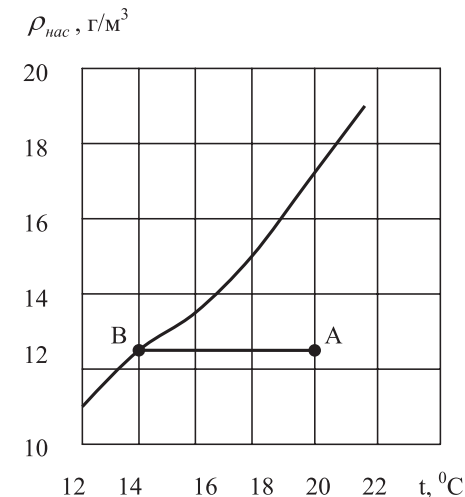


Рисунок 4.7 – Залежність густини насиченої пари від температури

Точка А відповідає ненасиченій парі при $t = 20^\circ\text{C}$. Точка В відповідає насиченій парі при температурі роси τ_p (в даному випадку це 14°C).

Для визначення точки роси зручно користуватися також номограмою (додаток Б). Таким чином, при $t \leq 14^\circ\text{C}$ відбуватиметься конденсація пари на внутрішніх поверхнях стін.

Мінімальна товщина цегляних стін, достатня для того, щоб не конденсувалася волога на стінах з боку приміщення, знаходиться з рівняння Фур'є для стаціонарної теплопровідності (4.4), в яке як внутрішню температуру стіни слід підставити $t \leq 14^\circ\text{C}$:

$$\delta = \left| \frac{\lambda \Delta T}{q} \right| = \left| \frac{\lambda \Delta t^0}{q} \right|,$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності,

$|\Delta T| = |\Delta t^0|$ – різниця температур на внутрішній і зовнішній поверхнях стіни,

q – густина теплового потоку.

Підставляючи числа в цей вираз, одержимо:

$$\delta = \frac{0,7 \cdot 34}{100} \approx 0,24 (\text{м})$$

(Нагадаємо, що розміри цеглини $(25 \times 12 \times 6,5) \text{ см}^3$).

Задача 2. Зовнішня стіна одноповерхового будинку є тришаровою конструкцією, виконаною з бетону, мінеральної вати і дерев'яного щита. Знайдіть термічний опір стіни, якщо товщина шарів складає 50, 150 і 20 мм відповідно. Чи відповідає термічний опір стандартам України? Що таке енергоекономічний будинок?

Розв'язання. Для збільшення термічного опору захисних конструкцій і забезпечення їх достатньої міцності використовуються багатошарові матеріали, які складаються із шарів матеріалів з різною теплопровідністю.

Термічні опори розраховується як сума термічних опорів окремих шарів:

$$R_T = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i},$$

де δ_i , λ_i – товщина і теплопровідність шарів.

Значення теплопровідності і товщини шарів використаних матеріалів наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Матеріал	δ_i , мм	λ_i , Вт/(м·К)
Бетон	50	0,7
Мінеральна вата	150	0,07
Дерев'яний щит	20	0,174

Підставляючи значення таблиці у формулу для розрахунку, одержимо

$$R_T = 2,33 \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}},$$

що відповідає стандартам України.

Задача 3. Згідно з ДЕСТ перед виготовленням нової серії виробів на підприємствах будівельної індустрії необхідно контролювати теплопровідність легкого бетону (рис.4.8). Для цього виготовляють плоскі зразки, що мають товщину реальних виробів і розмір у площині $(250 \times 250) \text{ мм}^2$. Для визначення теплопровідності на верхній і нижній поверхнях зразка користуються рівнянням Фур'є. У процесі проведення таких вимірів для керамзитобетону беруть різницю температур 29 К при густині теплового потоку 28 Вт/м². Визначте теплопровідність керамзитобетонної плити товщиною 0,3 м.

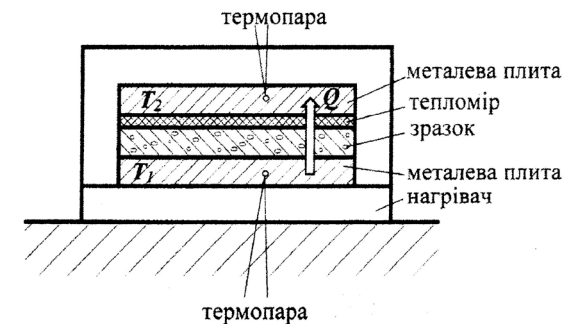


Рисунок 4.8 – Установа для визначення теплопровідності легкого бетону

Значення коефіцієнта теплопровідності знайдемо, скориставшись рівнянням Фур'є для стаціонарної теплопровідності:

$$\lambda = \frac{\delta}{|\Delta T|}.$$

Після підстановки числових даних одержимо:

$$\lambda = \frac{28 \cdot 0,3}{29} = 0,29 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Задача 4. Визначіть масу пари, необхідної для прогрівання від $t_1 = 3^\circ\text{C}$ до $t_2 = 83^\circ\text{C}$ при термовологісній обробці шляхом пропарювання залізобетонних конструкцій масою $m = 18,5 \text{ т}$, в яких маса сталеві арматури становить 7% від загальної маси конструкцій. Пара знаходиться в камері при $t_3 = 100^\circ\text{C}$,

40% внесеної при цьому теплової енергії витрачається на нагрівання повітря і стінок камер. Чому дорівнює питома теплоємність залізобетону?

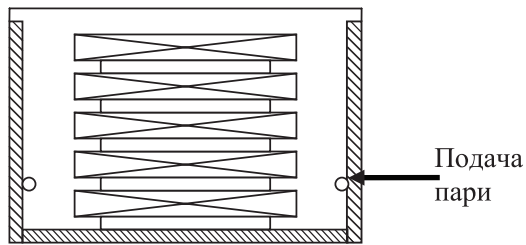


Рисунок 4.9 – Установка для термовологісної обробки залізобетонних виробів (ямна пропарювальна камера)

Розв’язання. Масу пари, необхідної для пропарювання залізобетонної конструкції, визначимо з рівняння теплового балансу:

Q_1 – кількість теплоти, віддана парюю, повинна дорівнювати кількості теплоти Q_2 , одержаній конструкцією:

$$c \cdot m \Delta T = 0,6 \lambda m_n,$$

де c – питома теплоємність залізобетонної конструкції;

λ – питома теплота пароутворення ($\lambda = 22,6 \cdot 10^5$ Дж/кг).

За визначенням питома теплоємність залізобетону:

$$c = \frac{c_o m_o + c_{cr} m_{cr}}{m_o + m_{cr}}.$$

Враховуючи останню формулу, знаходимо масу пари:

$$m_n = \frac{(c_o m_o + c_{cr} m_{cr}) \Delta T}{0,6 \lambda}.$$

Підставляючи числові дані, одержуємо:

$$m_n = \frac{(1300 \cdot 0,46 + 17200 \cdot 0,92) 10^3 80}{0,6 \cdot 22,6 \cdot 10^5} \approx 970 \text{ (кг)}.$$

Питома теплоємність залізобетону:

$$c = \frac{(1300 \cdot 0,46 + 17200 \cdot 0,92) 10^3}{18500} \approx 0,89 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

Додавання сталі до бетону зменшить питому теплоємність виробу.

Розділ 5. ДЕЯКІ АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

5.1 Основні поняття будівельної акустики

Аналіз досягнень у боротьбі з шумом свідчить, що в розвинених країнах зменшення зовнішнього шуму – проблема «номер один» за вагомістю і трудомісткістю рішення. Щоб запобігти «вторгненню» шуму в життя людей або хоча б зменшити його шкідливий вплив на здоров'я, необхідний технічно грамотний підхід до вирішення цієї проблеми.

Від шуму страждають практично всі люди. Монотонне гудіння машин і механізмів, гучна музика тощо – ось характерні реалії нашого часу. Тому одним з основних критеріїв якості будь-якого приміщення, у тому числі й житлового, є наявність акустичного комфорту, що визначається достатньою звукоізоляцією захисних конструкцій, яка залежить від акустичних властивостей будівельних матеріалів і виробів. Щоб проаналізувати акустичні характеристики будівельних матеріалів, які використовуються для звукоізоляції, необхідно ознайомитися з деякими поняттями дисципліни «Будівельна акустика». Акцентуємо увагу на тому, що підґрунтям вивчення даної дисципліни є розділ фізики «Коливання і хвилі», а також відповідний математичний апарат, тобто виклад матеріалу, як правило, в значній мірі математизований.

Нагадаємо деякі положення розділу фізики «Коливання і хвилі».

В суцільному середовищі, що складається із взаємодіючих частинок, коливання однієї з них викликає коливання сусідніх частинок. Процес поширення коливань в пружному середовищі називається механічною хвилею. Якщо коливання частинок відбуваються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, то хвиля називається поперечною, якщо уздовж напрямку поширення – це поздовжня хвиля. Зазначимо, що в твердих тілах виникають як поздовжні, так і поперечні хвилі, а також й інші типи хвиль, в яких рух частинок здійснюється за більш складними траєкторіями (наприклад, так звані хвилі вигину в плоских пластинах).

В газових середовищах можуть виникати лише поздовжні хвилі. В повітрі вони випускаються джерелом звуку – тілом, що коливається, і поширюються

у вигляді коливань тиску. Людське вухо, як правило, сприймає механічні коливання частотою від 16 до 20000 Гц. Інтервал частот, який сприймається на слух, називається звуковим, а механічні хвилі цих частот – звуковими. Звук (механічна хвиля) може виникати в різних середовищах. Звук, що виникає в повітрі, називається повітряним, а твердих тілах – структурним.

Краще всього людина чує звуки частотою 500 – 1000 Гц. У цей найпоширеніший інтервал входять мова, звуки музики, побутовий шум тощо.

Найважливіший параметр, що характеризує звукову хвилю – її швидкість – залежить від пружності і густини середовища. Швидкість звуку в повітрі при 150°C приблизно 340 м/с, у воді при тій же температурі ≈ 1500 м/с, в цеглі ≈ 6130 м/с.

Енергія, випромінювана джерелом звуку, переноситься звуковими хвилями, утворюючи так зване звукове поле, основними характеристиками якого є звуковий тиск p та інтенсивність звуку I .

Під звуковим тиском розуміють періодичну зміну тиску, що відбувається в звуковій хвилі (стиснення і розтягування). Інтенсивністю звуку називають відношення потужності звукової хвилі, падаючої на поверхню, до площі цієї поверхні.

При падінні потоку звукової енергії на тверде тіло (наприклад, на бетонну стінку) він розділяється на три частини: частина відбивається від поверхні тіла, частина поглинається, а частина, що залишилася, проходить крізь тіло. В результаті відбувається послаблення звуку. Відбиття і поглинання звукової енергії виконують основну роль в акустиці приміщень.

В одній будівельній конструкції одночасно можуть відбуватись і відбиття звукових хвиль на межі, і їх поглинання усередині конструкції. Так, бетонна плита як відбивач звукової хвилі одночасно є й її провідником. Зазначимо, що частота і фаза звукової хвилі можуть збігатись із власною частотою коливань конструкції, що призводить до різкого посилення звуку.

Як кількісну характеристику звуку, можна використовувати його інтенсивність. Саме так вводиться одна з основних акустичних характеристик – коефіцієнт звукопоглинання (див. підрозділ 5.3). Проте для практичного використання, враховуючи специфіку сприйняття звуку людським вухом, зручніше застосовувати так звані рівні інтенсивності або тиску (тобто використовувати логарифмічну шкалу).

Рівнем інтенсивності L_I називається помножений на 10 десятковий логарифм відношення двох інтенсивностей звуку; рівнем звукового тиску L_p – помножений на 20 логарифм відношення двох звукових тисків.

Формально величини L_I і L_p безрозмірні, але для числових значень логарифма відношення інтенсивностей або тиску застосовується назва децибел (дБ)¹.

¹ Децибел – десята частина бела (на честь винахідника телефона): дБ = 0,1 Б

Децибел використовують як одиницю вимірювання рівнів інтенсивності і звукового тиску. Абсолютні значення рівня інтенсивності і тиску вводять, використовуючи так званий стандартний поріг чутності I_0 людського вуха на частоті 1000 Гц і порогове значення звукового тиску p_0 :

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2; p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$$

Тоді відповідно до визначення рівнів інтенсивності і звукового тиску абсолютні рівні L_I і L_p знаходяться таким чином:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (5.1)$$

$$L_p = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (5.2)$$

(враховано, що $I \sim p^2$).

Саме рівні інтенсивності і звукового тиску використовуються найчастіше для характеристики звукоізоляційних властивостей будівельних матеріалів і конструкцій.

5.2 Коефіцієнт звукопоглинання

Як згадувалося, у разі розповсюдження звуку в закритих приміщеннях частина звукової енергії поглинається захисними конструкціями, а частина відбивається. При цьому відбитий звук «змішується» із звуком, який іде від джерела. Тому чим більша енергія звуку поглинеться і відібіється, тим менший рівень шуму, який проникне в сусіднє приміщення.

Для захисту від повітряного шуму акустики пропонують три основні способи послаблення звуку:

- підвищення масивності елементів огорожі;
- застосування звукопоглинальних матеріалів;
- герметизація всіх можливих шляхів проникнення повітряних звукових хвиль.

Необхідність збільшення маси елементів огороження пов'язана з тим, що під час зіткнення звукових хвиль з огороженням вони начебто «розгойдують» його, що викликає коливання повітря в сусідньому приміщенні. Для зменшення цього акустичного «розгойдування» огороження повинні бути достатньо масивними.

Перейдемо до розгляду характеристик звукопоглинальних матеріалів. Здатність будівельних деталей поглинати звук характеризується коефіцієнтом звукопоглинання $\alpha_{ак}$, який визначається відношенням звукової енергії, що поглинається деталлю, до падаючої енергії. Максимальне значення $\alpha_{ак}$ дорівнює одиниці. Якщо звук не відбивається зовсім, коефіцієнт звукопоглинання в

значній мірі залежить від характеристик матеріалу і від частоти звуку. Високо-частотна складова поглинається краще, ніж низько-частотна. Значення $\alpha_{ак}$ для різних матеріалів на частоті 500 Гц наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Коефіцієнт звукопоглинання для деяких матеріалів при частоті 500 Гц

Матеріал	$\alpha_{ак}$
Метал	0,010
Бетон	0,015
Скло	0,2
Цементна стяжка	0,025...0,05
Деревина	0,05...0,1
Штукатурка	0,3
Мінеральне волокно	0.7

З таблиці видно, що для порівняно гладеньких твердих матеріалів (метал, бетон, деревина) коефіцієнт $\alpha_{ак}$ близький до нуля.

Зазначимо, що, крім безрозмірного коефіцієнта звукопоглинання $\alpha_{ак}$, використовуються коефіцієнт ослаблення, вимірюваний в дБ (див. підрозділ 5.4). Якісні звукопоглинальні матеріали є одночасно хорошими теплоізоляторами. Цей взаємозв'язок широко використовується в будівництві.

Слід врахувати, що наведені дані щодо звукопоглинання справедливі лише для однорідних матеріалів. Якщо стіни побудовано з шарів різних матеріалів (використовуючи, як один з шарів, штукатурку, полімерний свинець, порожнисті блоки), ефект звукопоглинання посилюється. При цьому різні матеріали можуть гасити коливання в різних частотних інтервалах.

Поверхні приміщення, виготовляються з різних матеріалів, що мають неоднакові коефіцієнти звукопоглинання, тому приміщення характеризується результируючою звукопоглинальною здатністю A . Якщо знехтувати звукопоглинанням повітря, то звукопоглинання A визначається співвідношенням:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{aki} S_i, \quad (5.3)$$

де α_{aki} і S_i – коефіцієнт звукопоглинання і площа захисної поверхні;
 n – число різних поверхонь; $[A] = \text{м}^2$.

У разі покриття захисних поверхонь приміщення матеріалами, які добре поглинають звук, A збільшується. При цьому зменшується рівень інтенсивності звуку на величину ΔL :

$$\Delta L = 10 \lg \frac{A_2}{A_1}, \quad (5.4)$$

де L_1 – початкове значення звукопоглинання приміщення;

L_2 – значення звукопоглинання приміщення після покриття звукопоглинальним матеріалом.

Чим більше загальне звукопоглинання в приміщенні, тим швидше зменшується в ньому поле інтенсивності звуку після припинення дії джерела.

Акустичні якості приміщення характеризує так званий час реверберації τ , тобто час, протягом якого вимовлений звук ослаблюється в 10 разів. В акустичному відношенні приміщення вважається хорошим, якщо час реверберації менше 3с. Якщо час реверберації перевищує 5с, то приміщення характеризується «гучним звучанням». Розрахунки показують, що час реверберації залежить від значення A і об'єму приміщення V :

$$\tau = 0,16 \frac{V}{A}, \quad (5.5)$$

(V виражається в м^3 , A в м^2 ; 0,16 – розмірний коефіцієнт.)

Зупинимось на коефіцієнті звукопоглинання пористих матеріалів. Пористі матеріали мають волоконну, зернисту або комірчасту будову і поділяються за ступенем жорсткості на м'які, напівжорсткі, тверді.

Коефіцієнт звукового поглинання пористих матеріалів залежить в першу чергу від характеру пористості матеріалу.

Звук поглинається внаслідок перетворення звукової енергії на інші види енергії, наприклад – на теплову енергію. При цьому відбувається багаторівневе розсіювання енергії. Якщо звукова хвиля потрапляє на пористий матеріал, повітря, сконцентроване в його порах, починає коліватись. При цьому частина звукової енергії перетворюється на теплову внаслідок тертя повітря об волокна (зерна), його в'язкості і тертя волокон (зерен) одне об одне. Якщо матеріал досить пористий (оптимальним вважається розмір пори $\sim 1\text{мм}$), то при відповідній його товщині може забезпечуватись до 95% поглинання падаючої на нього звукової енергії. Решта звукової енергії проходить крізь шар матеріалу.

