



ЗАТВЕРДЖЕНО

Заступник директора з НВР ЗПО «ДПТК»

Сергій ГОРДІЄНО

серпня 2026 р.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

18 лекцій, 36 годин. П'ять змістових модулів

Дисципліна: Фізика (ОК 10)

Галузь знань: G — Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальність: G19 — Будівництво та цивільна інженерія

Освітньо-професійна програма: «Будівництво та експлуатація будівель і споруд»

Освітньо-професійний ступінь: фаховий молодший бакалавр

ПЕРЕДМОВА

Конспект розроблено як основне навчальне джерело з дисципліни «Фізика» для здобувачів спеціальності G19 — Будівництво та цивільна інженерія відповідно до освітньо-професійної програми «Будівництво та експлуатація будівель і споруд», яка передбачає використання власних навчально-методичних розробок педагогічних працівників коледжу.

Його призначення — не переказати підручник загальної фізики, а відібрати з нього те, що безпосередньо працює у проектуванні, зведенні та експлуатації будівель і споруд, і подати у зв'язці з конструкціями, матеріалами та машинами, з якими ви матимете справу на будівельному майданчику.

Структура курсу відповідає загальноприйнятій послідовності розділів фізики, тому конспект узгоджується з підручниками, доступними в Електронній бібліотеці ІМЗО: механіка — молекулярна фізика і термодинаміка — електрика і магнетизм — коливання, хвилі та оптика — атомна і ядерна фізика.

Особливість цього курсу для будівельників — посилений перший модуль. Статика, центр тяжіння, стійкість проти перекидання, напруження та закон Гука подані не оглядово, а як безпосередня основа теоретичної механіки, опору матеріалів, будівельної механіки й розрахунку конструкцій. Зверніть увагу: теоретична механіка вивчається в тому самому першому семестрі, тому матеріал лекцій 3 і 5 знадобиться вам практично одночасно з фізикою, а не через рік.

Кожна лекція побудована однаково: план, теоретичний виклад із виходом на конкретне застосування в будівництві, перелік ключових формул і питання для самоконтролю. Питання для самоконтролю не є формальністю — саме на їх основі формуються завдання модульних контролів.

Розподіл матеріалу за модулями:

№	Модуль	Лекції, год	Практ., год	СР, год	Усього
I	Механіка. Статика конструкцій та механіка деформівного тіла	12	6	12	30
II	Молекулярна фізика і термодинаміка	8	4	8	20
III	Електрика і магнетизм	8	4	8	20
IV	Коливання, хвилі, акустика та оптика	4	2	4	10
V	Атомна та ядерна фізика	4	2	4	10
	РАЗОМ	36	18	36	90

Модульний контроль № 1 охоплює модулі I–II (лекції 1–10), модульний контроль № 2 — модулі III–V (лекції 11–18). Дисципліна завершується диференційованим заліком.

МОДУЛЬ I. МЕХАНІКА. СТАТИКА КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕХАНІКА ДЕФОРМІВНОГО ТІЛА

6 лекцій, 12 годин

ЛЕКЦІЯ 1

ФІЗИКА ЯК НАУКА. ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ, СІ, ВИМІРЮВАННЯ ТА ПОХИБКИ

План лекції

1. Предмет і методи фізики. Явище, модель, закон, теорія.
2. Фізичні величини. Міжнародна система одиниць СІ.
3. Прямі та непрямі вимірювання в будівництві.
4. Похибки вимірювань і правила запису результату.

1. Предмет фізики та її місце в підготовці будівельника

Фізика вивчає найзагальніші властивості матерії та форми її руху. Її метод складається з чотирьох ланок: спостереження явища, висунення гіпотези, побудова моделі й перевірка висновків експериментом. Якщо модель витримує перевірку в широкому колі умов, вона стає законом, а система пов'язаних законів — теорією.

Принципово важливо розуміти, що кожна фізична модель має межі застосовності. Модель абсолютно твердого тіла чудово працює, коли ми рахуємо реакції опор балки, і стає непридатною, щойно нас цікавить її прогин. Закон Гука точний для сталевих арматур до границі пружності й безпорадний за нею. Фахівець відрізняється від дилетанта саме тим, що знає межі моделі, якою користується.

Будівництво має справу з передаванням навантажень: вага покрівлі переходить на крокви, крокви передають зусилля на стіни, стіни — на фундамент, фундамент — на ґрунт. На кожному переході діють фізичні закони, які не можна обійти. Виконавець, який знає лише технологічну карту, здатний вести роботи; фахівець, який розуміє фізику, здатний пояснити тріщину, промерзання чи осідання й знайти їх причину.

Практично всі нормативні документи галузі — ДБН і ДСТУ — написані мовою фізичних величин. Термічний опір огороження, розрахунковий опір бетону, рівень звукового тиску, коефіцієнт природної освітленості, питома ефективна активність радіонуклідів — це фізика, подана у вигляді нормативної вимоги. Не розуміючи величини, неможливо свідомо застосувати норму.

2. Фізичні величини та система СІ

Фізична величина — це властивість, яку можна виміряти, тобто кількісно порівняти з еталоном. Величини поділяють на скалярні, повністю задані числом (маса, температура, об'єм), і векторні, які потребують ще й напрямку (сила, швидкість, прискорення).

Міжнародна система одиниць СІ побудована на семи основних одиницях: метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, моль, кандела. Решта одиниць похідні: ньютон, паскаль, джоуль, ват,

вольт, ом виражаються через основні. Для будівельника найважливіші похідні — паскаль (тиск і механічне напруження), ньютон і кілоньютон (сила й навантаження), ват (тепловий потік і потужність), люкс (освітленість), децибел (рівень звукового тиску, формально позасистемна логарифмічна одиниця).

У будівництві живуть і позасистемні одиниці: кілограм-сила на квадратний сантиметр, тонна, калорія, кінська сила. Користуватися ними допустимо в побутовій розмові, але у формули підставляють величини в СІ. Змішування систем дає помилку, яку важко виявити, бо результат виглядає правдоподібно. Класичний приклад: марка бетону М200 і клас В15 описують ту саму властивість, але в різних одиницях і з різною забезпеченістю, тому механічно прирівнювати числа не можна.

Перевірка розмірності — найпростіший і найнадійніший спосіб самоконтролю. Якщо в задачі на термічний опір стіни у відповіді вийшли вати, а не квадратні метри-кельвіни на ват, помилку треба шукати не в арифметиці, а у формулі.

3. Прямі та непрямі вимірювання

Пряме вимірювання — зчитування величини безпосередньо зі шкали приладу: довжини рулеткою, температури термометром, освітленості люксметром, рівня шуму шумоміром.

Непряме вимірювання — обчислення шуканої величини за формулою через інші, виміряні прямо. Міцність бетону в конструкції не міряють безпосередньо: її визначають склерометром за відскоком бойка або ультразвуковим методом за швидкістю поширення хвилі, а потім переводять у клас за градуальною залежністю. Вологість стіни визначають за зміною електричного опору або діелектричної проникності матеріалу. Товщину захисного шару бетону знаходять електромагнітним приладом за зміною індуктивності котушки біля арматури.

Практично всі величини, з якими працює будівельник на об'єкті, вимірюються непрямо. Тому розуміння того, як накопичуються похибки окремих вимірювань, є професійною необхідністю, а не академічною справою.

4. Похибки вимірювань

Абсолютна похибка — модуль різниці між виміряним і дійсним значенням. Має розмірність самої величини й показує межі, у яких лежить справжнє значення.

Відносна похибка — відношення абсолютної до виміряного значення, зазвичай у відсотках. Саме вона характеризує якість вимірювання: похибка в сантиметр при розмітці котловану несуттєва, а при встановленні анкерних болтів під колону неприпустима.

Систематична похибка повторюється й зміщує результат в один бік. Її причини — неправильне градуювання приладу, невивірений нівелір, температурне подовження сталевих рулеток, нехтування поправкою на провисання стрічки. Багаторазове повторення вимірювання її не усуває, і в цьому головна підступність. Саме тому геодезичні прилади підлягають повірці, а вимірювання виконують у двох напівприйомах.

Випадкова похибка змінює знак і величину від досліду до досліду. Її зменшують повторенням вимірювань та усередненням. Для оцінювання міцності бетону склерометром норми прямо вимагають серії з дев'яти і більше ударів на ділянці саме з цієї причини.

Клас точності приладу задає зведену похибку у відсотках від межі вимірювання. Манометр класу 1,5 з межею 10 бар має абсолютну похибку 0,15 бар незалежно від того, показує він 2 бари чи 9. Звідси практичне правило добору приладу: робоче значення має припадати приблизно на дві третини шкали.