Поступово, проходячи через товщу матеріалу, звукова хвиля втрачає енергію. Після відбиття від твердої стінки, змінивши напрямок на протилежний, звукова хвиля зазнає подальшого згасання, яке вважається повним, якщо при одноразовому наблизенні хвилі до жорсткої стінки і руху у зворотному напрямку амплітуда коливання у хвилі зменшиться приблизно на 95%.

Товщина пористих матеріалів, яка забезпечує повне звукопоглинання, складає: 9 см для мінерального волокна; 3,5 см для сухої штукатурки; 0,6 см для гіпсової пористої плити.

Коефіцієнт звукового поглинання пористих матеріалів різко зменшується при звуках низької частоти, оскільки ступінь згасання звукових хвиль в порах матеріалів залежить від відношення товщини матеріалу до довжини хвилі.

5.3 Коефіцієнт звукоізоляції

Поширення як повітряного, так і структурного шуму можна також зменшити, використовуючи метод звукоізоляції – відбиття звукової енергії від твердої поверхні. Нижче розглядаються фізичні основи звукоізоляції від повітряного шуму. Звичайно звукоізоляцію здійснюють за допомогою плит з матеріалів, у яких пори відсутні.

Звукоізоляція характеризується коефіцієнтом звукоізоляції $R_{ак}$, дБ, що вказують на звукоізоляційні якості будівельних деталей без урахування можливого зниження ізоляції за наявності побічних шляхів поширення звуку, і визначається співвідношенням:

$$R_{ак} = L_1 - L_2 = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}, \quad (5.6)$$

де L_1 – рівень інтенсивності звуку, що падає на стіну;

L_2 – рівень інтенсивності інтенсивність звуку, який пройшов крізь стіну (випромінювана іншим боком стіни).

Коефіцієнт звукоізоляції плоскої однорідної плити залежить від відношення маси до площі, товщини, а також частоти звуку, що падає на неї.

Із збільшенням частоти ν коефіцієнт звукоізоляції $R_{ак}$ спочатку збільшується, а потім, у зоні так званої граничної (резонансної) частоти $\nu_{сп}$, внаслідок резонансу згинних хвиль залишається сталим і навіть зменшується, а при великих частотах знову починає зростати.

Втрата звукозахисних властивостей (зменшення коефіцієнта звукоізоляції) відбувається в діапазоні частот від 250 Гц до 2 кГц. Ці частоти залежать від матеріалу перешкоди і можуть бути розраховані за формулою:

$$\nu_{сп} = \frac{\nu_2}{1,8\nu_1\delta}, \quad (5.7)$$

де ν_1 і ν_2 швидкість звуку в даному матеріалі і повітрі відповідно;

δ – товщина перешкоди.

Користуючись цією формулою, можна розрахувати товщину шару звукоізоляції з граничною частотою вище 2500 Гц. Ця товщина складає для сталі і скла 5 мм; для штукатурки 10 мм; для гіпсокартону 15 мм.

Для традиційних будівельних матеріалів (бетон і цегла) резонансні частоти можуть складати від 6 до 10 дБ. Деякі матеріали, наприклад свинець, гума або сучасний матеріал, що має назву полімерний свинець, мають високу розсіюючу здатність і не мають акустичних «дір» в діапазоні частот, які сприймає людина. Саме їх використовують для підвищення звукоізоляції легких перегородок.

В Україні контроль коефіцієнта звукоізоляції $R_{ак}$ обов'язковий, наприклад, для віконних блоків (відповідно до ДСТУБА 2.6–19–2000).

Як приклад, розглянемо задачу.

Задача. Коефіцієнт звукоізоляції одинарного вікна 10 дБ, подвійного – 30 дБ. Наскільки зміниться рівень зовнішньої сили звуку при заміні одного скла подвійним, якщо в першому випадку рівень звукового тиску складав 70 дБ?

Розв'язання. Відповідно до (4.5):

$$R_{ак} = 10 \lg \frac{I_1}{I_2},$$

де I_1 – інтенсивність (сила) звуку падаючого на вікно;

I_2 – інтенсивність звуку, який пройшов через вікно в першому випадку;

I_2^1 – в другому.

Для одинарного вікна можна записати

$$10 = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}.$$

Для подвійного скла

$$30 = 10 \lg \frac{I_1}{I_2^1}.$$

Розв'язуючи систему цих рівнянь, одержимо:

$$2 = 10 \lg \frac{I_2}{I_2^1} \Rightarrow \frac{I_2}{I_2^1} = 10^2,$$

тобто інтенсивність (сила) звуку зменшилася в 100 разів.

Оскільки $L_1 = 70$ дБ, то $L_2 = 10^{-5}$ Вт/м²,

а оскільки I_2^1 менше за I_2 в 100 разів, то $I_2^1 = 10^{-7}$ Вт/м², що відповідає

рівню звукового тиску $L_2^1 = 10 \lg \frac{10^{-7}}{10^{-12}} = 50$ дБ, тобто рівень звукового тиску

зменшився на 20 дБ.

Розділ 6. РАДІОАКТИВНІСТЬ

6.1 Загальні положення

У світі постійно зростає небезпека негативного впливу радіації на організм людини, що пов'язано із збільшенням використання атомної енергії і з наслідками цього використання (аварії на АЕС, недбале збереження радіоактивних відходів), а також із використанням сировини, що містить природні радіонукліди.

Існують дві складові радіоактивності навколишнього середовища: природна, обумовлена наявністю природних радіонуклідів, і техногенна, обумовлена радіонуклідами штучного походження. Природний радіоактивний фон існує на Землі постійно. Усі живі організми, які розвиваються на Землі, сприймають радіоактивне випромінювання в дозах, що не чинять шкідливого впливу. Але природний радіоактивний фон доповнюється, як правило, фоном, виникаючим у результаті діяльності людини. Проблема впливу радіації на організм людини особливо важлива для України, що пов'язана не тільки з викидами численних промислових підприємств, але й з аварією на Чорнобильській АЕС.

Кожна радіоактивна речовина розпадається з цілком визначеною для неї швидкістю. Цей процес неможливо ні зупинити, ні сповільнити або прискорити. Існує три типи радіоактивного випромінювання: α -, β - і γ -випромінювання.

Явище радіоактивності завжди супроводжується виділенням енергії. На радіоактивність не впливають такі зовнішні чинники, як електричні і магнітні поля; нагрівання; деформування; зміна тиску й агрегатного стану. Усі три види випромінювання значно відрізняються один від одного проникною здатністю (інакше кажучи – ступенем поглинання їх різними речовинами). Найменшу проникну здатність має α -випромінювання, а найбільшу – γ -випромінювання.

У магнітному полі γ -промені не відхиляються, α - і β -частинки відхиляються в протилежні сторони, причому відхилення β -частинок значно більше, ніж α -частинок. Якщо радіоактивне випромінювання перетинає електричне поле плоского конденсатора, то β -частинки відхиляються до позитивно зарядженої пластини конденсатора, α -частинки до негативно зарядженої, а γ -промені відхилення не зазнають, оскільки γ -квант не має електричного заряду.

Експериментально виявлено, що α -частинка має позитивний заряд, що дорівнює двом елементарним зарядам. Такі частинки утворюються всередині ядра з двох протонів і двох нейтронів. Заряд β -частинки дорівнює одному елементарному негативному заряду. Потік β -частинок утворюється при перетворенні нейтронів на протони.

Ядро атома, як і атом в цілому, може знаходитися як в основному енергетичному стані, так і в збуджених станах. Перехід ядра в збуджений стан можна викликати, наприклад, бомбардуванням елементарними частинками. Повертаючись до основного енергетичного стану, ядро випускає γ -квант, що не супроводжується розпадом ядра. Енергія γ -кванта (фотона) дорівнює різниці енергій кінцевого та початкового енергетичних рівнів ядра:

$$h\nu_{ki} = W_k - W_i = \Delta W_{ki},$$

де ν_{ki} – частота фотона, яка відповідає переходу ядра з рівня k на рівень i .

Іонізуючими є α -, β - і γ -випромінювання (тобто їх дія на речовину призводить до утворення в ній іонів). Особливо небезпечно γ -випромінювання.

Жодний інший вид енергії (теплова, електрична та ін.), поглинений біологічним об'єктом у тій же кількості, не викликає таких змін, як іонізуюче випромінювання. Внаслідок іонізації молекул води, що знаходяться в біологічній тканині, утворюються вільні радикали гідроперекису і перекису гідрогену, що є сильними окиснювачами. Вільні радикали й окиснювачі, що мають високу хімічну активність, вступають у реакцію з молекулами білка, ферментів та інших структурних елементів біологічної тканини. Це призводить до порушення діяльності клітин, окремих функціональних органів і організмів у цілому.

Доза радіоактивного випромінювання, отримувана людиною, залежить від місцевості, де людина живе; від складу питної води; від матеріалів, з яких споруджено будинок. Природні джерела іонізуючого випромінювання складають майже 60% від сумарної дози, отримуваної людиною від усіх джерел радіації. Серед антропогенних (пов'язаних з діяльністю людини) джерел значний внесок належить будівельним матеріалам, випромінювання яких складає за різними оцінками близько 25% від загальної дози опромінення людини. Це пояснюється тим, що людина майже 70–80% свого життя перебуває в спорудах (житлових, промислових, суспільних), побудованих з різних матеріалів. Радіоактивність являє собою самочинне перетворення одних ядер на інші, супроводжуване випусканням різних частинок. Розрізняють природну і штучну радіоактивність.

6.2 Закон радіоактивного розпаду

Радіоактивний розпад являє собою статистичне явище. Ядра радіоактивного елемента розпадаються незалежно одне від одного. Час, протягом якого

розпадається половина початкового числа радіоактивних ядер N , називають періодом напіврозпаду $T_{1/2}$.

Число радіоактивних розпадів за одиницю часу називають активністю радіоактивного джерела:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right|, \quad (6.1)$$

де dN – число розпадів за час dt .

За одиницю активності в СІ прийнято беккерель (1 Бк) – активність джерела (препарату), в якому за 1 секунду відбувається 1 розпад: 1Бк = 1 розп/с. Позасистемна одиниця активності – кюрі (Ки): 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ розп/с. Припустимо, що в радіоактивному препараті в довільний момент часу t_0 ще не розпалося N_0 радіоактивних ядер. Чим більше загальне число N радіоактивних ядер, тим більше й число ядер, що розпалися: $dN \sim N$. Оскільки розпад радіоактивних ядер відбувається спонтанно і хаотично, то можна вважати, що число ядер, які розпалися за проміжок часу від t до $t + dt$, пропорційне часу dt : $dN \sim dt$.

Таким чином, $dN \sim N dt$ і далі $dN = -\lambda N dt$. Коефіцієнт пропорційності λ має назву сталої радіоактивного розпаду:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (6.2)$$

де $T_{1/2}$ – період напіврозпаду.

Значення λ і $T_{1/2}$ різні для різних речовин. Знак «мінус» у правій частині означає, що число ядер, які ще не розпалися, зменшується з часом.

З останнього виразу отримуємо:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt. \quad (6.3)$$

Проінтегруємо (6.2):

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt, \\ N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (6.4)$$

Ця формула є виразом закону радіоактивного розпаду: число радіоактивних ядер, що не розпалися, убуває з часом експоненційно.

Залежність (6.4) ілюструється графіком $N=f(t)$ (рис.6.1). Цей рисунок свідчить, що за час напіврозпаду активність препарату зменшується вдвічі.

Закон радіоактивного розпаду визначає середнє число ядер, що розпадаються за певний інтервал часу. Завжди неминучі відхилення від середнього значення: чим менша кількість атомів у препараті, тим більші відхилення. Закон радіоактивного розпаду – статистичний закон.

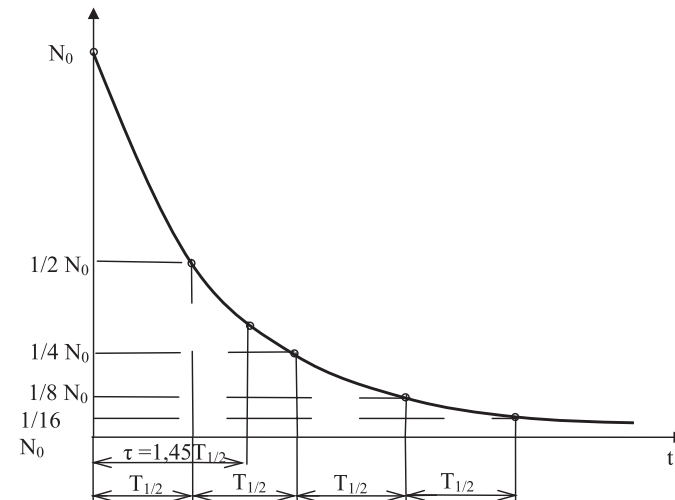


Рисунок 6.1 – Крива радіоактивного розпаду

6.3 Норми радіаційної безпеки і санітарні правила роботи з іонізуючими випромінюваннями

Як уже згадувалося, іонізуюче випромінювання, проникаючи в організм людини, втрачає енергію, створюючи на своєму шляху іони. Внаслідок цього руйнуються атоми і молекули, з яких складаються клітини організму. Тому робота з іонізуючими випромінюваннями небезпечна для людини. Введено дві характеристики дії іонізуючих випромінювань на речовини.

1. Поглинена доза, що дорівнює енергії, поглиненій речовиною одиничної маси :

$$D = \frac{dW}{dm}. \quad (6.5)$$

В СІ поглинена доза вимірюється в греях: 1 Гр = 1 Дж/кг. Позасистемна одиниця – рад: 1 рад = 10^{-2} Дж/кг = 0,01 Гр.

2. Експозиційна доза, що характеризується зарядом, створюваним іонізуючими випромінюваннями в речовині одиничної маси:

$$X = \frac{dq}{dm}, \quad [X] = \text{Кл/кг}. \quad (6.6)$$

Позасистемна одиниця експозиційної дози – рентген (Р). Ця доза утворює в 1 см³ сухого повітря масою 0,001293 г за нормальних умов іони зарядом $3,3 \cdot 10^{-10}$ Кл (заряд одного іона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

$$1 \text{ рентген} = 0,087 \text{ Гр} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

Для характеристики дії іонізуючого випромінювання на організм людини ввели еквівалентну дозу H , що є основною дозиметричною характеристикою радіаційної безпеки. За допомогою цієї величини оцінюється можлива шкода здоров'ю від тривалої дії іонізуючого випромінювання. Еквівалентна доза дорівнює добутку поглиненої дози D на середній коефіцієнт якості іонізуючого випромінювання k у даному елементі об'єму біологічної тканини:

$$H = D \cdot k. \quad (6.7)$$

Одиниця еквівалентної дози – зіверт² (Зв): $[H] = \text{Зв}$.

Оскільки k – безрозмірна величина, то розмірності H і D збігаються.

Позасистемна одиниця еквівалентної дози – бер (біологічний еквівалент рентгена):

$$1 \text{ бер} = 0,01 \text{ Зв}.$$

Для визначення еквівалентної дози приймається такий процентний склад м'якої біологічної тканини (за масою): водню – 10,1, вуглецю – 11,1, азоту – 2,6, кисню – 76,2. В таблиці 1 наведено середні значення коефіцієнта якості k для різних видів іонізуючого випромінювання.

Таблиця 6.1 – Середні значення коефіцієнта якості для різних випромінювань

№ з/п	Іонізуючі частинки	k
1	Рентгенівські і γ -кванти	1
2	Електрони і позитрони	1
3	Нейтрони енергією, меншою за 20 кеВ	3
4	Нейтрони енергією 0,1...10...10 МеВ	10
5	α -частинки енергією, меншою за 10МеВ	20
6	Багатозарядні іони	20

Потужність еквівалентної дози $\frac{dH}{dt}$ – відношення приросту еквівалентної дози за деякий проміжок часу до значення цього проміжку. Одиниця потужності еквівалентної дози – зіверт за секунду; використовується також позасистемна одиниця мікрорентген за годину (мкР/год).

Радіаційний контроль здійснюється службою радіаційної безпеки (РБ) даного підприємства чи установи або спеціально призначеною особою, а також відповідними відомчими службами.

² Р. Зіверт – шведський вчений, який досліджував вплив радіаційного випромінювання на біологічну тканину

Установлено такі категорії осіб, що зазнають опромінення:

Категорія А (персонал) – особи, які безпосередньо (постійно або тимчасово) працюють з іонізуючим випромінюванням.

Категорія Б – особи, які безпосередньо не працюють із джерелами іонізуючого випромінювання, але за умовами розміщення робочих місць (або місць мешкання) можуть зазнавати дії радіоактивних речовин або джерел випромінювання.

Категорія В – основне населення.

Гранично припустима доза (ГПД) сумарного зовнішнього і внутрішнього опромінення всього тіла для категорії А за календарний рік складає 5 бер; межа дози (МД) для категорії Б – 0,5 бер. Для всіх інших людей безпечною дозою вважається 0,1 – 0,3 бер на рік.

6.4 Нормування радіоактивності будівельних матеріалів

На об'єктах будівництва і підприємствах будівельної індустрії та будівельних матеріалів України передбачено проведення радіаційного контролю, а також створено систему норм і правил (СНІП) зниження рівня іонізуючого випромінювання природних радіонуклідів у будівництві. Ці СНІП закріплені Державними будівельними нормами. Відповідні норми встановлюють припустимі рівні радіаційних параметрів, вимоги до методів, способів і порядку проведення радіаційного контролю в будівництві. Вони є обов'язковими для всіх юридичних і фізичних осіб незалежно від форми власності. Відповідно до принципу радіаційної безпеки доза опромінення повинна бути знижена до якомога нижчого рівня згідно з санітарно-гігієнічними нормативами радіаційних параметрів будівельних матеріалів і об'єктів будівництва.

Відповідно до цих норм встановлено припустимі рівні таких радіаційних параметрів: ефективна сумарна питома активність природних радіонуклідів у сировині і будівельних матеріалах; потужність поглинутої дози в повітрі приміщень; середньорічна еквівалентна рівноважна об'ємна активність радону – 222 у повітрі приміщень.

Відношення активності радіонукліда до його маси називається питомою активністю і вимірюється у беккерелях на кілограм: $[A_n] = \text{Бк/кг}$. Чим менший період напіврозпаду, тим більша питома активність матеріалу. Ця величина обмежує використання сировини і будівельних матеріалів з підвищеним вмістом природних радіонуклідів (ПРН) і використовується при здійсненні вхідного радіаційного контролю (ВРК).

Для будівельних матеріалів і сировини використовується ефективна сумарна питома активність природних радіонуклідів.

Значення $A_{\text{эф}}$ визначають як суму питомої активності радію-226 (A_{Ra}), торію-232 (A_{Th}) і калію-40 (A_{K}) за формулою:

$$A_{\text{эф}} = A_{\text{Ra}} + 1,31 A_{\text{Th}} + 0,085 A_{\text{K}}, \quad (6.8)$$

де 1,31 і 0,85 – відповідно вагові коефіцієнти торію–232 і калію–40 відносно радію–226.

Залежно від значень $A_{\text{эф}}$ будівельні матеріали поділяють на класи, за якими визначаються можливі галузі їх використання (табл.6.2).

Таблиця 6.2 – Класифікація будівельних матеріалів за значенням $A_{\text{эф}}$

Клас	$A_{\text{эф}}$, Бк/кг	Галузі використання
1	Не більше ніж 370	Для всіх видів будівництва
2	370...740	Для дорожнього і промислового будівництва
3	740...1350	Для об'єктів промислового призначення, де виключається перебування людей; для об'єктів дорожнього призначення в межах населених пунктів за умови покриття ґрунтом або іншим матеріалом товщиною не менше, ніж 0,5 м

Якщо $A_{\text{эф}} > 1350$ Бк/кг, то питання щодо можливості використання таких матеріалів вирішується в кожному випадку окремо. Величина $A_{\text{эф}}$ будівельних матеріалів належить до їхніх найважливіших характеристик і наводиться навіть у рекламних проспектах.

Наявність радіоактивних ізотопів у будівельних матеріалах призводить до зростання γ -фону в приміщеннях. У споруджуваних житлових будинках потужність експозиційної дози не повинна перевищувати 60 мкР/год. У вже спорудженому будинку змінити γ -фон практично неможливо, тому його рівень потрібно прогнозувати на стадії проектування.

Додатковим фактором радіаційного впливу на людину є наявність таких радіоактивних газів, як радон і торон. Об'ємна активність радону в повітрі споруджуваних житлових будинків не повинна перевищувати 100 Бк/м³.

6.5 Будівельні матеріали як фактор радіаційної дії

Як уже зазначалося, природні радіонукліди в будівельних матеріалах створюють дозу зовнішнього і внутрішнього опромінення людей. При цьому доза зовнішнього опромінення значною мірою залежить від концентрації триваложивучих радіонуклідів сімейств: урану (235 і 238), торію–232 і калію–40, присутніх практично в усіх гірських породах, що використовуються як мінеральна сировина в будівельній індустрії, в будівельних матеріалах, виробках і конструкціях будівель.

Розглянемо зовнішнє опромінення. Природні радіонукліди в гірських породах і мінералах, використовуваних для виробництва будівельних матеріалів, розподілені нерівномірно, $A_{\text{эф}}$ змінюється від 7 до 4700 Бк/кг. Серед гірських порід найвищу радіоактивність мають граніти і деякі глини.

Низьку активність має будівельний гіпс. Завдяки наявності кристалізаційної води гіпсові вироби можуть бути непоганим захистом від іонізуючих випромінювань. Саме тому за кордоном їх широко використовують на атомних станціях.

Концентрація природних радіонуклідів у гірських породах і будівельних матеріалах на території України вимірювалася в 1986 – 1987 роках. Вибіркові дослідження показали, що середнє значення $A_{\text{эф}}$ будівельних матеріалів в Україні дещо перевищує відповідні значення для будівельних матеріалів колишнього СРСР. За цими даними середнє значення $A_{\text{эф}}$ будівельних матеріалів складало: для колишнього СРСР приблизно 93, а для України воно вище (105 Бк/кг).

Це пояснюється тим, що територія України розташована на кристалічному щиті великих нерудних матеріалів (червоні й сірі граніти, лабрадорити, габро, мармури, вапняки та інші). У процесі розробки родовищ будівельних матеріалів на поверхню виноситься велика кількість природних радіонуклідів, що підвищує потужність випромінювання в районах розробок.

Дані щодо радіоактивності деяких будівельних матеріалів України наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Радіоактивність деяких будівельних матеріалів України

Матеріали	Питома активність, Бк/кг			
	Радій–226	Торій–232	Калій–40	$A_{\text{эф}}$
Глина	41,0	78,0	574	204,0
Пісок	12,0	33,0	165	68,0
Щебінь	36,6	79,3	971	223,0
Гранітний відсів	43,0	118,2	1171	297,3
Вапняк	58,0	44,0	139	127,0
Гіпс	38,0	8,0	194	65,0
Бетон	25,0	36,0	80	106,0
Цемент	44,0	51,0	104	171,0
Плитка керамічна	89,0	102,0	680	280,0
Гравій керамзитовий	37,0	28,0	658	130,0

Знаючи ефективну питому активність вихідних будівельних матеріалів, можна знайти результуючу питому активність штучних кам'яних матеріалів, отримуваних без відпалу (бетон, будівельні «розчини» тощо). Якщо $A_{ef1}, A_{ef2}, \dots, A_{efn}$ – ефективні питомі активності складових сировини, V_1, V_2, \dots, V_n – їхні об'єми, то питома активність матеріалу може бути розрахована за формулою:

$$A_{ef} = \frac{A_{ef1}V_1 + A_{ef2}V_2 + \dots + A_{efn}V_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n}. \quad (6.9)$$

Будівельні матеріали, отримувани спіканням (портландцемент, вогнетривка цегла), мають підвищену концентрацію радіонуклідів у порівнянні з їх вмістом у вихідній сировині.

Як видно з таблиці 6.3, основну масу будівельних матеріалів слід відносити до першого класу, тобто вони радіаційно безпечні і придатні для усіх видів будівництва без обмежень. У першу чергу це пісок, цемент, цегла. З іншого боку, трапляються й такі марки матеріалів, що належать до другого і навіть третього класу. В основному це граніти і щебені. Високою виявилась природна радіоактивність деяких спеціальних будівельних матеріалів, наприклад, армуючих сіток з цементостійкого скловолокна для тонкостінних конструкцій.

З огляду на величезну різноманітність будматеріалів, необхідно проводити систематичні перевірки радіаційної безпеки.

Кілька років назад у м. Ізюм з'явилася в продажу шамотна цегла, що належить до третього класу. Побудована з неї огорожа одного з домоволодінь мала радіаційний фон 80 мкР/год, і лише завдяки втручанням радіологічної лабораторії використання цієї цегли було припинено.

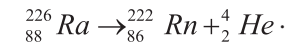
6.6 Джерела радону і способи радонозахисту будинків

Дозу опромінення живий організм може отримати від будь-якого радіонукліда чи суміші нуклідів незалежно від того, знаходяться вони поза організмом чи всередині нього. Такі речовини можуть потрапляти в організм людини з їжею, водою, повітрям.

Внутрішнє опромінення людини обумовлене, насамперед, інертними радіоактивними газами природного походження: радоном–222 і тороном–220, які утворюються в результаті радіоактивного розпаду природних радіонуклідів: урану–238 і торію–232. Основний спосіб опромінення – надходження радіоактивних газів із вдихуванням повітрям усередині приміщень. Це обумовлює до 10-15% випадків раку легень у тих, хто не палить цигарки.

Проведене в Харківському обласному онкологічному диспансері дослідження показало, що до 70% хворих на рак легень жили раніше в будинках, де об'ємна активність радону перевищувала норму.

Радон утворюється безпосередньо в процесі розпаду природного радіонукліда радію:



Радон – це інертний газ без запаху й кольору. Він у 7,5 разів важчий за повітря, період його напіврозпаду 3,8 доби. Радій, з якого безпосередньо утворюється радон, має період напіврозпаду 1620 років. Радій постійно утворюється в процесі розпаду урану, що в деяких кількостях завжди присутній в породоутворюючих матеріалах земної кори. Тому утворення радону є постійним процесом протягом життя всіх попередніх і майбутніх поколінь. У Кіровоградській області породи кристалічного щита мають максимальну для України концентрацію урану, що призводить до значного виділення радону з ґрунту.

У загальному випадку поширення радону обумовлене кількома причинами (дифузією внаслідок градієнта його концентрації; ефузією, тобто повільним витіканням газу через пори й капіляри внаслідок градієнта тиску в земній корі і т.д.). На відкритій території радон, що з'являється внаслідок виділення з ґрунту (есхалачії), швидко розсіюється в повітрі. При спорудженні будинку радон разом з повітрям переноситься (шляхом конвекції або дифузії) в приміщення з ґрунту через залізобетонний фундамент і підлогу будинку. В будинку радон виявляється у вигляді накритого ковпака з обмеженим обміном повітря і не може вільно перемішатися з зовнішнім повітрям.

Джерелом надходження радону в приміщення можуть бути і огорожувальні конструкції. Процес виділення радону в повітря приміщення складається з двох етапів. Спочатку радон «еманує»³, тобто виділяється з матеріалу будівельних конструкцій. На другому етапі радон, частково розпадаючись, поширюється за рахунок дифузії в порах і мікротріщинах матеріалів. З огорожувальних конструкцій виділяється 5–10% газу. Середня концентрація його в залізобетонних будинках як правило нижча, ніж у будинках з керамічної цегли. Найбезпечніший у радіоактивному відношенні такий будівельний матеріал, як деревина.

До 10% сумарного радону, що потрапляє в приміщення, може виділятися з води і природного газу. Концентрація радону у ванній кімнаті може бути втричі вищою, ніж на кухні, й у 40 разів вищою, ніж у житлових кімнатах.

Об'ємна активність радону в закритих приміщеннях у 5–8 разів вища, ніж у зовнішньому повітрі. Слід зазначити, що в літературі описано випадки, коли концентрація радону в приміщенні в 5 тисяч разів перевищувала середню концентрацію радону в зовнішньому повітрі.

³ Початково радон був названий французькими вченими П. Кюрі і М. Склодовською-Кюрі «еманцією радію»

Концентрація радону на верхніх поверхах багатоповерхових будинків нижча, ніж на перших поверхах, у підвалах, на станціях метро. Дуже впливає на концентрацію радону вентиляція (природна або примусова). Зменшення концентрації радону до припустимого значення спостерігається лише після 12–16 годин примусової вентиляції. Особливо небезпечна дія радону на дітей через їх маленький зріст.

Для захисту будинків від накопичення радону застосовують такі заходи:

- використання під забудову територій зі зниженим вмістом радону в ґрунтовому повітрі;
- використання архітектурних проектів, які передбачають вільне контактування простору під підлогою із зовнішнім повітряним середовищем;
- установка будинків на суцільну монолітну залізобетонну плиту;
- улаштування суцільних радонозахисних бар'єрів у складі підлог, у підвалах;
- облицювання стін полімерними матеріалами, наклеювання шпалер тощо.

У Західній Європі й Америці на проблему радону звернули увагу раніше, ніж в Україні. Так, шведські, канадські, німецькі фірми йдуть на перевитрату бетону в фундаментах для вирішення цієї проблеми.

У Канаді фундамент виготовляється у вигляді монолітного залізобетонного стакана, прикритого спеціальною антирадоною плівкою, що перетворює весь фундамент на недоступну для газів оболонку. У США плата за житло залежить від радонозахисності приміщень. В Україні роботи з керування рівнем радонової безпеки об'єктів будівництва на етапі проектування і реконструкції проводяться відповідно до державної програми «Радон». Як уже зазначалося, об'ємна концентрація радону в повітрі споруджених приміщень не повинна перевищувати 100 Бк/м³.

Закінчуючи розгляд проблем, пов'язаних з радіаційною безпекою стосовно будинків, що проектуються, споруджуються й експлуатуються, зазначимо, що, по-перше, основні фізичні властивості будівельних матеріалів доповнені ще одним показником – радіоактивністю; по-друге, на всіх етапах виготовлення будівельних матеріалів і виробів (від видобутку сировини до зберігання готової продукції) необхідна система радіаційного контролю. Продукція будівельного профілю, яка йде на продаж, повинна мати сертифікат радіаційно-гігієнічної безпеки. Більш активно потрібно вирішувати проблеми контролю концентрації радону в приміщеннях та її мінімізації.

6.7 Проходження γ - випромінювання через речовину

Крім проблем радіаційної безпеки і радіаційної екології, існує ще один розділ ядерної фізики, який дуже важливий для будівництва і має назву «Ядерно-фізичні методи в будівництві». Слід зазначити, що γ -випромінювання

можна використовувати для контролю якості. Наприклад, у Харкові на ДСК–1 наприкінці минулого століття за поглинанням γ -випромінювання визначали густину керамзитобетону. З іншого боку, вивчення взаємодії γ -променів з речовиною необхідне в процесі виконання будівельних робіт, пов'язаних з радіаційним захистом.

Зупинимось докладніше на взаємодії γ -випромінювання з речовиною. Під час проходження вузького пучка паралельних γ -променів через речовину їхня інтенсивність безперервно падає за рахунок поглинання і розсіювання (під інтенсивністю розуміють добуток енергії γ -кванта на число квантів, падаючих щосекунди на поглинач).

Зменшення інтенсивності γ -променів ($-dI$) під час їх проходження через шар речовини пропорційне товщині шару dx й інтенсивності падаючого пучка, тобто

$$-dI = \mu I dx. \quad (6.10)$$

Коефіцієнт пропорційності, що залежить від природи поглинаючої речовини і від енергії падаючих квантів, називається лінійним коефіцієнтом поглинання випромінювання і вимірюється в м⁻¹. Значення для різних матеріалів наводяться в довідковій літературі. Інтегруючи вираз (6.10), отримуємо залежність інтенсивності пучка, що пройшов через речовину, від товщини поглинаючого шару:

$$I(x) = I_0 t^{-\mu x}, \quad (6.11)$$

де I_0 – інтенсивність падаючого випромінювання.

Поглинання γ -променів різними речовинами можна характеризувати так званім шаром половинного ослаблення, тобто товщиною $x_{0,5}$ пластинки, що зменшує вдвічі інтенсивність падаючих променів:

$$x_{0,5} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\ln 2}{\ln e} = \frac{0,693}{\mu}. \quad (6.12)$$

Для неоднорідних або шаруватих матеріалів уведено масовий коефіцієнт зменшення інтенсивності:

$$\mu' = \frac{\mu}{\rho}, \quad (6.13)$$

де ρ – густина матеріалу; μ' вимірюється в м²/кг.

Формулі (6.11) можна надати вигляду

$$I = I_0 e^{-\mu' \rho x}. \quad (6.14)$$

Користуючись виразом (6.15), можна визначити густину матеріалу

$$\rho = \frac{(\ln I_0 - \ln I)}{\mu' x}. \quad (6.15)$$

Зупинимося на експериментальному методі визначення лінійного коефіцієнта поглинання. Якщо товщина пластинки l , то з (6.12) випливає, що

$$\mu = \frac{1}{l} \ln \frac{I_0}{I} = \frac{1}{l} \ln \frac{W_\gamma N_0}{W_\gamma N} = \frac{1}{l} \ln \frac{N_0}{N}. \quad (6.16)$$

Отже, щоб знайти значення μ , необхідно виміряти товщину пластинки l , число γ -квантів N_0 , падаючих щосекунди на пластинку, і число γ -квантів N , що пройшли через пластинку (поглинач) і зареєстровані детектором.

Ослаблення γ -випромінювання речовиною визначається такими ефектами: фотоэффект; ефект Комптона; утворення електрон-позитронних пар.

Фотоэффект є наслідком того, що γ -квант проникає в оболонку атома і вибиває електрони. Цей ефект переважає при енергії γ -квантів, нижчій за 0,5 МеВ.

В основі ефекту Комптона лежить зіштовхування γ -квантів з електронами зовнішніх оболонок атомів і передавання електронами атомам деякої енергії. Унаслідок цього змінюється напрямок руху γ -кванта (комптонівське розсіювання) і зменшується його енергія.

При утворенні електрон-позитронних пар γ -квант пролітає безпосередньо поблизу ядра. Якщо його енергія перевищує 1,02 МеВ, що відповідає сумі мас електрона й позитрона, то може утворитися електрон-позитронна пара.

Повний коефіцієнт лінійного поглинання μ складається з трьох коефіцієнтів:

$$\mu = \mu_\phi + \mu_\kappa + \mu_n, \quad (6.17)$$

оскільки, як сказано, вище, його визначають три процеси: фотоэффект (μ_ϕ пропорційний Z^3 хімічного елемента), ефект Комптона (μ_κ пропорційний Z/A) і утворення електрон-позитронних пар (μ_n пропорційний Z^2/A);

Z і A – відповідно зарядове і масове числа речовини.

6.8 Приклади розрахунків деяких радіаційних параметрів

Задача 6.1

Згідно з нормами радіаційної безпеки потужність експозиційної дози γ -випромінювання в житлових приміщеннях не повинна перевищувати 60 мкР/год. Визначить відповідну потужність поглиненої дози ($t = 1\text{с}; 1\text{год}$) та потужність еквівалентної дози ($t = 1\text{год}$).

Розв'язання. Потужність експозиційної дози – відношення експозиційної дози до часу, протягом якого проводилося вимірювання. Рентген – позасистемна одиниця вимірювання експозиційної дози. Оцінка відповідної даній експозиційній дозі поглиненої дози проводиться виходячи з того, що $1\text{ Р} = 0,087\text{ Гр}$.

Таким чином, $60\text{ мкР/год} \approx 0,5\text{ Гр/год} = 1,4 \cdot 10^{-4}\text{ Гр/с}$.

Оскільки для γ -випромінювання коефіцієнт якості випромінювання $\kappa = 1$, то в цьому випадку поглинена доза чисельно дорівнює еквівалентній.

Отже, $60\text{ мкР/год} \approx 0,5\text{ Зв/год}$.