Похибку округлюють у більший бік до однієї значущої цифри, а результат — до того самого розряду. Запис «6,347 ± 0,15 МПа» некоректний; правильно «6,3 ± 0,2 МПа». Зайві цифри в записі не додають точності, а лише вводять в оману — і саме вони найчастіше потрапляють у виконавчу документацію.

Ключові формули

- Відносна похибка: $\varepsilon = \Delta x / x \cdot 100 \%$
- Похибка за класом точності: $\Delta x = K \cdot x(\text{межа}) / 100$
- Похибка добутку або частки: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$
- Похибка величини у степені n : $\varepsilon = n \cdot \varepsilon_1$
- Середнє значення серії: $x(\text{сер}) = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$

Питання для самоконтролю

1. Чому визначення міцності бетону в готовій конструкції завжди є непрямим вимірюванням?
2. Манометр гідравлічного домкрата класу точності 1,5 з межею 60 МПа показує 12 МПа. Обчисліть абсолютну й відносну похибку. Чи вдало дібрано прилад для цього вимірювання?
3. Чому дев'ять ударів склерометра на ділянці зменшують випадкову похибку, але не усувають систематичну, якщо прилад не повірено?

ЛЕКЦІЯ 2

КІНЕМАТИКА ТА ДИНАМІКА. ЗАКОНИ НЬЮТОНА. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

План лекції

1. Механічний рух і його кінематичні характеристики.
2. Закони Ньютона. Маса, сила, інертність.
3. Сили в механіці: тяжіння, пружності, тертя.
4. Рух по похилій площині та рух зв'язаних тіл.

1. Механічний рух і кінематика

Механічний рух — зміна положення тіла відносно інших тіл із плином часу. Опис руху завжди починається з вибору системи відліку: тіла відліку, системи координат і годинника. Вантаж, нерухомий відносно платформи баштового крана, рухається відносно землі — обидва твердження правильні, поки вказано систему відліку.

Матеріальна точка — модель тіла, розмірами якого в конкретній задачі можна знехтувати. Піддон із цеглою, що підіймається на висоту тридцять метрів, — матеріальна точка. Той самий піддон, коли ми розглядаємо його перекидання на стропях, — уже тверде тіло зі своїми розмірами й центром тяжіння.

Рівномірний прямолінійний рух описується сталою швидкістю, рівноприскорений — сталим прискоренням. Графік залежності швидкості від часу для рівноприскореного руху — пряма, а площа під нею дорівнює пройденому шляху. Це не формальність: цикл роботи вантажного підіймача складається саме з розгону, руху зі сталою швидкістю й гальмування, і час циклу обчислюють як суму трьох ділянок графіка.

Рух по колу характеризують періодом, частотою обертання та кутовою швидкістю. Доцентрове прискорення спрямоване до центра кола й зростає пропорційно квадрату швидкості. Для поворотної платформи крана, бетонозмішувача чи диска відрізної машини це основна причина інерційних навантажень.

2. Закони Ньютона

Перший закон стверджує: тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки на нього не подіють зовнішні сили. Інерція — це властивість зберігати стан руху, інертність — міра цієї властивості, і її кількісною характеристикою є маса.

Другий закон пов'язує прискорення з рівнодійною сил і масою. У будівельній практиці найважливіший наслідок другого закону такий: раптова зміна швидкості породжує силу. Різке гальмування лебідки викликає динамічний ривок у канаті, який може в кілька разів перевищити статичну вагу вантажу. Саме тому вантажопідіймальні механізми мають плавний пуск і гальмування, а в розрахунок канатів вводять коефіцієнт динамічності.

Третій закон: сили взаємодії двох тіл рівні за модулем і протилежні за напрямком. Стіна тисне на фундамент, фундамент з тією самою силою тисне на стіну; ґрунт сприймає тиск підошви і з тією самою силою відповідає реакцією. Уся схема передавання навантажень у будівлі — це послідовність пар за третім законом.

3. Сили в механіці

Сила тяжіння пропорційна масі й напрямлена вертикально вниз. Вага тіла — сила, з якою тіло діє на опору або підвіс. У стані спокою вага дорівнює силі тяжіння, при русі з прискоренням угору зростає, при русі вниз з прискоренням зменшується. Оператор підіймача відчуває це щоразу на старті кабіни, а розрахунок канатів це враховує коефіцієнтом перевантаження.

Сила пружності виникає при деформації й за законом Гука пропорційна видовженню. Пружина динамометра, сталевий трос, дерев'яна балка під навантаженням — усі працюють у пружному режимі, поки деформація мала. Детальніше до цього ми повернемося в лекції 5.

Сила тертя спокою перешкоджає початку руху і зростає до певного максимуму; сила тертя ковзання приблизно стала й пропорційна силі нормального тиску через коефіцієнт тертя. Тертя кочення на порядок менше за тертя ковзання — саме тому важкі елементи переміщують на котках, а не волоком.

Тертя в будівництві не завжди шкідливе. Воно утримує цеглу в кладці при горизонтальних зусиллях, забезпечує зчеплення підшви фундаменту з основою, дозволяє працювати фрикційним болтовим з'єднанням і стримує рихтування від бокового зсуву. Водночас саме недооцінене тертя в блоках і напрямних знижує ККД поліспаста.

4. Похила площина та зв'язані тіла

Тіло на похилій площині перебуває під дією трьох сил: тяжіння, нормальної реакції опори й тертя. Силу тяжіння розкладають на складову вздовж площини, що зрушує тіло, і складову впоперек, що притискає його до поверхні. Тіло починає ковзати, коли тангенс кута нахилу перевищує коефіцієнт тертя.

Це має прямий будівельний зміст. Кут природного укосу піску, щебеню або ґрунту визначається саме цією умовою, і від нього залежить безпечна крутизна стінок траншеї без кріплення. Подавання матеріалу похилим лотком, робота стрічкового конвеєра, сповзання снігового покриву з покрівлі — усі ці задачі зводяться до однієї схеми.

Рух зв'язаних тіл — система з двох і більше тіл, з'єднаних нерозтяжним канатом через блок. Для кожного тіла записують другий закон і розв'язують систему рівнянь. Ідеальний блок змінює напрямок сили, не змінюючи її модуля; реальний втрачає частину зусилля на тертя й жорсткість каната. Поліспаст дає вигравш у силі, програючи у шляху, і його фактичний ККД для чотирикратної схеми зазвичай становить близько 0,9.

Ключові формули

- Рівноприскорений рух: $v = v_0 + at$, $s = v_0t + at^2/2$
- Другий закон Ньютона: $F = ma$
- Сила тяжіння: $F = mg$, $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$
- Сила тертя ковзання: $F(\text{тр}) = \mu N$
- Умова початку ковзання по похилій площині: $\tan \alpha > \mu$
- Доцентрове прискорення: $a = v^2/R = \omega^2 R$

Питання для самоконтролю

1. Чому різке гальмування лебідки небезпечніше для каната, ніж повільне підймання того самого вантажу?
2. Коефіцієнт тертя щебеню становить близько 0,7. Оцініть граничний кут природного укосу й поясніть, як це пов'язано з крутизною стінок траншеї.
3. Поліспаст має чотири гілки й ККД 0,9. Яке зусилля потрібно прикласти до збігаючої гілки для підймання вантажу вагою 20 кН?

ЛЕКЦІЯ 3

СТАТИКА. МОМЕНТ СИЛИ. УМОВИ РІВНОВАГИ. ЦЕНТР ТЯЖІННЯ ТА СТІЙКІСТЬ

План лекції

1. Складання й розкладання сил. Рівнодійна.

2. Момент сили. Правило моментів. Реакції опор балки.
3. Центр тяжіння тіла та плоскої фігури.
4. Види рівноваги. Стійкість споруд проти перекидання.

1. Сили та їх рівнодійна

Статика вивчає умови рівноваги тіл. Для будівельника це центральний розділ механіки: будівля за призначенням нерухома, і вся її робота полягає в тому, щоб залишатися в рівновазі під дією навантажень.

Сили, прикладені до тіла, можна складати за правилом паралелограма або многокутника, отримуючи рівнодійну. Зворотна операція — розкладання сили на складові за заданими напрямками — застосовується постійно: вага кроквяної ноги розкладається на складову вздовж крокви та розпір, спрямований горизонтально на стіну; натяг похилого розчала розкладається на вертикальну й горизонтальну складові.

Навантаження в будівництві класифікують за характером дії: постійні (власна вага конструкцій, вага шарів покрівлі), тимчасові тривалі (вага обладнання, перегородок), короткочасні (снігове, вітрове, вага людей і матеріалів під час монтажу) та особливі. За способом прикладання розрізняють зосереджені сили в кілоньютонах і розподілені навантаження в кілоньютонах на метр або на квадратний метр. Рівнодійна рівномірно розподіленого навантаження дорівнює його інтенсивності, помноженій на довжину ділянки, і прикладена в середині цієї ділянки.

2. Момент сили та реакції опор

Момент сили відносно осі дорівнює добутку модуля сили на плече — найкоротшу відстань від осі до лінії дії сили. Момент вважають додатним, якщо сила прагне обертати тіло проти годинникової стрілки, і від'ємним у протилежному випадку.

Тіло, що має вісь обертання, перебуває в рівновазі, коли алгебраїчна сума моментів дорівнює нулю — це правило моментів. Для тіла без закріпленої осі потрібні дві умови: сума проєкцій усіх сил на кожну вісь дорівнює нулю і сума моментів відносно будь-якої точки дорівнює нулю.

Саме з цих умов визначають реакції опор балки. Методика стандартна: складаємо рівняння моментів відносно однієї опори — у нього не входить невідома реакція в цій точці, тому відразу знаходимо другу реакцію. Потім або повторюємо для іншої опори, або використовуємо умову рівності суми вертикальних сил. Перевірка обов'язкова: сума реакцій має дорівнювати сумі всіх вертикальних навантажень.

Цей розрахунок ви виконуватимете сотні разів в опорі матеріалів і будівельних конструкціях. Фізика дає його в найчистішому вигляді, без ускладнень, тому опанувати схему треба зараз.

3. Центр тяжіння

Центр тяжіння — точка прикладання рівнодійної сил тяжіння всіх частинок тіла. Для однорідного симетричного тіла він лежить на осі симетрії. Для складеного перерізу, що

складається з прямокутників, положення центра тяжіння знаходять як середньозважене за площами координат центрів окремих частин.

Це не абстрактна вправа. Положення центра тяжіння перерізу визначає, де проходить нейтральна вісь балки, а отже, як розподіляються напруження при згині. Для двотавра, швелера, складеної дерев'яної балки чи залізобетонного перерізу цей розрахунок є першим кроком будь-якої перевірки міцності.

На майданчику центр тяжіння визначає ще й схему стропування. Якщо гак крана не розташований над центром тяжіння елемента, плита або ферма при відриві від землі повертається й починає розгойдуватися — типова причина аварій при монтажі.

4. Види рівноваги та стійкість

Розрізняють стійку рівновагу, коли при малому відхиленні виникає сила, що повертає тіло у вихідне положення, нестійку, коли відхилення зростає, і байдужу. Критерій простий: рівновага стійка, якщо центр тяжіння при відхиленні піднімається.

Тіло на опорній поверхні не перекидається, доки вертикаль, проведена через центр тяжіння, проходить усередині площі опираю. Чим ширша база й чим нижче центр тяжіння, тим стійкіше тіло. Звідси впливає конструкція баштового крана з баластом на основі, форма підпірної стіни з розширеною підшою і вимога до мінімальної ширини основи риштування.

Кількісною мірою є коефіцієнт стійкості — відношення утримувального моменту до перекидного, обидва відносно ребра перекидання. Для крана перекидний момент створюють вага вантажу на виліті стріли й вітрове навантаження, а утримувальний — вага самого крана й баласту відносно ребра, утвореного рейкою або опорою. Нормативні документи вимагають, щоб коефіцієнт стійкості перевищував одиницю з певним запасом, різним для робочого й неробочого стану.

Та сама схема працює для підпірної стіни, яку прагне перекинути горизонтальний тиск ґрунту, і для окремо встановленої огорожі, на яку діє вітер. Змінюються тільки джерела моментів, метод залишається незмінним.

Ключові формули

- Момент сили: $M = F \cdot d$
- Умови рівноваги: $\sum F(x) = 0$, $\sum F(y) = 0$, $\sum M = 0$
- Рівнодійна розподіленого навантаження: $R = q \cdot l$, прикладена в середині ділянки
- Координата центра тяжіння складеної фігури: $x(c) = (A_1x_1 + A_2x_2 + \dots) / (A_1 + A_2 + \dots)$
- Коефіцієнт стійкості: $k = M(\text{утр}) / M(\text{перек})$

Питання для самоконтролю

1. Балка довжиною 6 м на двох опорах несе рівномірно розподілене навантаження 4 кН/м і зосереджену силу 10 кН на відстані 2 м від лівої опори. Визначте реакції опор і виконайте перевірку.

2. Чому розширення підоснови підпірної стіни підвищує її стійкість проти перекидання, хоча тиск ґрунту при цьому не змінюється?
3. Що станеться з плитою при відриві від землі, якщо гак крана зміщений відносно її центра тяжіння, і чому це небезпечно?

ЛЕКЦІЯ 4

ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ ТА ЕНЕРГІЇ. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ, ККД

План лекції

1. Імпульс тіла та імпульс сили. Закон збереження імпульсу.
2. Пружний і непружний удари.
3. Робота, потужність, енергія. Закон збереження енергії.
4. Прості механізми та ККД підйимального обладнання.

1. Імпульс і закон його збереження

Імпульс тіла дорівнює добутку маси на швидкість і є векторною величиною. Зміна імпульсу дорівнює імпульсу сили — добутку сили на час її дії. Звідси випливає важливий практичний висновок: та сама зміна швидкості досягається або великою силою за короткий час, або малою силою за тривалий.

Саме на цьому ґрунтуються всі технічні рішення з пом'якшення ударів. Дерев'яна підкладка під плиту, що опускається краном, розтягує час зупинки й зменшує силу удару в кілька разів. Пружна прокладка під обладнанням, що створює вібрацію, працює за тим самим принципом.

У замкненій системі, де зовнішні сили відсутні або скомпенсовані, векторна сума імпульсів зберігається. Закон збереження імпульсу дозволяє розрахувати результат зіткнення, не вникаючи в подробиці процесу деформації.

2. Удар і його застосування в будівництві

При абсолютно непружному ударі тіла рухаються далі разом, кінетична енергія частково переходить у внутрішню, тіла нагріваються й деформуються. При абсолютно пружному ударі кінетична енергія зберігається. Реальні удари займають проміжне положення.

Забивання палі дизель-молотом або копром — класичний непружний удар. Енергія падаючої частини передається палі, частина йде на подолання опору ґрунту й занурення, частина розсіюється в деформаціях наголовника. Відмова палі — середнє занурення за один удар — є мірою несучої здатності і прямо обчислюється через енергію удару.

Ущільнення ґрунту трамбівкою, робота відбійного молотка, дія вібропальника на опалубку — усе це керований удар. Розуміння того, що передається саме імпульс, пояснює, чому легка трамбівка з високою частотою й важка з низькою дають різний результат на тому самому ґрунті.

3. Робота, енергія та потужність

Механічна робота дорівнює добутку сили на переміщення та на косинус кута між ними. Сила, перпендикулярна до переміщення, роботи не виконує: саме тому нормальна реакція опори не входить в енергетичний баланс візка, що котиться по горизонталі.

Кінетична енергія пропорційна масі й квадрату швидкості, потенціальна енергія піднятого тіла — масі та висоті. Повна механічна енергія замкненої системи без тертя зберігається. За наявності тертя частина енергії необоротно переходить у внутрішню, тобто в теплоту.

Потужність — робота за одиницю часу. Для підймальних механізмів вона визначає добір двигуна: потужність дорівнює добутку ваги вантажу на швидкість підймання, поділеному на ККД. Лебідка, що піднімає 10 кН зі швидкістю 0,2 м/с при ККД 0,8, вимагає двигуна потужністю не менше 2,5 кВт.

4. Прості механізми та ККД

Важіль, блок, похила площина, гвинт і клин дають виграш у силі, програючи у відстані. Золоте правило механіки формулює це точно: жоден механізм не дає виграшу в роботі.

Коефіцієнт корисної дії — відношення корисної роботи до затраченої. Для поліспада він визначається кількістю блоків і тертям у них, для лебідки — ще й втратами в редукторі, для підймального крана — сумою всіх ланок. Множення ККД окремих ланок дає ККД усього ланцюга, тому багатоступінчастий механізм завжди програє в ефективності.