Задача 6.2

Згідно з номерами радонової безпеки питома активність радону в повітрі у будинках, які нещодавно збудовані, не повинна перевищувати 100 Бк/м^3 . Стала радіоактивного розпаду $Rn\ \lambda = 2,1 \cdot 10^{-6}\text{ с}^{-1}$. Визначить об'ємну концентрацію радону у приміщенні. Які технологічні методи зменшення концентрації радону у повітрі приміщення?

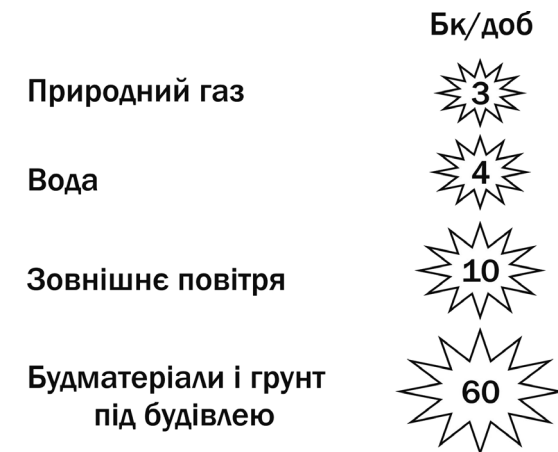


Рисунок 7.1 – Радон у будівлях

Розв'язання. Згідно з рівняннями (6.1, 6.3), об'ємна концентрація радону (кількість ядер в одиниці об'єму)

$$C_{Rn} = \frac{A}{\lambda} = \frac{100}{2,1 \cdot 10^{-6}} \approx 5 \cdot 10^7 (\text{м}^{-3}).$$

Задача 6.3

Оцініть річну дозу, одержувану людиною, яка знаходиться на місцевості, забрудненій до 10 Ки/км^2 цезієм-137. Маса людини 70 кг , поверхня тіла – $1,5\text{ м}^2$. Вважати, що тіло людини поглинає $\approx 20\%$ фотонів енергією $0,662\text{ МеВ}$, що утворюються у процесі розпаду.

Розв'язання Дозу, яку отримала людина масою m на місцевості, забрудненій цезієм-137, можна оцінити за енергією γ -випромінювання, що поглинається людиною за цей час:

$$W = 0,2W_{\phi}t.$$

Доза, яка поглинається людиною

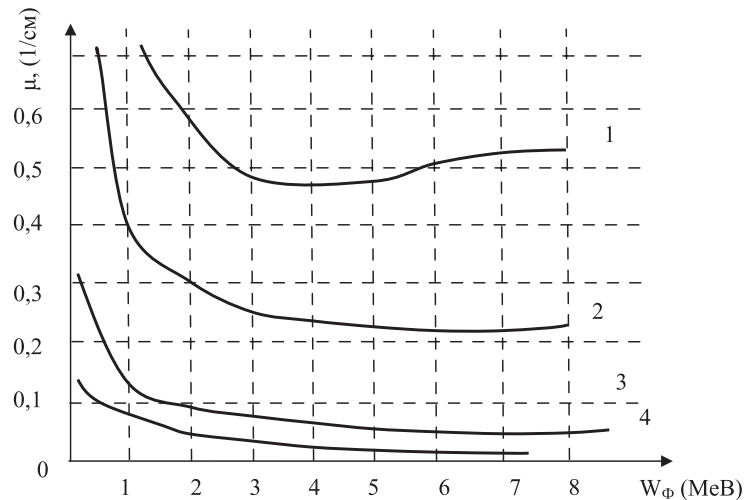
$$D = \frac{W}{m} = \frac{1}{m} 0,2W_{\phi}t = \frac{1}{70} 0,2 \frac{10 \cdot 3,7 \cdot 10^{10}}{10^6} \cdot 1,5 \cdot 3,6 \cdot 10^7 \cdot 0,66 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} = 0,006 \text{ (Гр)}.$$

Поглинена доза чисельно дорівнює еквівалентній (див. задачу 6.1).

$H = 0,006 \text{ Зв} = 0,6 \text{ бер}$ (у розрахунку враховано, що $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$).
Знайдене значення поглиненої дози перевищує удвічі допустиму безпечну дозу для населення.

Задача 6.4

Порівняти товщину шару половинного ослаблення, якщо енергія пучка фотонів, що пройшли через ці матеріали, для бетону и свинцю складає 6 Мев.



1 – свинець; 2 – чавун; 3 – бетон; 4 – вода

Рисунок 7.2 – Залежність лінійного коефіцієнта ослаблення пучка γ -променів для різних матеріалів

Розв'язання. Користуючись залежністю лінійного коефіцієнта ослаблення μ для γ -променів від енергії фотонів для різних матеріалів (рис.7.2), знаходимо:

$$\mu_{Pb} = 0,6 \text{ см}^{-1}; \mu_{Pb} = 5,08 \text{ см}^{-1};$$

Обчислимо значення товщини шару половинного ослаблення за формулою (6.13):

$$X_{\frac{1}{2}}^{\beta} = \frac{0,693}{0,6} = 1,15 \text{ (см)};$$

$$X_{\frac{1}{2}}^{Pb} = \frac{0,693}{5,08} = 0,14 \text{ (см)}.$$

При однаковій енергії пучка фотонів, що падає на зразки зі свинцю і бетону, товщина половинного шару ослаблення для свинцю значно менша, ніж для бетону, тому свинець використовується як заповнювач для приготування особливо важких бетонів спеціального призначення, які використовуються для захисту від випромінювання.

Частина II. ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ «ФІЗИКА В БУДІВНИЦТВІ»

Одним із найважливіших стратегічних завдань сучасної вищої професійної школи є формування професійної компетентності випускника, вимоги до якої встановлюють Національна рамка кваліфікацій, Державний стандарт освіти, освітньо-професійна програма (ОПП) та освітньо-кваліфікаційна характеристика (ОКХ). Згідно з цими документами майбутній фахівець, який буде працювати на виробництві у XXI сторіччі, повинен не тільки володіти відповідним рівнем професійних знань, вмінь та навичок, які утворюють основу компетентності, але й уміти здійснювати пошук, аналіз і оцінку інформації, необхідної для постановки і вирішення професійних завдань, професійного та особистісного розвитку; використовувати інформаційно-комунікативні технології для вдосконалення професійної діяльності; займатися самоосвітою. В.Г. Кремень зауважує, що «потреби сьогодення диктують необхідність не просто механічно передавати студентам суму знань, а вчити їх здобувати інформацію і, головне, виробляти вміння і потребу їх застосовувати». Сформованість зазначених якостей надає випускнику конкурентних переваг на сучасному ринку праці. У зв'язку з цим все більшого значення в організації навчального процесу набуває така його форма, як самостійна робота студента (СРС).

СРС вважається найбільш ефективним видом навчальних занять, які сприяють активному оволодінню навчальним матеріалом на основі вміння використовувати різні засоби інформації з метою пошуку необхідних знань.

Дисципліна «Фізика в будівництві» є складовою варіативної частини навчальної програми зі спеціальності 6.051302 – «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр». Її особливість полягає у міждисциплінарному змісті, що поєднує теорію окремих розділів фізики твердого тіла з їх прикладним використанням у будівельному матеріалознавстві. Це дає можливість усвідомити вагомість

фундаментальних знань з фізики у загальноінженерній підготовці, зокрема усвідомити що саме на властивостях конденсованого стану речовини базуються розробка найбільш якісних сучасних будівельних матеріалів, а також технологія їх виробництва.

Виходячи з поставленої мети, самостійна робота студента з вивчення курсу «Фізика в будівництві» є найефективнішою формою організації пізнавального процесу, що дозволяє розвинути пізнавальні інтереси студента, вивести його на новий рівень знань – творчий.

Розділ I. ПОНЯТТЯ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Самостійна робота студента – це активна і цілеспрямована діяльність, що забезпечує формування умінь і навичок та дозволяє з ефективним використанням сил і часу набути необхідної науково-пізнавальної інформації. Проте, визнаючи важливість самостійної роботи з вивчення дисципліни, не можна в той же час ставити її на перше місце серед інших форм навчання.

СРС – це багатопланова і поліфункціональна форма навчального процесу у ВНЗ, що визначається двоєдиністю цілей:

- формування самостійності студента (спеціальна мета навчання);
- розвиток здібностей, вмінь, знань та навичок студентів (загальна мета навчання).

В основу організації самостійної роботи покладено такі наукові принципи:

- науковості і практичної значимості (в процесі навчання студент повинен оволодіти методами наукового дослідження, які надалі будуть використовуватися у професійній практичній діяльності);

- зв'язку теоретичних знань та практичного їх застосування;
- систематичності й послідовності (процес самоосвіти мусить бути безперервним і цілеспрямованим, тільки тоді засвоєння знань буде повноцінним);
- відповідність складності змісту реальним особистісним можливостям (при самостійному вивченні матеріалу важливо враховувати ступінь підготовленості, рівень попередніх знань, а також слід звернути увагу на фізіологічні особливості і стан здоров'я особистості).

У процесі самостійної роботи над навчальним матеріалом необхідно займати **свідому і активну позицію**, не механічно заучувати, а глибоко розуміти і осмислювати зміст курсу, що вивчається. Саме таке ставлення до навчання – шлях до глибокого оволодіння професійними знаннями та готовністю їх

поповнення у разі необхідності в умовах стрімких змін що відбуваються у виробничій галузі.

Предметно та організаційно СРС з дисципліни «Фізика в будівництві» визначається освітньо-професійною програмою (ОПП) та навчальним планом спеціальності 6.051302 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр». Відповідно до робочої програми на самостійну роботу відводиться 36 годин (1 кредит).

В цілому структура СРС складається з роботи, яка організується викладачем, та роботи, яку студент організує самостійно, без контролю викладача. Тому основними видами самостійної роботи є :

- аудиторна самостійна робота під час основних видів занять (лекцій, практичних та лабораторних занять);
- самостійна робота під контролем викладача (планові консультації, залік, науково-дослідна робота у наукових гуртках);
- позааудиторна самостійна робота під час виконання студентом домашніх завдань навчального і творчого характеру.

Крім цього, виділяють обов'язкову СРС (виконання домашніх завдань, підготовка до всіх видів аудиторних занять, передбачених навчальним планом студента) та добровільну СРС (підготовка до участі в конкурсах, олімпіадах, студентських наукових конференціях; написання наукових доповідей, рефератів, статей).

Розділ 2.

МЕТА І ЗАВДАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА З ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ «ФІЗИКА В БУДІВНИЦТВІ»

Завдання дисципліни полягає у формуванні фізичних уявлень про основні поняття, закони та явища фізики твердого тіла й розкриття, на їх основі, особливостей протікання фізичних процесів у будівельних матеріалах.

Мета викладання дисципліни полягає в оволодінні методами дослідження механічних, теплових, акустичних властивостей будівельних матеріалів на основі властивостей конденсованого стану речовини.

Згідно з поставленою метою вивчення дисципліни завдання самостійної роботи поділяються на загальні та предметні.

Загальні завдання самостійної роботи:

- поглиблення та систематизація фундаментальних знань з природознавчих та спеціальних дисциплін;

- оволодіння вмінням використання нормативних документів та довідкової літератури;

- розвиток пізнавальних здібностей, творчої активності, самостійності мислення, здатності до саморозвитку, самовдосконалення і самореалізації.

Предметні завдання самостійної роботи полягають у формуванні:

- умінь дослідницької роботи;
- умінь визначати істотні ознаки об'єкта дослідження, порівнювати їх і на цій основі робити узагальнення;
- умінь визначати спільні та відмінні риси досліджуваного об'єкта та будувати докази на основі істотних ознак.
- умінь здійснювати науковий пошук та виконувати наукові дослідження з поставленої тематики.

Розділ 3.

ФОРМИ ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Відповідно до навчального плану спеціальності 6.051302 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», дисципліна «Фізика в будівництві» вивчається у VI семестрі та складається з трьох змістових модулів (ДОДАТОК А), поділених на теоретичний та практичний блоки.

Вивчення змісту блоків здійснюється за допомогою різних видів занять: лекцій, практичних занять, лабораторних робіт. Під час проведення занять використовуються різні методи навчання, серед яких все більш вагомим значенням набуває аудиторна самостійна робота. Це сприяє більш ґрунтовному засвоєнню навчального матеріалу і додаткової інформації з дисципліни.

Наприклад, робота з джерелами інформації сприяє набуттю умінь і навичок виділяти головне, створювати алгоритм і працювати згідно з ним, самостійно здобувати знання, систематизувати та узагальнювати їх. Спостереження за фізичними об'єктами використовується з метою визначення та усвідомлення їх характерних особливих ознак. Розв'язання задач сприяє запам'ятовуванню, поглибленню і перевірці засвоєних знань, а також набуттю вміння проводити розрахунки та аналізувати процеси, що відбуваються в будівельних матеріалах. Дослідницька діяльність – вінець самостійної роботи студента. Такий вид діяльності передбачає високий рівень мотивації навчальної діяльності. В дослідницькій роботі вагоме місце займають порівняльно-аналітичні спостереження, які стимулюють розвиток довільної уваги та заглиблення в пізнавальну діяльність. Конструювання, яке дозволяє глибше

проникнути в суть предмета, знайти взаємозв'язок між окремими розділами навчального матеріалу даної дисципліни, розташувати його окремі частини в потрібній логічній послідовності, зробити після вивчення теми достовірні висновки.

Отже, з метою досягнення найбільш якісних результатів, у залежності від мети окремого виду занять, слід використовувати такі традиційні форми самостійної роботи:

- робота з науковою та навчальною літературою, довідковими матеріалами, та матеріалами періодики для підготовки до аудиторних занять (лекційних, практичних та лабораторних) і виконання завдань, передбачених робочою програмою дисципліни;
- підготовка до практичних занять та розв'язання задач;
- підготовка до лабораторних занять та проведення лабораторних досліджень;
- підготовка до усіх видів контрольних випробувань (у тому числі до модульного та підсумкового);
- виконання індивідуального навчально-дослідного завдання (ІНДЗ) та розрахункового завдання;
- підготовка доповідей, рефератів, творчих робіт для участі в роботі факультативів, спецсеминарів, у студентських наукових і науково-практичних конференціях, семінарах, олімпіадах, а також інноваційні форми самостійної роботи.

Ці форми СРС передбачають:

- інформаційний пошук та роботу у мережі INTERNET;
- E-mail листування;
- участь в INTERNET-конференціях.

Розділ 4. ТЕХНОЛОГІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ОКРЕМИХ ФОРМ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

4.1 Робота з навчальною, науковою та довідковою літературою

Зміст самостійної навчальної роботи студента полягає в оволодінні і засвоєнні знань за фахом. Основою цього є робота з інформаційним джерелом. Під час вивчення дисципліни «Фізика в будівництві» знання як інформація в основному представлені в текстовому варіанті – підручники, словники, довідники, нормативні матеріали, матеріали періодичного друку, наукові тексти. Вони існують у різних формах – друкарській (книги, журнали) і електронна

(довідково-правові системи, а також Інтернет і електронні диски). Отже, домінуюче місце у вивченні дисципліни «Фізика в будівництві» займає самостійна робота з навчально-методичною, науковою, науково-популярною і довідковою літературою.

Цілеспрямоване читання спеціальної літератури – це процес накопичення й розширення знань за умов сформованості вміння працювати з книгою, правильно оцінювати її наукову спрямованість та зміст, фіксувати необхідний обсяг фактичних даних у зручній формі.

Ефективність роботи з різними видами літератури безпосередньо залежить від техніки читання.

Перший етап – попереднє ознайомлення з книгою. Даний етап дозволяє детально вивчити книгу, її структурні компоненти та організацію довідково-бібліографічного апарата, одержати загальне уявлення про неї. При цьому необхідно звернути особливу увагу на ті структурні елементи книги, які дають можливість попередньої її оцінки: заголовок, прізвище автора, видавництво, час видання, анотацію, авторську або видавничу передмову, довідково-бібліографічний апарат (покажчики, додатки, перелік скорочень, картографічний матеріал).

Другий етап – безпосереднє читання книги. Існує декілька видів читання літератури:

- «пошукове» читання – швидкий оглядовий перегляд змісту книги з метою виявлення необхідного матеріалу, визначення його навчальної й наукової цінності та складання уявлення про базові поняття проблеми, що цікавить читача;
- вивчення матеріалу – ретельне опрацювання всієї книги або окремих її частин з метою вдумливого засвоєння (а не механічного запам'ятовування) інформації такою мірою, якої потребує характер певної самостійної роботи;
- аналітико-критичне (творче) читання, засноване на вмінні попередньо формулювати питання, які вимагають особливого пояснення в процесі роботи з книгою; читати вдумливо й розмірено, простежуючи послідовність ходу думок автора, логіку його доказів; встановлювати зв'язки між окремими елементами тексту; виділяти ключові інформаційні дані й визначати можливу різницю між ними та ілюстративними прикладами; зіставляти однорідні факти, висвітлені в різній літературі, взаємодоповнювати їх, піддавати перевірці спірні положення; порівнювати точки зору кількох авторів щодо однієї проблеми; користуватися довідковими виданнями, у тому числі фізичними словниками, для уточнення невідомих термінів і понять; критично й творчо сприймати навчально-науковий матеріал, що стимулює процес формування самостійного мислення.

З усіх розглянутих видів читання основним для студентів є вивчення матеріалу книги. Саме воно дозволяє в роботі з навчальною літературою накопичувати знання в різних галузях. Ось чому саме цей вид читання в рамках

навчальної діяльності повинен бути освоєний в першу чергу. Крім того, у процесі оволодіння даним видом читання формуються основні прийоми, що підвищують ефективність роботи з науковим текстом.

Обов'язковим елементом читання наукової та спеціальної літератури є ведення записів. Це сприяє кращому засвоєнню фактичного матеріалу, дає можливість зберегти його в зручному для використання вигляді. Записи повинні бути якнайповнішими, зручно складеними, розташованими таким чином, щоб наочно демонструвати логічні зв'язки та ієрархію понять. Досягти цього можливо за допомогою системи заголовків і підзаголовків, ключових слів, абзаців, нумерації окремих понять. Вести записи бажано на одній стороні аркуша, що дозволить прискорити їхній пошук і систематизацію, робити додаткові текстові вставки, ефективно використовувати під час роботи над доповідями, рефератами, іншими навчальними завданнями. Існує багато видів записів, які можуть практикуватися студентами під час самостійної роботи. Серед них найбільш ефективними є такі.