Практичний висновок для будівельного майданчика простий: якщо фактичне зусилля на приводі помітно перевищує розрахункове, причина майже завжди в різкому падінні ККД — заклинених блоках, несправному редукторі, перекошених напрямних. Це діагностичний, а не теоретичний висновок.

Ключові формули

- Імпульс тіла: $p = mv$
- Зміна імпульсу: $F\Delta t = \Delta p$
- Робота: $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$
- Кінетична енергія: $E = mv^2/2$
- Потенціальна енергія: $E = mgh$
- Потужність: $N = A/t = F \cdot v$
- Коефіцієнт корисної дії: $\eta = A(\text{кор}) / A(\text{затр}) \cdot 100 \%$

Питання для самоконтролю

1. Чому дерев'яна підкладка під плиту, що опускається, зменшує силу удару, хоча енергія плити не змінюється?
2. Лебідка піднімає 15 кН зі швидкістю 0,25 м/с, ККД механізму 0,75. Яка потрібна потужність двигуна?
3. Поліспаст має ККД 0,9, лебідка — 0,8. Який ККД усього підймального ланцюга і чому він менший за кожен з них?

ЛЕКЦІЯ 5

МЕХАНІКА ДЕФОРМІВНОГО ТВЕРДОГО ТІЛА. НАПРУЖЕННЯ, ЗАКОН ГУКА, МІЦНІСТЬ

План лекції

1. Види деформацій. Механічне напруження.
2. Закон Гука. Модуль Юнга. Жорсткість елемента.
3. Діаграма розтягу. Границі пружності, текучості, міцності.
4. Механічні характеристики будівельних матеріалів. Запас міцності.

1. Види деформацій і напруження

Під дією зовнішніх сил тіло змінює форму й розміри. Основні види деформацій — розтяг, стиск, зсув, кручення та згин. Згин, найпоширеніший у будівельних конструкціях, є комбінованим: верхні волокна балки стискаються, нижні розтягуються, а посередині лежить нейтральний шар, де напруження дорівнює нулю.

Механічне напруження — сила, що припадає на одиницю площі перерізу. Вимірюється в паскалях, а практично — в мегапаскалях. Нормальне напруження виникає при розтягу й стиску, дотичне — при зсуві.

Саме напруження, а не сила, визначає, чи витримає елемент. Сила 100 кН для арматурного стрижня діаметром 10 мм є руйнівною, а для колони перерізом 400 на 400 мм практично непомітною. Перехід від сили до напруження — головний крок усіх розрахунків на міцність.

2. Закон Гука й жорсткість

У межах пружності відносна деформація пропорційна напруженню. Коефіцієнт пропорційності — модуль Юнга, або модуль пружності, — є характеристикою матеріалу і показує його опір пружному деформуванню.

Порядок величин варто запам'ятати: для сталі модуль Юнга становить близько 200 ГПа, для бетону — від 20 до 40 ГПа залежно від класу, для деревини вздовж волокон — близько 10 ГПа, для полімерів — одиниці гігапаскалів. Сталь приблизно в шість-десять разів жорсткіша за бетон, і саме тому в залізобетоні при спільній роботі арматура бере на себе основну частку зусилля в розтягнутій зоні.

Жорсткість елемента — добуток модуля Юнга на площу перерізу для розтягу-стиску. Вона визначає не міцність, а деформативність. Два стрижні однакової міцності можуть мати різний прогин, і в багатьох конструкціях розрахунок за деформаціями виявляється вирішальним: перекриття, яке не руйнується, але помітно прогинається, є непридатним до експлуатації.

3. Діаграма розтягу

Випробування зразка на розтяг дає діаграму залежності напруження від деформації. Спочатку йде прямолінійна ділянка, де виконується закон Гука, до границі пропорційності. Далі — границя пружності, за якою деформація перестає бути повністю оборотною.

Для маловуглецевої сталі характерна площадка текучості: деформація зростає майже без збільшення навантаження. Це фізична основа пластичного, а отже попередженого руйнування — конструкція встигає подати ознаки аварійного стану помітними прогинами й тріщинами перед обваленням.

Найбільше напруження на діаграмі — границя міцності, або тимчасовий опір. Після нього утворюється шийка й настає руйнування. Крихкі матеріали — бетон, цегла, чавун, скло — площадки текучості не мають і руйнуються раптово, майже без пластичної деформації. Саме тому бетон завжди армують: сталь надає конструкції пластичності, якої бетон не має.

Бетон добре працює на стиск і погано на розтяг: його міцність на розтяг приблизно в десять-п'ятнадцять разів менша. Звідси вся логіка армування — арматуру ставлять у розтягнуту зону перерізу, тобто внизу прольоту балки й угорі над опорою.

4. Запас міцності

Допустиме напруження завжди менше за небезпечне. Відношення небезпечного напруження до фактичного називають коефіцієнтом запасу міцності. Для пластичних матеріалів за небезпечне беруть границю текучості, для крихких — границю міцності.

Запас потрібен не через невпевненість інженера, а через об'єктивну мінливість: розкид властивостей матеріалу, неточність виготовлення, відхилення фактичних навантажень від розрахункових, старіння й корозію. У сучасних нормах єдиний коефіцієнт запасу замінено системою часткових коефіцієнтів надійності за матеріалом і за навантаженням, але фізичний зміст залишився тим самим.

Твердість — опір матеріалу проникненню іншого тіла — вимірюється методами Брінелля, Роквелла, Шора. Для будівельника це основа роботи склерометра: відскок бойка від поверхні бетону пов'язаний з його поверхневою твердістю, а вона — з міцністю. Важливо пам'ятати, що склерометр оцінює саме поверхневий шар, і карбонізована або перезволожена поверхня спотворює результат.

Ключові формули

- Механічне напруження: $\sigma = F/A$
- Відносна деформація: $\varepsilon = \Delta l/l$
- Закон Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$
- Абсолютне видовження: $\Delta l = Fl / (EA)$
- Коефіцієнт запасу міцності: $n = \sigma(\text{неб}) / \sigma(\text{факт})$

Питання для самоконтролю

1. Сталевий стрижень діаметром 12 мм розтягується силою 40 кН. Визначте напруження й порівняйте його з границею текучості сталі 240 МПа.
2. Чому бетон завжди армують саме в розтягнутій зоні перерізу, а не рівномірно по всьому перерізу?

3. Два елементи мають однакову міцність, але різний модуль Юнга. Чим відрізнятиметься їхня поведінка під експлуатаційним навантаженням?

ЛЕКЦІЯ 6

ТИСК. ОСНОВИ ГІДРОСТАТИКИ. ТИСК ҐРУНТУ ТА ҐРУНТОВИХ ВОД

План лекції

1. Тиск твердих тіл. Несуча здатність основи.
2. Закон Паскаля. Гідростатичний тиск.
3. Сполучені посудини. Атмосферний тиск. Закон Архімеда.
4. Тиск ґрунту й води на підземні конструкції.

1. Тиск твердих тіл на основу

Тиск — сила, що діє перпендикулярно до поверхні, поділена на площу цієї поверхні. Одиниця тиску — паскаль; у будівництві частіше вживають кілопаскалі та мегапаскалі.

Тиск під подошвою фундаменту обчислюють як відношення сумарного навантаження до площі подошви. Цю величину порівнюють з розрахунковим опором ґрунту основи. Якщо тиск перевищує допустимий, фундамент не руйнується — осідає ґрунт, і це найчастіша причина нерівномірних осідань і тріщин у стінах.

Звідси практичне рішення: щоб зменшити тиск, збільшують площу опирання. Саме так працюють стрічковий фундамент замість стовпчастого, плитний фундамент на слабких ґрунтах, опорні підкладки під виносні опори автокрана. Кран вагою кілька десятків тонн без підкладок продавлює навіть щільний ґрунт, бо площа п'яти опори мала.

2. Закон Паскаля й гідростатичний тиск

Тиск, створений на рідину або газ, передається в усіх напрямках без зміни. Це закон Паскаля, і на ньому ґрунтується робота всієї гідравліки будівельних машин: гідроциліндрів екскаватора, домкратів, гідравлічного преса для випробування зразків бетону.

Гідростатичний тиск стовпа рідини пропорційний густині, прискоренню вільного падіння та глибині й не залежить від форми посудини. Тиск води на глибині 3 м становить приблизно 30 кПа незалежно від того, вузька це труба чи широкий резервуар.

Сила тиску рідини на вертикальну стінку обчислюється як добуток середнього тиску на площу, а прикладена вона не посередині, а на третині висоти від низу, бо епюра тиску трикутна. Це важливо саме для перекидного моменту: рівнодійна розташована низько, але плече її відлічується від низу стіни.

3. Сполучені посудини й закон Архімеда

У сполучених посудинах однорідна рідина встановлюється на одному рівні. Цей принцип — основа водяного рівня, найпростішого й досі найнадійнішого приладу для перенесення позначок на великі відстані без оптики.

Атмосферний тиск при нормальних умовах становить близько 101 кПа. Він визначає роботу вакуумних присосок для скління, граничну висоту всмоктування насоса та поведінку повітря в порах матеріалів.

Закон Архімеда: на занурене тіло діє виштовхувальна сила, що дорівнює вазі витісненої рідини. У будівництві найважливіший наслідок — спливання підземних споруд. Порожній резервуар, підвал або колодязь у водонасиченому ґрунті може бути виштовхнутий угору, якщо вага конструкції менша за архімедову силу. Тому такі споруди пригужують, анкерують або зводять з розрахунком на затоплення котловану.

4. Тиск ґрунту й ґрунтових вод

Ґрунт тисне на підпірну стіну не тільки вертикально. Активний тиск ґрунту спрямований горизонтально, зростає з глибиною і залежить від кута внутрішнього тертя. Епюра цього тиску також трикутна, тому рівнодійна прикладена на третині висоти стіни від підосви.

За наявності ґрунтових вод картина змінюється принципово. До тиску ґрунту додається гідростатичний тиск води, який значно більший, бо вода кута внутрішнього тертя не має і передає тиск за законом Паскаля в повному обсязі. Саме тому підтоплення різко збільшує навантаження на підпірні й огорожувальні конструкції, і саме тому за стіною влаштовують дренаж — не для відведення вологи заради сухості, а для зняття гідростатичного тиску.

Гідроізоляція підземної частини працює проти напору, який визначається висотою стовпа води над конструкцією. Обмазувальна гідроізоляція придатна лише для захисту від капілярної вологи; при постійному напорі потрібна обклеювальна або мембранна з розрахунком на конкретний тиск.

Ключові формули

- Тиск: $p = F/A$
- Гідростатичний тиск: $p = \rho gh$
- Сила тиску на вертикальну стінку: $F = \rho gh^2b/2$, лінія дії на висоті $h/3$ від низу
- Архімедова сила: $F(A) = \rho(\text{рід}) \cdot g \cdot V$
- Тиск під підосвою фундаменту: $p = N/A \leq R$

Питання для самоконтролю

1. Визначте тиск під підосвою стрічкового фундаменту шириною 0,6 м, якщо навантаження від стіни становить 90 кН на погонний метр. Порівняйте з розрахунковим опором суглинку 200 кПа.
2. Чому рівнодійна тиску води на вертикальну стінку прикладена на третині висоти, а не посередині?
3. Порожній залізобетонний резервуар у водонасиченому ґрунті почав спливати. Які фізичні величини треба порівняти, щоб пояснити це, і якими заходами запобігають такому явищу?

МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 1 охоплює матеріал модулів I та II, тобто лекцій 1–10, і проводиться після завершення модуля II.

МОДУЛЬ II. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

4 лекції, 8 годин

ЛЕКЦІЯ 7

ОСНОВИ МКТ. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ГАЗОВІ ЗАКОНИ. БУДОВА ТВЕРДИХ ТІЛ І РІДИН

План лекції

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
2. Ідеальний газ. Температура. Газові закони.
3. Будова твердих тіл і рідин. Кристалічні та аморфні тіла.
4. Поверхневий натяг і капілярні явища в будівельних матеріалах.

1. Основні положення МКТ

Молекулярно-кінетична теорія спирається на три положення: речовина складається з частинок, частинки перебувають у безперервному хаотичному русі, між ними діють сили притягання й відштовхування. Дослідні підтвердження — броунівський рух, дифузія, стисливість газів, явище змочування.

Кількість речовини вимірюється в молях, стала Авогадро дає число частинок в одному молі. Молярна маса пов'язує масу речовини з кількістю частинок. Для будівельника ці поняття важливі передусім у хімії в'яжучих, але без них неможливо коректно говорити про вологість повітря й процеси твердіння.

2. Ідеальний газ і газові закони

Ідеальний газ — модель, у якій знехтувано розмірами молекул і силами взаємодії між ними, крім миттєвих зіткнень. Основне рівняння МКТ пов'язує тиск газу із середньою кінетичною енергією молекул та їх концентрацією.

Температура є мірою середньої кінетичної енергії хаотичного руху молекул. Абсолютна шкала Кельвіна починається з абсолютного нуля, при якому цей рух припиняється. Перехід між шкалами простий: температура в кельвінах дорівнює температурі в градусах Цельсія плюс 273.

Ізопрцеси — процеси при сталій температурі, тиску або об'ємі — описуються законами Бойля-Маріотта, Гей-Люссака та Шарля, а разом вони зводяться до рівняння стану ідеального газу. Практичні прояви в будівництві: робота пневматичного інструменту, поведінка повітря в порах бетону при твердінні, розширення повітря в замкнених порожнинах при нагріванні покрівлі сонцем.

3. Будова твердих тіл і рідин

У кристалічних тілах частинки утворюють упорядковану ґратку, тому такі тіла мають чітку температуру плавлення й часто анізотропні властивості. Метали, лід, кварц, більшість мінералів цементного каменю — кристалічні.

Аморфні тіла впорядкованої структури не мають, розм'якшуються поступово і не мають визначеної температури плавлення. Скло, бітум, смоли, багато полімерів — аморфні. Саме тому бітумна мастика влітку тече, а взимку стає крихкою: це не дефект матеріалу, а наслідок його аморфної будови.

Деревина має волокнисту будову й різко анізотропна: міцність і теплопровідність уздовж і впоперек волокон відрізняються в рази. Це треба враховувати і в розрахунку, і в конструюванні вузлів.

4. Поверхневий натяг і капілярні явища

Молекули на поверхні рідини перебувають у некомпенсованому силовому полі, тому поверхня прагне скоротитися. Кількісною мірою є коефіцієнт поверхневого натягу.

Змочування або незмочування визначає, підніметься рідина в капілярі чи опуститься. Висота підняття обернено пропорційна радіусу капіляра: чим тонші пори, тим вище піднімається вода.

Це центральне явище для будівельного матеріалознавства. Цегла, газобетон, вапняк, штукатурні розчини мають розвинену систему тонких пор, і волога з ґрунту піднімається ними на висоту до метра й вище. Наслідки — висолі, відшарування опорядження, промерзання й руйнування цоколя. Відсічна горизонтальна гідроізоляція в стіні над фундаментом розриває саме цей капілярний шлях.

Зворотний бік явища — гідрофобізація. Просочення поверхні гідрофобним складом робить її незмочуваною, капілярне підсмоктування припиняється, але паропроникність зберігається. Розуміння різниці між гідроізоляцією і гідрофобізацією прямо впливає з фізики змочування.

Ключові формули

- Кількість речовини: $\nu = m/M = N/N(A)$
- Рівняння стану ідеального газу: $pV = \nu RT$
- Об'єднаний газовий закон: $p_1 V_1 / T_1 = p_2 V_2 / T_2$
- Абсолютна температура: $T = t + 273$
- Висота підняття рідини в капілярі: $h = 2\sigma / (\rho g r)$

Питання для самоконтролю

1. Чому бітумна мастика не має визначеної температури плавлення, а лід має?
2. Вода піднімається в капілярі радіусом 0,05 мм. Оцініть висоту підняття і поясніть, як це пов'язано з висолами на цоколі.
3. У чому принципова різниця між гідроізоляцією і гідрофобізацією з погляду фізики змочування?

ЛЕКЦІЯ 8

ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ЗАКОНИ ТЕРМОДИНАМІКИ

План лекції

1. Внутрішня енергія та способи її зміни.
2. Кількість теплоти. Питома теплоємність. Рівняння теплового балансу.
3. Перший закон термодинаміки та ізопроееси.
4. Другий закон термодинаміки. Теплова інерція огорожень.

1. Внутрішня енергія

Внутрішня енергія тіла — сумарна енергія хаотичного руху та взаємодії його частинок. Змінити її можна двома способами: виконанням роботи над тілом або передаванням теплоти.

Обидва способи мають будівельні ілюстрації. Ущільнення бетону вібратором — механічна робота, що частково переходить у внутрішню енергію суміші. Тверднення цементу супроводжується виділенням теплоти гідратації, і масивний фундамент може розігрітися на десятки градусів без будь-якого зовнішнього нагрівання. Саме з цим пов'язані вимоги до температурного режиму витримування масивних конструкцій і ризик утворення термічних тріщин.