Анотування (від лат. annotation – примітка, позначка) – короткий виклад змісту книги, статті або окремого текстового фрагмента з їхньою критичною оцінкою. Складання анотації часто не вимагає глибокого ознайомлення зі змістом книги, однак і під час поверхневого перегляду важливо вміти виділяти головні цілі дослідження, його ключові моменти, кінцеві висновки. Специфічною ознакою анотування є лаконічність й чіткість формулювань. Уміння складати анотації має велике значення під час виконання такого виду самостійної роботи, як підготовка бібліографічних оглядів, які дозволяють виявити, вивчити й проаналізувати сутність проблеми. При цьому важливо, щоб студент умів не тільки анотувати знайдені наукові джерела, але й на підставі анотацій визначати спільні та відмінні риси цілей і досліджень, пріоритетних напрямків, зроблених висновків.

Складання плану – форма запису під час читання, яка відображає зміст прочитаного і структуру книги, а також дозволяє легко відновити в пам'яті її головні положення.

Розрізняють:

- простий план, що передбачає умовний поділ тексту на закінчені частини, виділення ключових думок, їх коротке формулювання й запис під нумерацією; незважаючи на стислість, простий план повинен бути значно докладнішим за поданий у книзі зміст і містити чітке формулювання ключової думки відповідного текстового фрагмента;

- розгорнутий план, найбільш змістовний і зручний для подальшого відтворення отриманих знань (вимагає виділення з кожної значеннєвої частини тих окремих положень, що уточнюють головне; формулювання пунктів може бути досить розгорнутим, навіть тезовим, допускається використання найбільш яскравих цитат, при цьому основні пункти нумеруються римськими цифрами, а підпункти – арабськими).

Крім загального плану, можуть складатися плани окремих частин книги, наприклад, у випадку, коли видання не є однорідним за змістом: збірки наукових статей, періодика.

Тези (від греч. thesis – положення) – стисло сформульовані головні положення навчального посібника, наукової або науково-популярної роботи, документального матеріалу (а також лекції, доповіді, повідомлення). Необхідною умовою для складання тез є досить повне засвоєння змісту книги, чітке розуміння її домінуючих ідей і висновків. Складати тези треба в логічній послідовності, відповідно до черговості викладення в книзі авторських думок.

Конспект (від лат. conspectus – огляд) – один з найпоширеніших видів записів, який передбачає письмовий огляд основних думок будь-якої друкованої роботи, а також лекцій, доповідей, промов. Найпростішою формою конспекту є текстовий конспект, що вимагає глибокого ознайомлення з текстом або його фрагментами, виділення ключових положень і фіксування їх у письмовій формі.

Словник термінів – вибірково запис фізичних і технічних термінів, які зустрічаються в науковій літературі, з їх детальним поясненням. Складати словник слід за абеткою, що значно полегшить користування ним. Встановлюючи значення незнайомого терміна за допомогою довідкових видань, необхідно чітко усвідомлювати багатоваріантність значеннєвих відтінків деяких слів і вчитися самостійно виявляти потрібне значення відповідно до контексту досліджуваної проблеми. Крім того, корисно простежувати етимологію слів іноземного походження. При цьому важливо фіксувати незнайомі слова і їх значення не тільки на папері, але й у пам'яті, що значно збагатить лексикон, зробить мову більш грамотною і професійною.

Самостійна робота з навчально-науковою літературою також вимагає вміння складання бібліографії з певної проблеми, що досить важливо під час написання реферату або доповіді, оскільки є одним з початкових, підготовчих етапів цих видів самостійної роботи.

Значно поліпшить будь-який пізнавальний процес використання іноземної літератури як перекладної, так і оригінальної (якщо студент вільно володіє іноземною мовою).

Однією з найважливіших вимог роботи з літературою є правильне оформлення бібліографічного списку, який складається згідно з вимогами ДСТУ.

4.2 Написання рефератів та підготовка доповідей

Дисципліна «Фізика в будівництві» є особливою з точки зору поєднання фундаментальних знань з окремих розділів фізики та загальнопрофесійних знань зі спеціальності 6.051302 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр». Одним з основних

її завдань є аналіз використання фізичних явищ і законів у технології виробництва сучасних будівельних матеріалів. Проведений аналіз завершується написанням реферату. Реферат (від лат. *referre* – доповідати) – письмова робота науково-дослідницького характеру, в якій досить стисло, оглядово викладається сутність певного наукового питання.

Головним завданням цього виду самостійної роботи є формування початкових вмінь і навичок наукового дослідження, до яких відносяться:

- вміння обґрунтувати актуальність теми, що вивчається; прослідкувати ступінь її наукового висвітлення, ґрунтуючись на об'єктивних фактах; довести необхідність проведення наукового дослідження проблеми;
- складання бібліографії з обраної наукової теми, тобто складання якнайповнішого списку відповідних літературних джерел. При цьому в роботах подібного рівня не рекомендується обмежуватися лише навчальною літературою (підручниками, посібниками або методичними розробками), а обов'язково слід ознайомитися з кількома спеціальними науковими або науково-популярними виданнями, що підвищить якісний рівень реферату, його наукову цінність;
- глибоке вивчення наукових джерел – знаходження найбільш яскравих документальних підтверджень тим фактам, що викладаються в рефераті, ретельний аналіз та оцінка відповідних документів;
- аналіз ступеня вивченості проблеми – виділення головних напрямків дослідження наукової проблеми та її ключових аспектів, які вивчалися науковцями в різні часи й періоди, з'ясування існуючих наукових поглядів, порівняння різних точок зору на проблему та їх оцінка;
- систематизація й узагальнення фактичного матеріалу – накопичення необхідного обсягу інформації відповідно до теми і структури реферату, відбір найбільш переконливих і вагомих даних;
- аргументоване та логічне викладення особистого сприйняття проблеми, що вивчається.

Головною умовою досягнення логічності під час написання реферату є чітке розуміння мети, головних напрямків і кінцевого результату дослідження. Робота повинна бути переконливою, містити органічний зв'язок між окремими питаннями, а також між кожним з них і всією темою в цілому.

Робота над рефератом повинна бути послідовною, з чітким урахуванням її головних етапів, які передбачають:

- обрання теми дослідження,
- складання плану реферату,
- виявлення первинної бази обраної проблеми,
- конспектування літератури із зазначенням сторінок розташування в тексті,
- власне написання реферативного дослідження.

Як правило, обсяг реферату коливається від 15 до 25 друкованих сторінок і не повинен перевищувати максимальну межу.

Структура реферату:

- вступ, який містить обґрунтування теми, мети роботи, огляд наукової та довідкової літератури з проблеми, що вивчається;
- змістовна частина, де розкриваються ключові питання дослідження;
- висновок;
- список використаної літератури;
- додатки, які не є обов'язковими, але іноді можуть бути доцільними; їх потрібно оформляти у вигляді таблиць, схем, ілюстрацій.

Слід особливо підкреслити, що сьогодні, коли дуже широко застосовуються інноваційні електронні інформаційні джерела, зокрема комп'ютерні навчальні програми та мережа INTERNET, необхідно максимально обережно ставитися до так званих «банків рефератів», які вони пропонують. У більшості випадків такі реферати мають низьку якість, містять суперечливі висновки, багато фактичних та іншого виду помилок. Саме через це студенти повинні відповідально ставитися до використання подібної інформації й ретельно перевіряти її за допомогою інших, більш авторитетних, джерел. Крім того, часто подібні реферати не оформлені відповідним чином і не витримані структурно. Саме через це механічне використання готових рефератів неприпустиме, не може вважатися повноцінною самостійною роботою, не приводить до позитивних навчальних результатів і не дає студенту сподівання на високу оцінку.

Обов'язковим етапом роботи над рефератом є його захист, який також вважається різновидом самостійної роботи і передбачає коротке викладення студентом головного змісту свого дослідження та відповіді на запитання у рамках дослідження. У ході захисту легко визначити ступінь обізнаності автора у досліджуваній темі та рівень його теоретичної підготовки, вміння публічно відстоювати власну точку зору. Відповідно до цих критеріїв і оцінюється реферат.

У самостійній роботі над дисципліною «Фізика в будівництві» особливе місце займає підготовка доповідей – порівняно коротке повідомлення (на 5–10 хвилин), що є доповненням до головних питань з навчального курсу.

Методичне значення доповіді полягає в тому, що під час роботи над нею у студентів формуються й розвиваються:

- вміння працювати над спеціальною науковою та довідковою літературою;
- здатність аналізувати й узагальнювати фактичний матеріал;
- навички полемізувати та відстоювати власну точку зору;
- культура мовлення.

Матеріалом для доповіді можуть служити статті періодичного видання чи розділи підручника. Принципи підготовки доповіді дуже схожі на принципи

підготовки реферату: ті ж самі етапи роботи, практично та ж сама структура. Всі вимоги, які ставляться до реферату (огляд і оцінка джерел, логічність і послідовність викладення, переконливість доказів, обов'язкові висновки) безпосередньо стосуються і якісної доповіді.

Проте є й особливість роботи над доповіддю, яку одночасно можна вважати її найбільшою складністю, – на чітке й виразне викладення змісту проблеми студенту надається дуже короткий відрізок часу. Саме через це неабиякого значення набуває необхідність розвивати і вдосконалювати культуру мовлення та ораторські здібності. Незалежно від аудиторії, доповідь, повинна бути грамотною, логічно й послідовно виваженою. Не слід переважувати її неперевіреною науковою інформацією, зайвими фактичними подробицями, що заважає слухачам легко сприймати нову для них інформацію. Бажаним є образне подання доповіді – наповнення її цікавими фактами, яскравими, влучними цитатами, використання наочного матеріалу (діаграми, графіки, схеми).

Доповідач повинен чітко висловлюватися, контролювати свою поведінку, обмежувати жестикуляцію, слідкувати за кількістю і тривалістю пауз, загальною динамічністю мови. Більш ефективним оволодіння студентом культурою та естетикою доповідача, безумовно, буде під керівництвом викладача.

По закінченні доповіді доцільно обов'язково влаштувати її обговорення, під час якого самостійна робота на семінарі набуває вже колективного характеру, і колектив слухачів (принаймні, найсильніші й найактивніші з них) підключаються до обговорення проблеми, яку виклав доповідач, зокрема: ставлять додаткові питання, полемізують із доповідачем щодо суперечливих або незрозумілих питань, оцінюють якість і рівень доповіді, надають загальну рецензію (як правило, рецензентів доцільно призначати заздалегідь, оскільки для конструктивного обговорення потрібно ознайомитися із доповіддю і всебічно проаналізувати результати роботи). Самостійна робота студентів з обговорення доповіді також повинна оцінюватися відповідним чином в залежності від активності слухачів.

Слід особливо підкреслити, що даний вид самостійної роботи є важливим не тільки у навчальній діяльності, але й має значення для професійної підготовки майбутніх фахівців, оскільки розвиває навички публічних виступів, дозволяє впевнено відчувати себе перед великою аудиторією, підвищує рівень гуманітарної освіченості.

4.3. Самостійна робота студентів в інформаційній мережі Internet

Одним з головних завдань сучасної вищої освіти є комп'ютеризація, реалізація якої потенційно сприяє підвищенню якості навчання. Мережа

електронних засобів комунікації передбачає можливості вільного доступу до різних інформаційних джерел і задоволення зростаючих інформаційних потреб сучасної молоді шляхом залучення усіх ресурсів міжкультурного спілкування. З інноваційними технологіями навчання сьогодні пов'язані реальні перспективи підготовки у ВНЗ України конкурентоспроможних фахівців.

Комп'ютер – універсальний навчальний засіб, дає доступ до Інтернету, можливість користуватися науковими базами даних, віртуальними бібліотеками, інформаційно-пошуковими системами. Саме через це в сучасних українських ВНЗ активно поширюється новий тип культури – інформаційний.

Одним з актуальних завдань під час вивчення курсу «Фізика в будівництві» є формування здатності удосконалювати і розвивати практичні уміння з оволодіння новими інформаційними технологіями і за їх допомогою самостійно здобувати необхідні знання.

Ефективній самостійній роботі над навчальним матеріалом з використанням інноваційних технічних засобів, зокрема, надає можливість Internet, який сприяє:

- стимулюванню пізнавальної діяльності,
- успішному засвоєнню програм навчальних дисциплін,
- розширенню інформаційного простору,
- зміцненню вміння користуватися сучасними інноваційними розробками.

При цьому можна практикувати такі форми самостійної роботи з використанням мережі INTERNET:

1 Пошук інформації – користування базами даних, інформаційно-пошуковими та інформаційно-довідковими системами, автоматизованими бібліотечними системами, електронними журналами.

2 Організація діалогу – використання електронної пошти (за її допомогою можна, наприклад, влаштувати віртуальні дискусії), користування графічними редакторами синхронних і відрядкованих телеконференцій.

3 Створення тематичних web-сторінок – використання http - редакторів і графічних редакторів.

Але найбільш оптимальним сьогодні вважають такий вид організації самостійної роботи студентів, як web-квест. Це – розроблений у 1995 р. у державному університеті Сан-Дієго дослідниками Б. Доджем і Т. Марчем вид дослідницької діяльності, для виконання якої студенти здійснюють самостійний пошук інформації в мережі за вказаними адресами з метою найкращого розподілу навчального часу, здобуття фактичних даних, розвитку критичного мислення, здібностей до аналізу, синтезу, оцінки отриманих знань.

За своєю суттю web-квест є своєрідною web-сторінкою і повинен складатися з таких елементів:

- вступ, де зазначаються строки проведення певної самостійної роботи і задається вихідна ситуація;
- завдання різного ступеня складності для самостійного виконання;
- посилання на ресурси мережі, які надають можливість знайти і «скачати» необхідний матеріал: електронні адреси, тематичні чати, книги або методичні посібники, що знаходяться в бібліотеках (деякі ресурси можуть бути скопійовані на web-квест, що заощаджує студентський час);
- поетапний опис процесу виконання певного завдання з поясненням принципу переробки інформації;
- допоміжні питання, що настановлюють на правильні рішення;
- причинно-наслідкові таблиці, схеми, діаграми;
- висновки, які містять орієнтовні результати виконання завдання, шляхи подальшої самостійної роботи із зазначеної теми й ті галузі, де можливо застосувати отримані результати і навички.

Web-квести можуть бути:

- короткостроковими, тобто розрахованими на 1–3 сеанси; їх мета - елементарне набуття знань з певної теми;
- довгостроковими (від одного тижня до двох місяців), спрямованими на розширення й уточнення понять, глибокий аналіз отриманих знань, їх трансформацію й оволодіння матеріалом настільки, щоб самостійно створювати та ускладнювати завдання для роботи за темою.

Розділ 5. ПРОГРАМА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

5.1 Самостійна робота над матеріалом теоретичного та практичного блоків

Теоретичний блок вивчення дисципліни «Фізика в будівництві» утворює курс лекцій, де мета полягає у набутті фундаментальних знань з окремих розділів фізики твердого тіла (фізичний блок) та оволодінні на їх основі теоретичними знаннями з будівельного матеріалознавства. Такий дуальний підхід до викладання навчального матеріалу сприяє фундаменталізації підготовки за фахом.

Практичний блок курсу утворюють практичні заняття та лабораторні роботи. Його мета – закріплення теоретичних положень з дисципліни «Фізика в будівництві» та відпрацювання вмінь розв'язання задач із окремих розділів фізики (фізичний блок), які повинні стати підґрунтям набуття міждисциплі-

нарних вмінь щодо розв'язання загальноінженерних задач (будівельний блок) на основі використання фундаментальних знань.

На кожному практичному занятті коротко розглядаються теоретичні положення, необхідні для осмислення розв'язання задач, перевіряється виконання домашніх завдань та видається завдання на наступне заняття.

Головна мета проведення лабораторних робіт – набуття необхідних знань та навичок проведення експерименту. Особливість проведення лабораторних робіт у запропонованому курсі полягає в тому, що під час їх виконання повністю відсутній репродуктивний метод, а використовується частково-пошуковий та дослідницький методи. За такої методики лабораторний експеримент стає джерелом нових знань, які здобуваються в результаті безпосереднього спостереження, а також дозволяє встановити функціональну залежність між певними фізичними явищами і законами та практичним їх використанням. Виконанню кожної лабораторної роботи передують ґрунтовна самостійна теоретична підготовка з фізичного та будівельного блоків, а також засвоєння методики проведення експерименту й обчислення результатів вимірювань. Досить важливим етапом лабораторної роботи є самостійний аналіз явищ, які досліджувалися, та порівняння їх з теоретичними відомостями.

Для досягнення найбільш високого рівня засвоєння матеріалу теоретичного та практичного блоків пропонується інтегровано використовувати аудиторну самостійну роботу під керівництвом викладача та позааудиторну самостійну роботу. Схема організації самостійної роботи подана у таблицях В.1, В.2.

Широкі можливості у процесі організації самостійної роботи з курсу має використання комп'ютерної техніки на різних етапах цієї роботи. Використання комп'ютера дозволяє моделювати фізичні процеси, складні фізичні та технічні установки, розглядати фізичні процеси в динаміці та їх практичне застосування у виробництві будівельних матеріалів. Застосування аналого-цифрових перетворювачів дає можливість використовувати комп'ютер під час виконання лабораторних робіт для визначення фізичних величин та графічної інтерпретації протікання фізичних процесів. Застосування електронно-обчислювальної техніки під час обробки результатів експерименту дозволяє уникнути великих затрат навчального часу на виконання одноманітних обчислень та збільшити частку творчої роботи.

5.2 Форми контролю знань

Для реалізації поставленої мети та завдань дисципліни «Фізика в будівництві» як основний методологічний прийом використовується кредитно-модульна технологія навчання. В основу побудови даної технології покладено поділ навчального матеріалу на окремі частини (модулі), вивчення кожного

модуля завершується поточним модульним контролем (ПМК), після вивчення всіх модулів дисципліни проводиться підсумковий модульний (ПМ) контроль та залік. До даного виду контролю допускаються тільки ті студенти, які відвідали не менше 2/3 занять з дисципліни і набрали за підсумками 3-х ПМК не менше 40 балів.

Вивчення дисципліни (кредиту) може бути зараховане і без підсумкового контролю, який, на відміну від ПМК, не є обов'язковим. Середньоарифметичний результат підсумку балів, одержаних за ПМК, і становить рейтинг студента (залікову оцінку), але за умови, що студент набрав не менше 60 балів. У системі оцінювання знань, яка використовується на кафедрі фізики, показник рейтингу збігається з сумарною оцінкою проведених контрольних заходів. При цьому базова ціна кожного ПМК у балах складає 30,3. Рейтинг ПМК може бути підвищений не більше ніж на одиницю шкали (наприклад з "В" до "А") протягом терміну, встановленого деканатом з моменту закінчення термінів його проведення. В таблиці 2.1 наведено загальне число балів, які можна набрати під час вивчення дисципліни «Фізика в будівництві» за один модуль, а в таблиці 2.2 - співвідношення між числом набраних балів і результуючою оцінкою за семестр і за один модуль.

Таблиця 2.1 – Рейтингова оцінка знань студента за один модуль

Інформаційний модуль	Лекції (год)	Бали	Практичні заняття (год)	Інд. завдання (бали)	Лаб. роботи (число робіт)	Бали	Загальне число балів
Будова та механічні властивості твердих тіл	8	7–11	2	6–11	4	6–11	20–33,3

Оцінка за ПМК складається з оцінок, одержаних у результаті захисту лабораторної роботи та захисту індивідуальних завдань. Відповідно до структури залікового кредиту протягом навчального семестру передбачається виконання трьох завдань.

Для забезпечення якісного ПК використовується дворівнева система індивідуальних завдань з наростаючим ступенем складності. Індивідуальні завдання I рівня складності (початковий рівень) містять так звані «підстановочні» задачі, розв'язання яких вимагає від студентів знання основних

теоретичних положень розділу, законів та рівнянь на рівні розпізнавання. Виконання студентами завдання даного рівня складності створює передумови до усвідомлення і запам'ятовування основних положень розділу, що вивчається.

Таблиця 2.2 – Співвідношення між числом набраних балів і результуючою оцінкою за семестр і за один модуль

За шкалою ECTS	За національною шкалою	За шкалою університету	За один модуль
A	Відмінно	90 – 100	30,0 – 33,3
B	Добре	82 – 89	27,5 – 29,5
C		74 – 81	25,0 – 27,0
D	Задовільно	64 – 73	22,0 – 24,5
E		60 – 63	20,0 – 21,5
FX	Незадовільно	35 – 59	13,5 – 19,5
F		1 – 34	0,5 – 13

Індивідуальні завдання II рівня складності є набором задач, розв'язуючи які використовується заздалегідь відомий порядок дій (алгоритм) або завдань, для виконання яких необхідно реконструювати, пристосовувати наявні формули до нової ситуації. Очевидно, що для виконання цих завдань необхідно глибоко розуміти фізичні закони. Більшість представлених у навчальному виданні завдань (будівельний блок) є реальними профільованими інженерними задачами. Виконання такого типу завдань сприяє набуттю студентами навичок для вирішення надалі технічних нестандартних проблем.

Під час виконання завдань II рівня складності необхідно мати на увазі, що розв'язання задач вимагає уміння аналітично мислити, оскільки знання законів фізики передбачає не тільки формулювання цих завдань, але й застосування їх у конкретних випадках. Під час розв'язання задач слід використовувати не тільки інформацію, отриману на лекціях з дисципліни «Фізика в будівництві», але й знання з математики, будівельної механіки та загальнотехнічних дисциплін.

- дайте визначення кожної з величин, що розглядаються в пунктах 2-4;
- вкажіть методи експериментального визначення цих величин;
- подайте теоретичне обґрунтування одержаних експериментальних результатів.

3. Розв'яжіть задачі згідно з завданням викладача.

Розділ 6. ЗАВДАННЯ ДО ПОТОЧНОГО МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ

Модульні завдання складені відповідно до програми спецкурсу. Вони включають матеріал двох блоків – фізичного та будівельного. Фізичний блок базується на експериментальному і теоретичному розгляді деяких питань сучасної фізики твердого тіла. Матеріал другого блоку являє собою, в основному, довідкові дані, а обговорення експериментальних результатів має, як правило, якісний характер. Необхідність вивчення студентами «зайвого» матеріалу (фізики твердого тіла) обумовлена тим, що саме фізика твердого тіла є основою високих темпів розробки нових матеріалів та їх упровадження, що забезпечує вирішення складних науково-технічних проблем взагалі і в будівельній індустрії зокрема, оскільки саме вибір матеріалу визначає успіх інженерно-технічних рішень. Яскравий приклад – використання наноматеріалів у будівельній індустрії.

Модуль 1. СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Завдання до модульного контролю.

Опишіть структуру та механічні властивості двох матеріалів: металу (фізичний блок) і будівельного матеріалу (будівельний блок) згідно з завданням викладача.

1. Визначить розподіл прикладеного навантаження між арматурою (сталевими стрижнями) і матрицею бетону у колоні із збірного залізобетону в залежності від значення S_{cm} / S_{σ} , де S_{cm} і S_{σ} площа перерізу арматури і матриці, відповідно. Побудувати графік залежності $\sigma_{cm} / \sigma_{\sigma} = f(S_{cm} / S_{\sigma})$.

2. Заповніть тест-карту 1 (Додаток В).

План заповнення пунктів 2-4 тест-карти 1.

Модуль 2. ТЕПЛОВІ ТА АКУСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ. НАНОМАТЕРІАЛИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

Завдання до модульного контролю.

1. Наведіть приклади речовин, що мають високе і низьке значення питомої теплоємності, коефіцієнтів теплопровідності та лінійного розширення. Описати теплові властивості твердих тіл з позицій класичної фізики (фізичний блок).

2. Наведіть приклади будівельних матеріалів, що мають високі і низькі значення питомої теплоємності, коефіцієнтів теплопровідності. Вказати, як впливають на теплові властивості будівельних матеріалів їх густина, пористість, вологість (будівельний блок). Навести значення коефіцієнтів лінійного розширення для бетону, сталі, залізобетону.

3. Для двошарової плоскої стінки, що має термічний опір $R_T = 2,5 \frac{\text{м}^2\text{К}}{\text{Вт}}$, підберіть матеріали, які забезпечили б задане значення R_T .

4. Заповніть тест-карту 2 (Додаток В).

5. Розв'яжіть задачі згідно з завданням викладача.

Модуль 3. ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ. КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ РАДІОАКТИВНІСТЬ

Завдання до модульного контролю.

1. Напишіть реферат за темою згідно з завданням викладача:

- Нанотехнології в будівництві.
- Акустичні властивості будівельних матеріалів і виробів.
- Радіаційні властивості будівельних матеріалів.
- Неруйнівні методи контролю якості в будівництві.

Задачі (фізичний блок)

1. Поперечний переріз алюмінієвого стрижня зменшився на 62% за навантності руйнівного навантаження 110 мПа, вважаючи, що істинне напруження σ_{ict} та істинна деформація до руйнування ϵ_{ict} .
2. Під час розтягування мідної дротини, поперечний переріз якої $S=1,5 \text{ мм}^2$, початок остаточної деформації спостерігався за навантаження $F=44,1 \text{ Н}$. Знайдіть границю пружності p матеріалу дроту?
3. Яким повинен бути граничний діаметр d сталюго троса, щоб витримати навантаження $F=9,8 \text{ кН}$?
4. Знайдіть довжину ℓ мідної дротини, яка підвішена вертикально та починає рватися під дією сили тяжіння (власної ваги).
5. До даху будинку підвішена сталюна дротина довжиною $\ell = 40 \text{ м}$ та діаметром $d = 2 \text{ мм}$. Яке навантаження F може витримати ця дротина? На скільки вона видовжиться, якщо на неї почепиться людина масою $m=70 \text{ кг}$? Чи буде спостерігатись остаточно деформація, якщо людина відпустить дротину? Границя пружності сталі $p = 294 \text{ мПа}$.
6. До сталеві дротини довжиною $\ell = 1 \text{ м}$ та радіусом $r = 1 \text{ мм}$ підвісили вантаж масою $m = 100 \text{ кг}$. Визначте роботу A розтягу дротини.
7. Використовуючи закон Дюлонга і Пті, знайдіть питому теплоємність: а) міді; б) заліза; в) алюмінію.
8. Використовуючи закон Дюлонга та Пті, знайдіть, у скільки разів питома теплоємність алюмінію більша питомої теплоємності платини.
9. Пластинки з міді (товщиною $d_1 = 9 \text{ мм}$) та заліза (товщиною $d_2 = 3 \text{ мм}$) складені разом. Температура зовнішньої поверхні мідної пластинки становить $t_1 = 50^\circ\text{C}$, температура зовнішньої поверхні залізної $t_2 = 0^\circ\text{C}$. Визначте температуру s поверхні їх дотику. Площа пластинок значно більша порівняно з їх товщиною.
10. Площа поперечного перерізу мідного стрижня $S = 10 \text{ см}^2$, довжина стрижня $\ell = 50 \text{ см}$. Різниця температур на кінцях стрижня $\Delta T = 15 \text{ К}$. Яка кількість теплоти Q_t проходить за одиницю часу крізь стрижень? Втратами тепла знехтувати.

11. Мідна дротина натягнута у гарячому стані за температури $t_1 = 150^\circ\text{C}$ між двома міцними нерухомими стінками. За якої температури охолодження t_2 , дротина розірветься? Вважати, що закон Гука виконується до розриву дротини.
12. Яку довжину ℓ_0 повинні мати за температури $t_0 = 0^\circ\text{C}$ сталевий та мідний стрижні, щоб за будь-якої температури сталевий стрижень був довший, ніж мідний на $\Delta\ell = 5 \text{ см}$?
13. Мідний стрижень затиснуто між двома опорами. Його температуру збільшили на 50°C . Яке напруження виникає в стрижні? Модуль Юнга для міді $E = 13 \cdot 10^{10} \text{ Па}$. Температурний коефіцієнт лінійного розширення міді $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.
14. Визначте енергію деформації залізного дроту W , розтягнутого під дією підвішеного до нього вантажу масою $m = 50 \text{ кг}$, якщо площа поперечного перерізу дроту $S = 1,25 \text{ мм}^2$, його початкова довжина $\ell = 3 \text{ м}$.
15. Скільки атомів припадає на одну елементарну комірку в кристалах з простою, об'ємноцентрованою та гранецентрованою кубічними решітками?
16. Моделлю одновимірного кристалу може бути ланцюжок атомів, розміщених на однакових відстанях d один від одного. Знайдіть для такого кристалу теплоємність при дуже низьких температурах.
17. Поясніть появу терміна фонон. Використовуючи цю концепцію, напишіть вираз для внутрішньої енергії кристалу з N атомів при температурі T .
18. Яка максимальна енергія фононів W_p у кристалі свинцю, якщо його характеристична температура $T_d = 94 \text{ К}$?
19. Вважаючи мінімальну довжину теплових хвиль у кристалі $\lambda = 0,5 \text{ нм}$, а швидкість звуку $v = 5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, визначте температуру Дебая T_d для цього кристалу.
20. Обчисліть питому теплоємність с цинку при температурі 1000°C . Порівняйте її з теплоємністю алмазу при 30 К .
21. На нагрівання металевого предмета масою $m = 0,1 \text{ кг}$ від 20 до 50°C витрачено $W = 8 \text{ кДж}$ енергії. Визначте, з якого металу зроблено предмет, якщо вказаний температурний інтервал вищий за характеристичну температуру металу.

22. Обчисліть середню довжину вільного пробігу фонона ℓ_ϕ у кристалі срібла при $t = 27^\circ\text{C}$, якщо теплопровідність срібла $\lambda = 418 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а швидкість звуку $v = 3,7 \cdot 10^3 \text{ м}/\text{с}$.

Задачі (будівельний блок) до розділу «ВИКОРИСТАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАКОНІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ»

1. Обертюва піч для одержання цементного клінкеру має діаметр $d = 5 \text{ м}$. Через $t = 6 \text{ хв}$ після початку обертання частота $\nu = 1 \text{ об}/\text{хв}$. Знайдіть кутову швидкість печі ω , лінійну швидкість точок на її зовнішній поверхні і число обертів N за $t = 6 \text{ хв}$. Рух вважати рівноприскореним.

2. Скільки обертів N зробить змішувальний барабан бетонозмішувача вільного падіння з завантажувальною ємністю $V = 100 \text{ л}$, якщо спочатку він рухався з постійним кутовим прискоренням $1 \text{ рад}/\text{с}^2$, а потім протягом $t = 40 \text{ с}$ обертася з частотою $\nu_2 = 27 \text{ об}/\text{хв}$? Перед зупинкою рух був рівносповільненим з кутовим прискоренням $\alpha_2 = 1 \text{ рад}/\text{с}^2$. Побудуйте графік залежності кутової швидкості від часу.

3. Для подрібнення будівельних матеріалів використовують кульовий млин. В його барабан, що обертається відносно горизонтальної осі, закладають матеріал, який підлягає подрібненню, і металеві кулі діаметром $d = 8,1 \text{ мм}$. При обертанні барабана кулі не повинні притискатися до його поверхні. При якій максимальній частоті обертання барабана ця умова ще виконується?

4. Визначте мінімальну частоту обертання форми ν під час формування бетонної труби внутрішнім діаметром $d = 500 \text{ мм}$.

5. Зовнішня частина цегляної стінки товщиною $d = 50 \text{ см}$ має температуру $t_1 = -28^\circ\text{C}$, температура внутрішньої частини $t_2 = +22^\circ\text{C}$. Яка кількість теплової енергії Q проходить через кожний квадратний метр поверхні за $t = 1 \text{ год}$? Знайдіть відповідну кількість теплоти Q і у випадку вітряної погоди, вважаючи, що під впливом вітру тепловтрати збільшуються на 20%.

6. Зовнішня поверхня стіни має температуру $t_1 = -20^\circ\text{C}$, внутрішня $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Товщина стіни $d = 40 \text{ см}$. Знайдіть теплопровідність матеріалу стіни, якщо через одиницю її поверхні за час $\tau = 1 \text{ год}$ проходить кількість теплоти $Q = 460,5 \text{ кДж}/\text{м}^2$.

7. Яку кількість теплоти Q віддає за час $\tau = 1 \text{ хв}$ кімната з площею підлоги $S = 20 \text{ м}^2$ та висотою $h = 3 \text{ м}$ крізь чотири цегляні стіни? Температура в кімнаті $t_1 = 15^\circ\text{C}$, температура зовнішнього повітря $t_2 = -20^\circ\text{C}$. Теплопровідність цегли $\lambda = 0,84 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Товщина стін $d = 50 \text{ см}$. Втратами тепла крізь підлогу та стелю знехтуйте.

8. Для одержання цементного розчину змішали $m_1 = 240 \text{ кг}$ цементу і $m_2 = 1500 \text{ кг}$ піску при $t_1 = 5^\circ\text{C}$, а також $V = 300 \text{ л}$ води при $t_2 = 400^\circ\text{C}$. Визначте температуру «розчину».

9. У процесі виготовлення бетону заданого складу використовують дозування складових. Так, узимку в бетонозмішувач для приготування $V_1 = 1 \text{ м}^3$ бетону засипали $m_1 = 240 \text{ кг}$ цементу, $m_2 = 960 \text{ кг}$ гравію і $m_3 = 600 \text{ кг}$ піску при температурі $t_1 = 10^\circ\text{C}$ і додали $V_2 = 120 \text{ л}$ води. Яку температуру t_2 повинна мати вода, що заливається у бетонозмішувач, щоб бетонна суміш мала температуру $t_3 = 30^\circ\text{C}$? Який склад бетону заданий по масі? Чому дорівнює водоцементне відношення?

10. Під час реставраційних робіт для випрямлення похилої кам'яної стінки між двома паралельними стінками розмістили $N = 60$ сталевих стрижнів діаметром $d = 8 \text{ см}$ кожний, нагріли на $\Delta T = 300 \text{ К}$ і закріпили. З якою силою F діяли стрижні на стіну після охолодження?