2. Кількість теплоти й тепловий баланс

Кількість теплоти, потрібна для нагрівання тіла, пропорційна масі, зміні температури й питомій теплоємності речовини. Питома теплоємність показує, скільки енергії потрібно для нагрівання одного кілограма на один кельвін.

Порядок величин для будівельних матеріалів: вода — близько 4200 Дж на кілограм-кельвін, бетон і цегла — близько 840 до 880, деревина — близько 2300, сталь — близько 460, мінеральна вата — близько 840. Вода має аномально високу теплоємність, тому зволожена конструкція поводить себе теплотехнічно зовсім інакше, ніж суха.

Рівняння теплового балансу стверджує, що в теплоізольованій системі кількість теплоти, віддана одними тілами, дорівнює отриманій іншими. На ньому ґрунтуються розрахунки підігрівання води й заповнювачів для зимового бетонування, підбір температури суміші на виході з бетонозмішувача, оцінювання остигання бетону в опалубці.

3. Перший закон термодинаміки

Кількість теплоти, надана системі, витрачається на зміну внутрішньої енергії та на виконання роботи проти зовнішніх сил. Це закон збереження енергії в тепловій формі.

Для ізопроеесів він набуває простих форм. В ізотермічному процесі вся підведена теплота йде на роботу, в ізохорному — вся на зміну внутрішньої енергії, в ізобарному — розподіляється між ними. Адіабатний процес відбувається без теплообміну, і робота виконується за рахунок внутрішньої енергії, через що газ охолоджується — це відчувається при випуску стисненого повітря з ресивера компресора.

4. Другий закон і теплова інерція

Другий закон термодинаміки встановлює напрямок процесів: теплота самочинно переходить від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою, і ніколи навпаки. Мірою неупорядкованості системи є ентропія, яка в замкненій системі не спадає.

Тепловий двигун перетворює частину теплоти в роботу, і його ККД принципово обмежений. Тепловий насос працює в зворотному напрямку, переносячи теплоту від холодного середовища до теплого за рахунок зовнішньої роботи — саме тому він дає в кілька разів більше теплоти, ніж споживає електроенергії, не порушуючи при цьому жодного закону.

Теплова інерція огорожувальної конструкції — її здатність накопичувати теплоту й сповільнювати коливання температури. Масивна цегляна або бетонна стіна вдень накопичує теплоту, вночі віддає, згладжуючи добові коливання. Легка каркасна стіна тієї самої теплопровідності такої здатності не має: вона швидко вистигає й швидко перегрівається.

Практичний наслідок для проектування очевидний: рівний термічний опір ще не означає рівного теплового комфорту. Для приміщень з періодичним опаленням вигідніші легкі огороження, для будівель постійного проживання в кліматі з великими добовими перепадами — масивні.

Ключові формули

- Кількість теплоти на нагрівання: $Q = cm\Delta t$
- Рівняння теплового балансу: $Q(\text{віддана}) = Q(\text{одержана})$
- Перший закон термодинаміки: $Q = \Delta U + A$
- ККД теплового двигуна: $\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1$

Питання для самоконтролю

1. Скільки теплоти потрібно, щоб нагріти 200 кг води для зимового бетонування від 10 до 60 °С?
2. Чому масивна цегляна стіна забезпечує стабільнішу температуру приміщення, ніж легка каркасна з тим самим термічним опором?
3. Чому розігрівання масивного фундаменту під час тверднення бетону може призвести до тріщин, хоча зовнішнього нагрівання немає?

ЛЕКЦІЯ 9

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. ТЕРМІЧНИЙ ОПІР ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

План лекції

1. Три механізми передавання теплоти.
2. Теплопровідність будівельних матеріалів.
3. Термічний опір багатошарової стінки. Коефіцієнт теплопередачі.
4. Тепловтрати приміщення. Мостки холоду.

1. Механізми теплопередачі

Теплота передається трьома способами. Теплопровідність — передавання енергії від частинки до частинки без переміщення речовини, основний механізм у твердих тілах. Конвекція — перенесення теплоти разом з рухомими об'ємами рідини або газу. Теплове випромінювання — перенесення енергії електромагнітними хвилями, яке не потребує середовища.

В огорожувальній конструкції працюють усі три одночасно. Через товщу стіни теплота йде теплопровідністю; від внутрішнього повітря до поверхні стіни й від зовнішньої поверхні до атмосфери — конвекцією та випромінюванням; у повітряному прошарку всередині конструкції — конвекцією й випромінюванням між поверхнями.

Це пояснює, чому ефективність замкненого повітряного прошарку обмежена. Повітря саме по собі чудовий теплоізолятор, але щойно прошарок стає завтовшки більш як два-три сантиметри, у ньому розвивається конвекційна циркуляція, і опір перестає зростати. Уся ідея волокнистих і пористих утеплювачів полягає в тому, щоб розбити повітря на дрібні комірки, де конвекція неможлива.

2. Теплопровідність матеріалів

Коефіцієнт теплопровідності показує, який тепловий потік проходить через шар матеріалу одиничної товщини при різниці температур в один кельвін. Вимірюється у ватах на метр-кельвін.

Орієнтовні значення варто тримати в пам'яті: мінеральна вата й пінополістирол — від 0,035 до 0,045, деревина впоперек волокон — близько 0,15, газобетон — від 0,12 до 0,2, повнотіла цегла — близько 0,7, залізобетон — близько 1,7 до 2,0, сталь — близько 58. Різниця між утеплювачем і залізобетоном — приблизно п'ятдесят разів.

Теплопровідність зростає зі збільшенням густини й особливо різко — зі зволоженням. Вода проводить теплоту приблизно у двадцять п'ять разів краще за повітря, лід — ще майже вчетверо краще за воду. Зволожений утеплювач втрачає значну частину ефективності, а промерзлий — ще більше. Саме тому нормативні значення теплопровідності беруть з урахуванням експлуатаційної вологості, а не для сухого матеріалу, і саме тому захист теплоізоляції від замочування є не другорядним, а визначальним.

3. Термічний опір багатошарової конструкції

Термічний опір шару дорівнює товщині шару, поділеній на коефіцієнт теплопровідності. Для багатошарової конструкції опори шарів додаються, як послідовно з'єднані резистори в електричному колі. Аналогія з електрикою тут повна: тепловий потік відповідає струму, різниця температур — напрузі, термічний опір — електричному.

До суми опорів шарів додають опір тепловіддачі внутрішньої поверхні (близько 0,115) і зовнішньої (близько 0,043). Отриманий загальний опір теплопередачі порівнюють з нормативним мінімальним значенням для відповідної температурної зони.

Коефіцієнт теплопередачі — величина, обернена до загального опору. Питомий тепловий потік через конструкцію дорівнює добутку коефіцієнта теплопередачі на різницю температур усередині й назовні.

Розрахунок температури на внутрішній поверхні стіни виконується за тією самою логікою: перепад температури на ділянці конструкції пропорційний частці її термічного опору в загальному. Ця температура критично важлива — від неї залежить, чи випаде конденсат, про що йтиметься в наступній лекції.

4. Тепловтрати й мостки холоду

Тепловтрати приміщення обчислюють як суму потоків через усі огороження: стіни, вікна, покриття, підлогу. Вікно з опором теплопередачі 0,6 має приблизно в п'ять разів більші питомі втрати, ніж утеплена стіна з опором 3,3, тому частка вікон у тепловому балансі завжди непропорційно велика порівняно з їх площею.

Мостком холоду називають ділянку конструкції з підвищеною теплопровідністю: залізобетонну перемичку, виступну плиту балкона, металевий кріпильний елемент, кут будівлі. У цих місцях тепловий потік зростає, а температура внутрішньої поверхні знижується.

Наслідки мостка холоду не обмежуються втратами енергії. Знижена температура поверхні означає підвищену ймовірність конденсації вологи, а відтак — відсиріння, появу плісняви й поступове руйнування опорядження. Тепловізійне обстеження будівлі виявляє саме ці ділянки, і його фізична основа — теплове випромінювання нагрітих поверхонь, про яке йтиметься в лекції 16.

Конструктивний висновок простий: теплоізоляційна оболонка має бути замкненою. Розрив контуру утеплення на перекритті балкона або в місці примикання плити зводить нанівець ефект від потовщення утеплювача на решті площі стіни.