11. Під час вкладання залізничних рейок їх зварюють між собою в місцях з'єднання. Які напруження виникають в них при коливанні температури від $t_2 = -25^\circ\text{C}$ взимку до $t_3 = 40^\circ\text{C}$ влітку, якщо вкладання рейок відбувалось при температурі $t_1 = 20^\circ\text{C}$? Для заліза модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, а температурний коефіцієнт лінійного розширення заліза $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Розділ 7. ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАТЬ

1. Яку будову має тверде тіло?
2. Що називається макро- і мікроструктурою твердого тіла?
3. Який зв'язок між структурою та властивостями твердих тіл?
4. Яка внутрішня будова бетону?
5. Представте графічно силу взаємодії і потенціальну енергію взаємодії атомів в кристалічних ґратках.
6. Які існують типи зв'язків у твердих тілах?
7. Назвіть існуючі точкові та лінійні дефекти в твердих тілах.
8. Яка структура бетону?
9. Які особливості структури будівельних матеріалів?
10. Які найбільш розповсюджені дефекти в будівельних матеріалах?
11. Які властивості твердих тіл відносяться до механічних?
12. Яка деформація називається пружною? Який зв'язок між пружною деформацією та силою взаємодії між атомами?
13. Дайте визначення модуля пружності (модуля Юнга). Наведіть числові значення модуля пружності сталі та бетону.
14. Що називається модулем зсуву?
15. Що називається коефіцієнтом Пуассона?
16. Як експериментально визначається модуль пружності твердих тіл, (зокрема – бетону) ?
17. Дайте визначення статичного та динамічного модуля пружності.
18. Чому в ряді випадків відрізняються значення статичного та динамічного модулів пружності матеріалу?
19. Як можна оцінити теоретичну міцність твердого тіла?
20. Яка деформація називається пластичною?
21. Як здійснюється деформація ковзання дислокацій?
22. Що таке границя міцності?
23. Яким є механізм руйнування пластичних та крихких матеріалів?
24. Опишіть характерні точки ділянки кривої «напруження – деформація»

25. Назвіть шляхи збільшення міцності матеріалів.
26. Чому міцність бетону відрізняється під час розтягування та стискання? Які фізичні основи руйнування бетону?
27. Що таке нормування міцності бетону? Дайте визначення класів та марок бетону за міцністю.
28. Що таке коефіцієнт варіації міцності бетону?
29. Що таке критерій Гріффітса?
30. Назвіть механічні та фізичні методи оцінки міцності бетону.
31. Які властивості твердих тіл відносять до теплових?
32. Дайте визначення молярної та питомої теплоємностей.
33. Дайте визначення теплопровідності.
34. Дайте визначення коефіцієнта лінійного розширення.
35. У якому інтервалі змінюються числові значення теплоємності будівельних матеріалів? Як впливає на теплоємність матеріалів їхня пористість та вологість?
36. В якому інтервалі змінюються числові значення теплопровідності будівельних матеріалів? Яким чином впливає пористість на теплопровідність матеріалів?
37. Наведіть приклади та пояснити числові значення теплопровідності теплоізоляційних матеріалів.
38. Дайте визначення термічного опору. Нормування термічного опору в Україні.
39. Які класичні уявлення про теплопровідність твердих тіл?
40. Які класичні уявлення про лінійне розширення твердих тіл?
41. Чому дорівнює коефіцієнт лінійного розширення залізобетону? Чому цей матеріал не руйнується під час нагрівання?
42. Що таке нанокристалічні об'єкти?
43. Назвіть об'ємні та нанокристалічні фази Карбону.
44. Як використовують нанокристалічні об'єкти в будівельній галузі?
45. Назвіть електричні властивості твердих тіл. Як використовується електричний струм в будівельній галузі?
46. Чим відрізняються один від одного діелектрики, провідники та напівпровідники?
47. Що називається $p-n$ -переходом? Наведіть приклади використання $p-n$ - переходів в будівельній галузі.
48. Назвіть основні поняття будівельної акустики.
49. Які основні методи створення звукоізоляції між приміщеннями?
50. Як пов'язані між собою тепло- та звукоізоляційні властивості легких будівельних матеріалів?
51. Які основні завдання розв'язують, використовуючи неруйнівний контроль якості?

52. Назвіть види неруйнівного контролю якості й обґрунтуйте їх застосування в будівництві.

53. Які фізичні основи різних видів та методів контролю, використовуваних у будівництві? Чим відрізняються активний і пасивний методи під час виконання акустичного та теплового контролю?

54. Назвіть властивості будівельних матеріалів та виробів, контрольованих під час використання різних методів.

55. Яка природа α -, β -, та γ -випромінювання?

56. Закон радіоактивного розпаду.

57. Основні характеристики радіоактивного розпаду (стала радіоактивного розпаду, середня тривалість життя нукліда, період напіврозпаду).

58. Норми радіаційної безпеки. Поглинена та експозиційна дози.

59. Що таке ефективна сумарна питома активність природних радіонуклідів?

60. Яка класифікація будівельних матеріалів за їх питомою активністю?

61. Джерела радону та способи радонозахисту будівель. Об'ємна активність радону.

62. Проходження γ -випромінювання крізь речовину. Лінійний та масовий коефіцієнти поглинання.

63. Фізичні ефекти, які обумовлюють послаблення γ -випромінювання в речовині.

64. Які класичні уявлення про теплоємність твердих тіл?

65. Елементи квантової теорії теплових властивостей твердого тіла. Поняття про фонони.

ДОДАТОК А

Тест-карта 1 – Структура та механічні властивості твердих тіл

Матеріал	Характеристика матеріалу
1. Структура, основні види дефектів	
Фізичний блок: Метал:	
Будівельний блок: Будівельний матеріал:	
2. Пружна деформація, методи визначення модуля пружності	
Фізичний блок: Метал:	
Будівельний блок: Будівельний матеріал:	
3. Крива $\sigma - \epsilon$ та її аналіз	
Фізичний блок: Метал:	
Будівельний блок: Будівельний матеріал:	
4. Границя міцності. Методи її визначення. Шляхи підвищення міцності.	
Фізичний блок: Метал:	
Будівельний блок: Будівельний матеріал:	
5. Аналіз розподілу прикладеного навантаження. (завдання 1.1). Побудуйте графік $\frac{F_{cm}}{F_{\sigma}} = \varphi\left(\frac{S_{cm}}{S_{\sigma}}\right)$. Вкажіть значення $\frac{S_{cm}}{S_{\sigma}}$ в реальних інженерних розрахунках.	

Тест-карта 2 – Теплові властивості твердих тіл

Матеріал	Характеристика матеріалу
1. Структура, основні види дефектів	
Фізичний блок 1 2	$c_1 =$ $c_2 =$ Згідно з класичною теорією...
Будівельний блок 1 2	$c_1 =$ $c_2 =$
2. Теплопровідність	
Фізичний блок 1 2	$\lambda_1 =$ $\lambda_2 =$ Згідно з класичною теорією...
Будівельний блок 1 2	$\lambda_1 =$ $\lambda_2 =$
3. Лінійне розширення	
Фізичний блок 1 2	$\alpha_1 =$ $\alpha_2 =$ Згідно з класичною теорією...
Будівельний блок 1 2	$\alpha_1 =$ $\alpha_2 =$
4. Термічний опір	
Будівельний блок 1 2	$R_T = 2,5 \frac{M^2 K}{Вт}$
5. Пояснення теплових властивостей матеріалів з позиції квантової механіки	

ДОДАТОК Б

Програма самостійної роботи

Таблиця Б.1 – Блок теоретичної підготовки

Модуль	Теми самостійної роботи блоку теоретичної підготовки	Кількість годин
1	<p>Матеріали та їх властивості. Кристалічна структура твердих тіл</p> <p>Тема 1</p> <p>Основні питання, на які необхідно звернути увагу:</p> <p>1. Матеріали та їх властивості. Матеріали в техніці. Будівельні матеріали. Взаємозв'язок між їх внутрішньою структурою та властивостями.</p> <p>2. Ковалентні, іонні, молекулярні кристали. Близькій і дальній порядок. Аморфні і кристалічні тіла. Кристалічні ґратки. Енергія взаємодії атомів. Монокристали і полікристали. Анізотропія. Системи матеріалів. Матеріали зі змінним поверхневим шаром, агломераційні, армовані матеріали. Технологічні з'єднання. Структура будівельних матеріалів. Процес стурктурування. Бетон як системний матеріал. Структура матриці заповнення контактної зони. Точкові та лінійні дефекти в твердих тілах (вакансії, впроваджені атоми, крайові і гвинтові дислокації). Дефекти в будівельних матеріалах та конструкціях (мікротріщини, пори, раковини).</p> <p>Тема 2</p> <p>Механічні властивості твердих тіл</p> <p>Основні питання, на які необхідно звернути увагу: Види деформації. Діаграма «напруження – деформація». Модулі пружності. Статичний і динамічний модуль пружності. Границі текучості та міцності. Пружно-пластичне руйнування. Фізика процесу руйнування. Діаграма «напруження – деформація» для бетону під час дії осьового навантаження. Початковий модуль пружності. Умова заповнювача. Статичний і динамічний модуль пружності бетону, їх експериментальне визначення.</p>	3

1	2	3
Теорія міцності бетону. Тріщиностійкість бетону. Критерій Гріффітса. Нормування міцності бетону. Класи та марки бетону за міцністю. Коефіцієнт варіації міцності бетону. Високоміцні бетони та методи їх отримання. Повзучість твердого тіла. В'язкопружна деформація. Моделі в'язко-пружної деформації. Повзучість бетону. Гіпогеї повзучості.		
Змістовий модуль 2 Теплові та акустичні властивості твердих тіл (теорія та дані про будівельні матеріали). Наноматеріали та нанотехнології	Тема 1 Теплові властивості твердих тіл. <i>Основні питання, на які необхідно звернути увагу:</i> 1. Теплоємність. Квантова теорія теплоємності. Поняття фононів. Теплопровідність. Рівняння Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності. Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури. Експериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності. Коефіцієнти лінійного і об'ємного розширення. Класична модель теплового розширення. 2. Теплоємність і теплопровідність будівельних матеріалів. Термічний опір. Теплові характеристики теплоізоляційних матеріалів, легких бетонів на пористих заповнювачах. 3. Вплив зовнішніх факторів (електричного і температурного полів, пружних) на будівельні матеріали. Використання цих факторів у технологічних процесах.	
	Тема 2 Акустичні характеристики будівельних матеріалів та виробів <i>Основні питання, на які необхідно звернути увагу:</i> 1. Основні питання будівельної акустики. Коефіцієнти звукопоглинання та звукоізоляції	
	Тема 3 Нанотехнології в будівництві <i>Основні питання, на які необхідно звернути увагу:</i> Нанокристалічні матеріали. Наноструктуровані об'єкти: ізовані частинки, компактні матеріали. Об'єми і нанокристалічні фази вуглецю (графіт, алмаз, карбін, фулерен, нанотрубки, графен). Зміна структури й фізичних властивостей під час переходу в нанокристалічний стан. Розмірні ефекти в наноматеріалах. Самоорганізація	

1	2	3
Змістовий модуль 3 Електричні властивості твердих тіл. Контроль якості будівельних матеріалів та їх радіоактивності	нанокристалічних систем. Армування твердих будівельних систем дисперсними фібрами і нановуглецевими частинками. Використання нановуглецевих структур (вуглецевих трубок і фулеренів) для спрямованого структуроутворення і швидкості протікання фізико - хімічних процесів в будівельних композитах.	
	Тема 1 Електричні властивості твердих тіл <i>Основні питання, на які необхідно звернути увагу:</i> Провідність металів, напівпровідників, діелектриків. Вплив температури на електроопір. Напівпровідникові властивості твердих тіл. Концентрація вільних носіїв, рухливість. Власна і домішкова провідність напівпровідників. Ширина забороненої зони та енергія активації домішок. Напівпровідникові матеріали. p-n - перехід і деякі приклади його технічного застосування. Перетворення світлової енергії на електричну та електричної на світлову (фотоелемент, сонячні фотоелементи, фотодіод).	
	Тема 2 Фізичні основи неруйнівних методів контролю якості в будівництві <i>Основні питання, на які необхідно звернути увагу:</i> Механічні та акустичні методи контролю. Контроль якості ізоляції від шуму. Теплові, електричні, магнітні, оптичні методи неруйнівного контролю. Радіаційний контроль.	
	Тема 3 Перспективи розвитку будівельного матеріалознавства. <i>Основні питання, на які необхідно звернути увагу:</i> Будівельні матеріали як фактор радіаційної дії. Джерела радіації і заходи радіозахисту будинків. Перспективи розвитку будівельного матеріалознавства. Шляхи створення нових будівельних матеріалів із заданими властивостями.	

Таблиця Б.2 – Блок практичної підготовки

Модулі	Теми самостійної роботи блоку практичної підготовки	Кількість годин
1	2	3
Структура та механічні властивості твердих тіл (теорія та дані про будівельні матеріали) Змістовий модуль 1	Підготовка до практичного заняття (п.з.), опрацювання лекційного матеріалу з теми «Матеріали та їх властивості».	2
	Підготовка до лабораторного заняття (л.р.), опрацювання лекційного матеріалу з теми «Механічні властивості твердих тіл», статистична обробка результатів вимірювань».	2
	Підготовка до п.з., опрацювання лекційного матеріалу з тем «Механічні властивості». Підготовка до вивчення теми «Повзучість твердого тіла. В'язкопружна деформація». Підготовка до контрольної роботи.	2
	Підготовка до л.р. Опрацювання лекційного матеріалу «Властивості твердих тіл. Визначення густини матеріалу фізичними методами».	2
	Підготовка до л.р. Опрацювання лекційного матеріалу. Тема «Властивості твердих тіл». Підготовка до вивчення теми «Визначення напружень та деформацій».	2

1	2	3	
Теплові та акустичні властивості твердих тіл (теорія та дані про будівельні матеріали). Змістовий модуль 2	Наноматеріали та нанотехнології	Підготовка до п.з., опрацювання лекційного матеріалу з теми «Теплові властивості твердих тіл». Підготовка до вивчення теми «Будівельна акустика» Підготовка до контрольної роботи.	2
		Підготовка до л.р. опрацювання лекційного матеріалу з теми «Наноматеріали. Властивості твердих тіл». Визначення температури твердих тіл контактними та безконтактними методами.	2
Електричні властивості твердих тіл. Контроль якості будівельних матеріалів та їх радіоактивності Змістовий модуль 3		Підготовка до л.р., опрацювання лекційного матеріалу з теми «Електричні властивості твердих тіл. Властивості твердих тіл. Визначення вологості електроємнісним методом».	2
		Підготовка до семінарського заняття. Тема «Неруйнівний контроль якості будівельних матеріалів. Радіаційна безпека».	2
Всього за семестр		18	

ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – Основні фізико-технічні характеристики будівельних матеріалів

№ п/п	Характеристика та початковий модуль пружності	Позначення одиниці вимірювання	Визначення	Примітки
1	2	3	4	5
1	Механічне напруження	$\sigma = F / S_0$ [σ] = Па	Сила, що діє на одиницю площі поперечного перерізу деформованого тіла	
2	Границя міцності під час стиснення (розтягу)	$\sigma_M = F_M / S_0$ $R = \sigma_M$	Умовне напруження, що відповідає найбільшому навантаженню, яке витримує зразок при випробуванні на стиснення (розтяг) без руйнування	Позначення або σ , або R (використовується в будівельній літературі)
3	Марка матеріалу за міцністю	M	Граничне значення міцності матеріалу в стандартному інтервалі. Наприклад, $M300$ відповідає значенню: міцність при стисненні $35\text{МПа} \geq \sigma_M \geq 30\text{МПа}$	Застаріло
4	Клас по міцності	B	Числове значення границі міцності при стисненні з номінального ряду, гарантоване з забезпеченістю 0,95	За європейськими нормами клас за міцністю позначається літерою C .
5	Модуль пружності при одновісному стисненні (розтягу)	$E = \sigma / \varepsilon$ [E] = Па	Характеристика пружних властивостей матеріалу, коефіцієнт пропорційності між σ і ε	
6	Відносне видовження	$\varepsilon = (l - l_0) / l_0$ [ε] = 1	Характеристика деформації, що створюється в тілі	

1	2	3	4	5
7	Границя текучості (умовна)	$\sigma_{0,2}$	Напруження, що відповідає залишковій деформації 0,2%	
8	Твердість	H	Твердість – властивість матеріалів чинити опір деформуванню або руйнуванню при локальній силі дії. Характеризується проникненням у даний матеріал тіла з іншого, більш твердого, матеріалу	
9	Коефіцієнт теплопровідності (теплопровідність)	$\lambda = \frac{Q \cdot h}{S t (T_1 - T_2)}$ [λ] = $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	Кількість теплоти, що проходить через одиницю площі зразка одиничної довжини протягом одиниці часу при різниці температур в 1 К на протилежних плоскопаралельних сторонах зразка	
10	Питома теплоємність	$c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)}$ [c] = $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	Кількість теплоти для нагрівання 1кг матеріалу на 1 К	
11	Коефіцієнт теплового розширення	$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 t}$ [α] = К^{-1}	Відносна зміна розмірів тіла при зміні його температури на 1К	
12	Істинна пористість	$\Pi = \frac{V_p}{V}$ [Π] = 1	Сумарний об'єм усіх пор (і відкритих, і закритих), віднесений до об'єму матеріалу	
13	Абсолютна вологість	$\varphi = \frac{m_w}{m_{cm}}$ [φ] = 1	Відношення маси води, що міститься в матеріалі, до маси сухого матеріалу	
14	Істинна густина	$\rho = m / V$ [ρ] = $\text{кг}/\text{м}^3$	Маса матеріалу в абсолютно ущільненому стані, віднесена до об'єму матеріалу (тобто маса матеріалу одиничного об'єму)	

1	2	3	4	5
15	Середня густина	$\rho_m = m / V$	Повна маса матеріалу (з урахуванням пор і порожнин), віднесена до повного об'єму матеріалу	
16	Коефіцієнт звукопоглинання	$\alpha = \frac{W_{\text{погл}}}{W_{\text{пад}}}$ [α] = 1	Відношення звукової енергії, поглинутої матеріалом, до звукової енергії, що падає на матеріал	
17	Коефіцієнт звукоізоляції	$R_{\text{ак}} = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}$	Визначається відношенням інтенсивності звука, що пройшов через матеріал, до інтенсивності звука на вході в матеріал	
18	Питома активність	$A_{\text{п}} = \frac{A}{m}$	Визначається відношенням активності матеріалу до маси матеріалу	

ДОДАТОК Г

Таблиця Г – Основні позначення просторових і фізичних величин

Механіка

Вісь обертання		00	Площа	S	
Висота		h	Плече	d	
Відстань (довжина)		l	Потужність: $N = dA / dt$	N	
густина	речовини: $\rho = \frac{m}{V}$	ρ	Потенціал (гравітаційний): $\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{m}$	φ	
	енергії: $w = \frac{W}{V}$	w			
Декартові координати: x, y, z		x, y, z	Прискорення	миттєве: $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$	\vec{a}
				кутове: $\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$	$\vec{\alpha}$
Деформація (відносна): $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$		ε		вільного падіння	\vec{g}
Діаметр: $D = 2R$		D		нормальне: $\vec{a}_n = \frac{v^2}{R} \vec{n}$	\vec{a}_n
Довжина відрізка: $\Delta l = l_2 - l_1$		Δl		тангенціальне: $\vec{a}_\tau = \frac{dv}{dt}$	\vec{a}_τ
Енергія	повна	W	Радіус	R	
	кінетична: $W_k = \frac{mv^2}{2}$	W_k	Радіус-вектор	\vec{r}	
	кінетична обертання: $W_k^{\text{об}} = \frac{I\omega^2}{2}$	$W_k^{\text{об}}$	Робота: $A = \int \vec{F} d\vec{r}$	A	
	потенціальна: $W_p = mgh$, $W_p = kx^2 / 2$	$W_{\text{п}}$	Сила: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$	\vec{F}	
Імпульс: $\vec{p} = m\vec{v}$		\vec{p}	Коефіцієнт тертя	μ, f	
Маса		m	Тиск	p	
Момент	імпульсу: $\vec{L} = [\vec{r} \cdot \vec{p}]$	\vec{L}	Товщина	d	
	проекція на z : $L_z = I_z \omega_z$	L_z	Час	t	
	модуль: $L = mvr$	L	Час-тота	Обертання лінійна	n
	сили: $\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}]$	\vec{M}		циклічна $\omega = 2\pi n$	ω
	проекція на z : $M_z = I_z \alpha$	M_z	Швидкість	шляхова: $v = \frac{ds}{dt}$	v
	модуль: $M = F \cdot d$	M		миттєва: $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$	\vec{v}
інерції: $I = \int_m R^2 dm = \int_v R^2 \rho dV$	I, J	середня: $\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$		$v_{\text{ср}}$	
Модуль Юнга		E	миттєва кутова $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$	$\vec{\omega}$	
Період		T	Шлях	s, l	
Переміщення	лінійне: $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$	$\Delta \vec{r}$	Ширина	b	
	кутове: $\Delta \vec{\varphi} = \vec{\varphi}_2 - \vec{\varphi}_1$	$\Delta \vec{\varphi}$			

Продовження таблиці Г.1

Молекулярна фізика і термодинаміка

Число молекул	повне	N	Робота		A
	в одиниці об'єму: $n = \frac{N}{V}$	n	Ентропія		S
	в 1 молі:	N_A	Питома теплоємність	при $p = const$ $c_p = \frac{\delta Q_p}{mdT}$	c_p
Маса молекули	$m_{(1)}$	при $V = const$ $c_v = \frac{\delta Q_v}{mdT}$		c_v	
Молярна газова стала: $R = \frac{p\Delta V}{\Delta T}$	R	Молярна теплоємність	при $p = const$ $C_p = \frac{\delta Q_p}{\nu dT}$	C_p	
Стала Больцмана: $k = \frac{R}{N_A}$	k		при $V = const$ $C_v = \frac{\delta Q_v}{\nu dT}$	C_v	
Середня довжина вільного пробігу молекул	$\ell_{ср}, \ell$	Відношення: $\frac{C_p}{C_v} = \frac{c_p}{c_v}$		γ	
Термодинамічна (абсолютна) температура	T	Число молів		ν	
Термодинамічна ймовірність	Ω, ω	Коефіцієнти	теплопровідності	λ	
Число ступенів вільності молекули	i		дифузії	D	
Молярна маса	M		в'язкості	η	

Продовження таблиці Г.1

Електрика та магнетизм

Заряд (кількість електрики)		q	Електричний струм		I
Густина заряду	Об'ємна: $\rho = \frac{q}{V}$	ρ	Густина електричного струму: $j = \frac{I}{S}$		j
	поверхнева: $\sigma = \frac{q}{S}$	σ	Індукція магнітного поля (модуль) $B = F_{маг}/(qv \sin \alpha)$		\vec{B}
	лінійна: $\tau = \frac{q}{l}$	λ	Напруженість магнітного поля: $\vec{H} = \vec{B}/(\mu_0 \mu)$		\vec{H}
Електроємність: $C = \frac{q}{U}$		C	Магнітний потік $\Phi_B = \int_s B_n dS$ (потік індукції)		Φ_B
Електричний потенціал: $\varphi = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q_{np}}$		φ	Магнітна проникність: $\mu = \frac{B}{B_0}$		μ
Різниця потенціалів (напруга U): $\Delta\varphi = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q_{np}}$		$\Delta\varphi, U$	Магнітна сприйнятливість		χ_m
Напруженість електричного поля: $E = \frac{F_{св}}{q_{np}}$		\vec{E}	Магнітна стала		μ_0
Електричне зміщення (електрична індукція) $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$		\vec{D}	Магнітний дипольний момент		p_m
Потік вектора	напруженості: $\Phi_E = \int E_n dS$	Φ_E	Питома провідність $\gamma = \frac{1}{\rho}$		γ
	електричної індукції: $\Phi_D = \int D_n dS$	Φ_D	Питомий опір $\rho = \frac{RS}{l}$		ρ
Електрорушійна сила: $\mathcal{E} = \frac{A_{св}}{q}$		\mathcal{E}	Індуктивність $L = \frac{\Phi}{I}$		L
Електрична стала		ϵ_0	Взаємна індукція		M, L_{12}
Діелектрична проникність $\epsilon = \frac{E_0}{E}$		$\epsilon = \frac{E_0}{E}$	Кількість витків		N
Поляризованість діелектрика		\vec{P}	Потужність: $P = IU$		P, N
Діелектричний момент		$\vec{p}_e = q \cdot \vec{l}$	Опір (активний): $R = \rho \frac{l}{S}$		R

ДОДАТОК Д

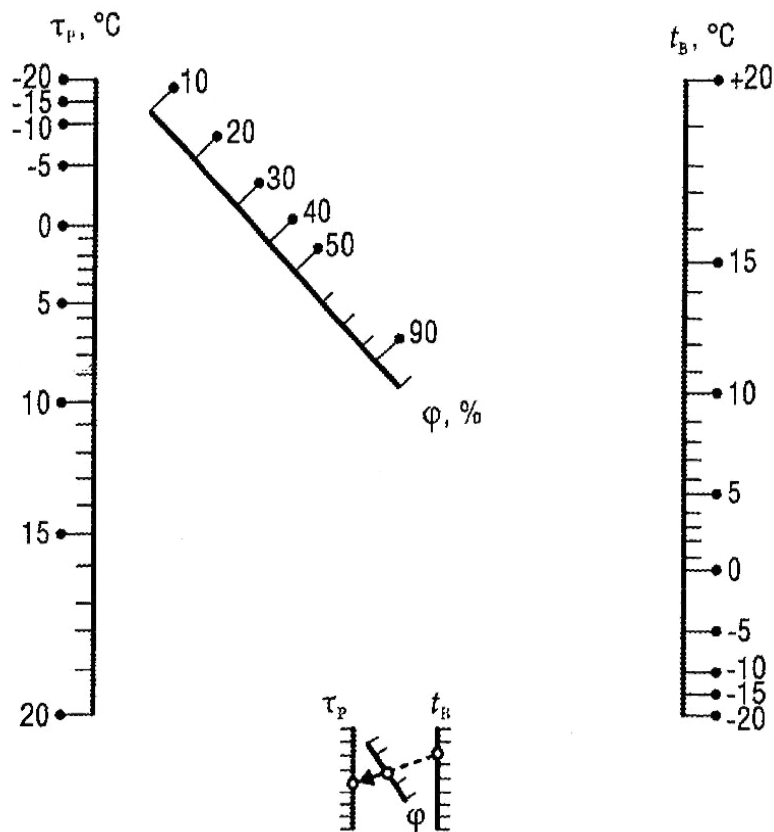


Рисунок Д.1 – Номограма. Визначення точки роси у приміщенні

Список рекомендованої літератури

- 1 Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М: Стройиздат, 1981. – 484с.
- 2 Барановський В.В. Будівельне матеріалознавство. Радіоактивність будівельних матеріалів: Конспект лекцій.–К: КНУБА, 2002. – 16 с.
- 3 Барановський В.М., Бережний П.В., Возний П.О. та ін. Загальна фізика (ред. Горбачук І.Т.). – К.: Вища школа, 1993. – 359 с.
- 4 Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. – Атомиздат, 1975. – 269 с.
- 5 Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М: Наука, 1979. – 350 с.
- 6 Головин Ю.Н. Введение в нанотехнику. – М: Машиностроение, 2007. – 493 с.
- 7 Гордон Дж. Конструкции или почему не ломаются вещи. – М: Мир, 1980. – 386 с.
- 8 Гурова Л.В. З досвіду вивчення теми «Вуглецеві наноструктури» в курсі «Фізика твердого тіла». Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: збірник наукових праць. Випуск V. – Кривий Ріг: Видавничий відділ НМСАУ, 2005. – Т.2 – с.114-118.
- 9 Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. – Екатеринбург, УрО РАН, 1998. – 178 с.
- 10 Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. – М: Высшая школа, 1991. – 287 с.
- 11 Копанець Є.Г., Крот Ю.Є., Подус Г.М., Даньшева С.О., Журавльов Ю.В. Фізичні основи сучасних будівельних технологій та автоматизації. – Харків: ХНУБА, 2010. – 102 с.
- 12 Копанець Є.Г., Крот Ю.Є., Подус Г.М., Даньшева С.О., Омеляненко І.Ф. Неруйнівні методи контролю якості в будівництві. – Харків: ХДТУБА, 2003. – 100 с.
- 13 Костко О.К. Физика для строительных и архитектурных вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 507 с.
- 14 Кривенко П.В., Пушнарьова К.К., Барановський В.Б. та ін. Будівельне матеріалознавство. – К.: ТОВ УПК «Екс.Об.», 2004. – 704 с.
- 15 Крот Ю.Є. Курс фізики. – К.: НМК ВО, 1992. – 192 с.
- 16 Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1982. – 519 с.
- 17 Лукутцова Н.П. Естественные радионуклиды в строительных материалах. – Строительные материалы, 2002, №1. – с.20-22.
- 18 Методичні вказівки до самостійної роботи з вивчення розділу фізики. «Радіоактивний розпад. Проходження γ -випромінювання через речовину. Проблеми радіоекології / Укладачі: Копанець Є.Г., Крот Ю.Є., Даньшева С.О., Подус Г.М. Харків: ХДТУБА, 2007, – 24 с.

19 Микульский В.Г., Сахаров Г.П. и др. Строительные материалы. (Материаловедение. Технология конструкционных материалов). – М.: Изд-во. Асс. Строит. ВУЗов, 2007. – 520 с.

20 Мухин Е.Н. Радиационная безопасность при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий различного назначения // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2004, №2. – с.60-61.

21 Назаренко І.І., Ручинський М.М., Сівко В.І. Фізичні основи механіки будівельних матеріалів: Конспект лекцій. – К: КНУБА, 2001. – 104с.

22 Несветаев Г.В. Бетоны. – Ростов н/Д: Стройиздат, 2011. – 381с.

23 Панцке К.Ю., Кекритц З., Краузе П., Попов К. Защита от шума и вибраций в строительстве. – К: Будівельник, 1988. – 88 с.

24 Подольский Ю.Р. Утепление и звукоизоляция квартиры и дома. – Харьков, Белгород: Книжный клуб «Клуб семейного досуга», 2012. – 464 с.

25 Подус Г.М., Крот О.Ю. Фізика в будівництві та будівельній індустрії. Навчально-методичний посібник. – Харків: ХДТУБА, 2001 р. – 71 с.

26 Подус Г.М., Крот Ю.Є. Фізика в будівництві та будівельній індустрії. – Харків, ХДТУБА, 1999. – 70 с.

27 Познер А.А., Бодряков В.Ю. Физика твердого тела. Свойства кристаллической решетки: Конспект лекций. – Свердловский технический университет, 2000. – 20 с.

28 Сахаров Г.П. Нанотехнологии в строительстве [электронный ресурс] www.stroyka.ru.

29 Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологии: Учебное пособие. – М: Бином. Лаборатория знаний, 2008 – 431 с.

30 Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. – М: Мир, 1969 – 558с.

31 Холден А. Что такое ФТТ. – М: Мир, 1971. – 269 с.

32 Хоникомб Р. Пластическая деформация материалов. – М: Мир, 1972. – 407с.

33 Юхневский П.И., Широкий Г.Г. Строительные материалы и изделия. – Минск: ЦП «Технопринт», 2004. – 476 с.

INTERNET - ресурси

1. <http://fizzi.narod.ru>
2. <http://www.park.futurerussia.ru>
3. <http://www.educationindex.com/>
4. <http://www.gomulina.orc.ru>

Зміст

ВСТУП	3
--------------------	----------

ЧАСТИНА І. ЕЛЕМЕНТИ ФІЗИКИ КОНДЕНСОВАНОГО СТАНУ І БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА	4
---	----------

РОЗДІЛ 1. БУДОВА ТВЕРДИХ ТІЛ	5
---	----------

1.1 Мікроструктура твердого тіла	5
1.2 Зв'язок між структурою і властивостями	6
1.3 Взаємодія атомів в кристалічних ґратках.....	7
1.4 Типи зв'язків у твердих тілах.....	9
1.5 Дефекти в твердих тілах	10
1.6 Структура будівельних матеріалів.....	11
1.7 Дефекти в будівельних матеріалах.....	13

РОЗДІЛ 2. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ	14
--	-----------

2.1 Загальні положення та класифікація.....	14
2.2 Пружна деформація твердих тіл	16
2.3 Модуль пружності будівельних матеріалів.....	17
2.4 Експериментальне визначення модуля пружності бетону	19
2.5 Приклади застосування закону Гука для інженерних розрахунків.....	20
2.6 Пластична деформація твердих тіл. Теоретична міцність.....	22
2.7 Ковзання шляхом руху дислокацій.....	23
2.8 Аналіз діаграм напруження – деформація для різних матеріалів.....	25
2.9 Границя міцності. Шляхи підвищення міцності	27
2.10 Механічне руйнування під дією прикладеного навантаження	29
2.11 Критерій Гріффітса.....	30
2.12 Пластичне руйнування	33
2.13 Границя міцності бетону при стисненні.....	33
2.14 Коефіцієнт варіації міцності бетону.....	34
2.15 Фізичні основи механізму руйнування бетону за стиснення.	35
2.16 Фізичні методи оцінювання міцності бетону	37

РОЗДІЛ 3. НАНОСТРУКТУРОВАНІ ОБ'ЄКТИ. НАНОТЕХНОЛОГІЇ В БУДІВНИЦТВІ	43
--	-----------

3.1 Загальні положення	43
3.2 Об'ємні й нанокристалічні фази Карбону (графіт, алмаз, карбін, фуллерен, нанотрубки, графен).....	46
3.3 Нанотехнології в будівництві.....	49

РОЗДІЛ 4. ТЕПЛОВІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ	51
4.1 Теплофізичні характеристики матеріалів	51
4.2 Класичні уявлення про теплові властивості твердих тіл.....	53
4.3 Елементи квантової теорії теплоємності.....	53
4.4 Поняття про фонони	56
4.5 Залежність коефіцієнта теплопровідності кристалічних ґраток твердих тіл від температури	56
4.6 Класична модель теплового розширення кристалічних ґраток. Температурний коефіцієнт лінійного розширення	58
4.7 Теплофізичні характеристики будівельних матеріалів.....	59
4.8 Використання теплофізичних характеристик будівельних матеріалів у процесі проведення деяких інженерних розрахунків.....	65
РОЗДІЛ 5. ДЕЯКІ АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ.....	69
5.1 Основні поняття будівельної акустики.....	69
5.2 Коефіцієнт звукопоглинання	71
5.3 Коефіцієнт звукоізоляції	74
РОЗДІЛ 6. РАДІОАКТИВНІСТЬ	76
6.1 Загальні положення	76
6.2 Закон радіоактивного розпаду.....	77
6.3 Норми радіаційної безпеки і санітарні правила роботи з іонізуючими випромінюваннями.....	79
6.4 Нормування радіоактивності будівельних матеріалів	81
6.5 Будівельні матеріали як фактор радіаційної дії.....	82
6.6 Джерела радону і способи радонозахисту будинків.....	84
6.7 Проходження γ - випромінювання через речовину	86
6.8 Приклади розрахунків деяких радіаційних параметрів.....	88
ЧАСТИНА II. ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ «ФІЗИКА В БУДІВНИЦТВІ»	92
РОЗДІЛ 1. ПОНЯТТЯ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	93
РОЗДІЛ 2. МЕТА І ЗАВДАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА З ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ «ФІЗИКА В БУДІВНИЦТВІ» ..	94
РОЗДІЛ 3. ФОРМИ ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	95

РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ОКРЕМИХ ФОРМ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	96
4.1 Робота з навчальною, науковою та довідковою літературою.....	96
4.2 Написання рефератів та підготовка доповідей.....	99
4.3. Самостійна робота студентів в інформаційній мережі Internet.....	102
РОЗДІЛ 5. ПРОГРАМА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	104
5.1 Самостійна робота над матеріалом теоретичного та практичного блоків.....	104
5.2 Форми контролю знань.....	105
РОЗДІЛ 6. ЗАВДАННЯ ДО ПОТОЧНОГО МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ	108
Модуль 1. СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ	108
Модуль 2. ТЕПЛОВІ ТА АКУСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ. НАНОМАТЕРІАЛИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ	109
Модуль 3. ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ. КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ РАДІОАКТИВНІСТЬ.....	109
Задачі (будівельний блок) до розділу «ВИКОРИСТАННЯ ФІЗИЧНИХ ЗАКОНІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ».....	112
РОЗДІЛ 7. ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ	114
ДОДАТОК	117
ДОДАТОК А.....	117
ДОДАТОК Б	119
ДОДАТОК В	124
ДОДАТОК Г.....	127
ДОДАТОК Г.....	130
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	131

Навчальне видання

ЧЕРЕДНІК Дмитрій Леонідович
ДАНЬШЕВА Світлана Олегівна
КРОТ Юлій Євгенович
ПОДУС Галина Миколаївна

ФІЗИКА В БУДІВНИЦТВІ

Навчальний посібник
до самостійного вивчення курсу

Комп'ютерна верстка: А.В. П'янков

Підписано до друку 01.12.2013 р. Формат 60х90 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Minion. Друк офсетний. Ум. друк арк. 8,5.
Тираж 300 прим. Замовлення _____.

Фірма «БУРУН і К»

61166, Україна, м. Харків, пр. Леніна, 40, к. 203. Тел. (057) 757-40-49.
Свідоцтво про державну реєстрацію: ДК №1419 від 07.07.2003 р.