Ключові формули

- Термічний опір шару: $R = \delta/\lambda$
- Загальний опір теплопередачі: $R_0 = R(v) + \Sigma R(i) + R(z)$
- Коефіцієнт теплопередачі: $k = 1/R_0$
- Питомий тепловий потік: $q = k \cdot (t(v) - t(z))$
- Тепловий потік через огороження: $Q = q \cdot A$

Питання для самоконтролю

1. Стіна складається з цегли 380 мм ($\lambda = 0,7$) та мінеральної вати 100 мм ($\lambda = 0,04$). Обчисліть загальний опір теплопередачі з урахуванням опорів тепловіддачі.
2. Чому зволоження утеплювача знижує його ефективність значно сильніше, ніж зволоження цегляної кладки?
3. Чому потовщення утеплювача на стіні не дає очікуваного ефекту, якщо не усунуто мосток холоду по плиті балкона?

ЛЕКЦІЯ 10

ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ. ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ. ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ

План лекції

1. Плавлення, тверднення, пароутворення, конденсація.
2. Абсолютна й відносна вологість. Точка роси.
3. Конденсація в огороженні. Промерзання й пліснява.
4. Теплове розширення. Деформаційні шви. Морозостійкість.

1. Фазові переходи

Плавлення й тверднення відбуваються при сталій температурі: підведена теплота йде не на нагрівання, а на руйнування кристалічної ґратки. Кількість теплоти визначається питомою теплотою плавлення.

Випаровування відбувається з поверхні за будь-якої температури, кипіння — в усьому об'ємі за температури кипіння. Питома теплота пароутворення для води велика — близько 2,26 мегаджоуля на кілограм, що в понад п'ять разів більше за теплоту, потрібну для нагрівання води від нуля до ста градусів. Саме тому висихання щойно влаштованої стяжки або штукатурки забирає стільки енергії та часу, а примусове сушіння тепловими гарматами обходиться дорого.

Конденсація — зворотний процес, при якому теплота, навпаки, виділяється. Це має прямий наслідок для огорожень: конденсація вологи в товщі утеплювача не лише зволожує його, а й змінює тепловий режим конструкції.

2. Вологість повітря й точка роси

Абсолютна вологість — маса водяної пари в одиниці об'єму повітря. Відносна вологість — відношення фактичної кількості пари до максимально можливої за цієї температури, у відсотках.

Ключова закономірність: чим вища температура, тим більше водяної пари може втримати повітря. Тепле повітря в приміщенні з відносною вологістю 55 відсотків містить значно більше пари, ніж морозне зовнішнє повітря зі 100 відсотками.

Точка роси — температура, до якої треба охолодити повітря при незмінному вмісті пари, щоб вона почала конденсуватися. Для типових умов житлового приміщення, скажімо 20 градусів і 55 відсотків, точка роси становить приблизно 10,7 градуса. Прилади для вимірювання — психрометр, що працює на різниці показів сухого й вологого термометрів, і електронний гігрометр.

3. Конденсація в огороженні

Конденсат випадає там, де температура поверхні або шару всередині конструкції нижча за точку роси. Якщо теплотехнічний розрахунок дає температуру внутрішньої поверхні стіни 16 градусів, а точка роси 10,7 — конденсації немає. Якщо ж у куті будівлі або на мостку холоду температура падає до 9 градусів — волога випадає, і з'являється пліснява.

Звідси випливає логіка двох стратегій. Перша — підняти температуру поверхні, тобто утеплити конструкцію. Друга — знизити точку роси, тобто зменшити вологість повітря вентиляцією. Обидві працюють, але перша усуває причину, а друга компенсує наслідок.

Принципово важливо, де саме розташований утеплювач. При зовнішньому утепленні несуча стіна опиняється в теплій зоні, її температура вища за точку роси, і конденсація в товщі не відбувається. При внутрішньому утепленні стіна виявляється в холодній зоні, зона можливої конденсації зміщується на межу між утеплювачем і стіною, і без ретельно виконаного пароізоляційного шару конструкція починає накопичувати вологу. Це не питання смаку чи зручності — це фізика розподілу температури по перерізу.

Промерзання стіни означає, що ізотерма нуля градусів зайшла в товщу конструкції. Вода, що замерзла в порах, збільшується в об'ємі приблизно на дев'ять відсотків і руйнує матеріал зсередини. Багаторазове чергування замерзання й відтавання — головний механізм втрати морозостійкості.

4. Теплове розширення

При нагріванні тіла розширюються. Лінійне подовження пропорційне початковій довжині, зміні температури й коефіцієнту лінійного розширення матеріалу.

Числа варто знати: для сталі коефіцієнт становить приблизно 12 мільйонних на кельвін, для бетону — близько 10 мільйонних, для алюмінію — близько 23, для полімерних труб — на порядок більше. Близькість коефіцієнтів сталі й бетону є фізичною передумовою існування залізобетону: при зміні температури арматура й бетон деформуються майже однаково й не відшаровуються.

Оцінимо масштаб. Залізобетонна плита завдовжки 30 метрів при річному перепаді температури 60 градусів змінює довжину приблизно на 18 міліметрів. Якщо конструкції не дати можливості деформуватися вільно, у ній виникнуть температурні напруження, здатні перевищити міцність бетону на розтяг.

Саме тому влаштовують деформаційні шви — в покриттях, стяжках, протяжних стінах, на мостах і в трубопроводах. Компенсатор на теплотрасі, зазор між плитами тротуару, рухома опора прогонової будови — усі ці рішення розв'язують одну фізичну задачу: дати матеріалу розширитися без виникнення напружень.

Ключові формули

- Теплота плавлення: $Q = \lambda m$
- Теплота пароутворення: $Q = r m$
- Відносна вологість: $\varphi = (\rho / \rho(\text{нас})) \cdot 100 \%$
- Лінійне теплове розширення: $\Delta l = \alpha l \Delta t$
- Температурне напруження при защемленні: $\sigma = E \alpha \Delta t$

Питання для самоконтролю

1. У приміщенні 20 °С і відносна вологість 60 %, точка роси 12 °С. Температура поверхні в куті 10 °С. Чи випаде конденсат і що потрібно змінити?
2. Чому внутрішнє утеплення стіни є теплотехнічно ризикованішим за зовнішнє?
3. Обчисліть подовження сталевий труби завдовжки 40 м при нагріванні на 50 °С і поясніть призначення компенсатора.

Модуль II завершено. МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 1 охоплює лекції 1–10.

МОДУЛЬ III. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

4 лекції, 8 годин

ЛЕКЦІЯ 11

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЗАРЯД, НАПРУЖЕНІСТЬ, ПОТЕНЦІАЛ. БЛИСКАВКОЗАХИСТ

План лекції

1. Електричний заряд. Закон Кулона.
2. Електричне поле, напруженість, потенціал.
3. Провідники й діелектрики. Електроємність.
4. Атмосферна електрика. Блискавкозахист і заземлення.

1. Заряд і закон Кулона

Електричний заряд — фундаментальна властивість частинок, що виявляється в електромагнітній взаємодії. Заряд дискретний і кратний елементарному, а в замкненій системі зберігається.

Закон Кулона визначає силу взаємодії двох точкових зарядів: вона пропорційна добутку зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані. Середовище послаблює взаємодію в стільки разів, скільки становить його діелектрична проникність.

2. Електричне поле

Електричне поле — матеріальне середовище, через яке передається взаємодія зарядів. Силовою характеристикою поля є напруженість, енергетичною — потенціал. Різниця потенціалів між двома точками називається напругою і дорівнює роботі поля з переміщення одиничного заряду.

Напруженість поля між плоскими паралельними поверхнями дорівнює напрузі, поділеній на відстань. Це пояснює ефект вістря: біля гострого виступу лінії поля згущуються, напруженість різко зростає, і саме там починається пробій повітря. Явище лежить в основі роботи блискавкоприймача.

3. Провідники, діелектрики, ємність

У провідниках є вільні носії заряду, у діелектриках вони зв'язані. У провіднику, внесеному в поле, заряди перерозподіляються так, що поле всередині зникає — це електростатичний захист, на якому ґрунтується екранування чутливої апаратури.

Діелектрик у полі поляризується, і це послаблює поле всередині нього. Здатність системи провідників накопичувати заряд характеризується електроємністю. Конденсатор складається з двох провідників, розділених діелектриком, і запасає енергію електричного поля.

У будівельній практиці ємнісний ефект використовують вологоміри: діелектрична проникність води приблизно у двадцять разів більша за проникність сухих будівельних

матеріалів, тому за зміною ємності датчика визначають вологість стіни або стяжки, не руйнуючи конструкцію.

4. Атмосферна електрика та блискавкозахист

Під час грози в хмарі розділяються заряди, між хмарою і землею виникає напруженість поля, що сягає сотень кіловольтів на метр, і відбувається пробій — блискавка. Струм у каналі досягає десятків кілоампер, температура — десятків тисяч кельвінів.

Система блискавкозахисту складається з трьох частин: блискавкоприймача, що приймає розряд на себе, струмовідводу, що проводить струм до землі, і заземлювача, що розтікає його в ґрунті. Фізична основа роботи блискавкоприймача — саме ефект вістря: він створює найбільшу напруженість поля й задає точку, у якій відбудеться розряд.

Зона захисту одиночного стрижневого блискавкоприймача має форму конуса, і саме тому висота приймача визначає площу, яку він прикриває. Струмовідвід має бути якомога коротшим і прямішим: індуктивність провідника при такій швидкості наростання струму створює величезні перепади напруги, і крутий вигин може спричинити перекриття на конструкції будівлі.

Опір заземлювача нормується і визначається питомим опором ґрунту та розмірами електродів. Сухий пісок має питомий опір у сотні разів більший за вологий суглинок, тому та сама конструкція заземлювача в різних ґрунтах дає зовсім різний результат.

Ключові формули

- Закон Кулона: $F = k \cdot q_1 q_2 / (\epsilon r^2)$
- Напруженість поля: $E = F/q$
- Напруженість однорідного поля: $E = U/d$
- Робота поля: $A = qU$
- Електроємність: $C = q/U$
- Енергія конденсатора: $W = CU^2/2$

Питання для самоконтролю

1. Чому блискавка вражає саме стрижневий блискавкоприймач, а не сусідню ділянку покрівлі?
2. Чому струмовідвід не можна прокладати з крутими вигинами?
3. На якій фізичній властивості води ґрунтується робота ємнісного вологоміра для стін?

ЛЕКЦІЯ 12

ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ЗАКОН ОМА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

План лекції

1. Умови існування струму. Сила струму й напруга.
2. Закон Ома. Опір провідника. Питомий опір.
3. З'єднання провідників. ЕРС і закон Ома для повного кола.

4. Робота й потужність струму. Спад напруги в кабелі.

1. Електричний струм

Електричний струм — упорядкований рух заряджених частинок. Для його існування потрібні вільні носії заряду й електричне поле, тобто джерело, що підтримує різницю потенціалів.

Сила струму дорівнює заряду, який проходить через переріз провідника за одиницю часу, і вимірюється в амперах. Напруга характеризує роботу поля з перенесення заряду й вимірюється у вольтах.

2. Закон Ома й опір

Сила струму на ділянці кола прямо пропорційна напрузі й обернено пропорційна опору. Опір провідника пропорційний його довжині, обернено пропорційний площі перерізу і залежить від матеріалу через питомий опір.

Питомий опір міді приблизно 0,0175 ом-міліметра квадратного на метр, алюмінію — близько 0,028. Алюмінієвий провідник за того самого опору має бути приблизно в півтора рази більшого перерізу, і це прямо визначає вибір кабелю.

Опір металів зростає з температурою. Для будівельного майданчика це означає, що нагрітий перевантажений кабель має більший опір, більший спад напруги й більший нагрів — процес самопідсилюваний, і саме він призводить до пожеж у місцях поганого контакту.

3. З'єднання провідників і повне коло

При послідовному з'єднанні опори додаються, струм однаковий в усіх елементах, напруги розподіляються пропорційно опорам. При паралельному — додаються обернені величини, напруга однакова, струми розподіляються обернено пропорційно опорам.

Розетки й споживачі на майданчику вмикають паралельно, тому кожен отримує повну напругу, а загальний струм у живильній лінії дорівнює сумі струмів споживачів. Саме тому перевантаження лінії виникає при одночасному вмиканні кількох потужних інструментів.

Джерело характеризується електрорушійною силою і внутрішнім опором. Закон Ома для повного кола пояснює, чому напруга на затискачах генератора падає при зростанні струму, і чому при пуску потужного двигуна короткочасно тьмяніє освітлення на майданчику.

4. Потужність і спад напруги

Робота струму дорівнює добутку напруги, сили струму й часу, потужність — добутку напруги на силу струму. Закон Джоуля-Ленца визначає теплоту, що виділяється в провіднику: вона пропорційна квадрату сили струму, опору й часу.

Квадратична залежність принципова. Подвоєння струму вчетверо збільшує нагрівання, тому саме струм, а не потужність, є критерієм вибору перерізу кабелю й установки автоматичного вимикача.

Спад напруги в живильній лінії дорівнює добутку струму на опір кабелю, причому враховувати треба обидві жили, тобто подвійну довжину. При живленні зварювального апарата

або бетонозмішувача через довгий подовжувач малого перерізу спад напруги може сягати десятків вольтів. Наслідок — двигун не розвиває потрібного моменту, зростає струм, кабель гріється ще сильніше.

Нормативно спад напруги в лінії обмежують кількома відсотками від номінальної. Практичне правило зимового майданчика: чим довший подовжувач, тим більший переріз, а не навпаки.

Ключові формули

- Сила струму: $I = q/t$
- Закон Ома для ділянки кола: $I = U/R$
- Опір провідника: $R = \rho l/A$
- Послідовне з'єднання: $R = R_1 + R_2$, паралельне: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$
- Закон Ома для повного кола: $I = \varepsilon / (R + r)$
- Потужність струму: $P = UI = I^2R$
- Закон Джоуля-Ленца: $Q = I^2Rt$
- Спад напруги в лінії: $\Delta U = I \cdot \rho \cdot 2l / A$

Питання для самоконтролю

1. Обчисліть опір мідного кабелю перерізом $2,5 \text{ мм}^2$ завдовжки 50 м і спад напруги на ньому при струмі 16 А з урахуванням двох жил.
2. Чому переріз кабелю добирають за струмом, а не безпосередньо за потужністю споживача?
3. Чому поганий контакт у з'єднанні є типовою причиною пожежі, хоча струм у лінії не перевищує номінального?

ЛЕКЦІЯ 13

МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. ЕЛЕКТРОДВИГУН

План лекції

1. Магнітне поле струму. Індукція та магнітний потік.
2. Сила Ампера й сила Лоренца. Магнітні властивості речовин.
3. Електромагнітна індукція. Закон Фарадея, правило Ленца.
4. Електродвигун, генератор, вихрові струми в приладах контролю.

1. Магнітне поле струму

Навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле. Його силовою характеристикою є магнітна індукція, лінії поля замкнені й не мають початку та кінця. Напрямок ліній визначають за правилом свердлика.

Магнітний потік через контур дорівнює добутку індукції на площу й на косинус кута між нормаллю і напрямком поля. Соленоїд зі струмом створює поле, подібне до поля постійного магніту, і введення в нього феромагнітного осердя підсилює поле в сотні разів.

2. Сила Ампера, сила Лоренца, магнітні матеріали

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера, напрямок якої визначають за правилом лівої руки. На окремий рухомий заряд діє сила Лоренца. Саме сила Ампера створює обертальний момент у будь-якому електродвигуні.

За магнітними властивостями речовини поділяють на діамагнетики, парамагнетики й феромагнетики. Феромагнетики — залізо, нікель, кобальт та їх сплави — підсилюють поле в тисячі разів і зберігають намагніченість. Ця властивість є основою роботи вантажопідіймальних електромагнітів, магнітних утримувачів опалубки й магнітних основ свердлильних машин.

3. Електромагнітна індукція

При зміні магнітного потоку через контур у ньому виникає ЕРС індукції. Закон Фарадея стверджує, що вона пропорційна швидкості зміни потоку. Правило Ленца визначає напрямок індукційного струму: він завжди протидіє причині, що його породила.

Правило Ленца — не формальність, а прояв закону збереження енергії. Якби індукційний струм підсилював зміну потоку, система розганялася б сама, створюючи енергію з нічого.

Самоіндукція — виникнення ЕРС у самому контурі при зміні струму в ньому. Індуктивність характеризує цю властивість. Практичний наслідок — іскріння й дуга при розмиканні кола з котушкою, зокрема при відключенні електродвигуна або зварювального трансформатора. Саме тому комутаційні апарати розраховують на розривання індуктивного навантаження, а не просто на номінальний струм.

4. Двигун, генератор і вихрові струми

Генератор перетворює механічну енергію в електричну на основі явища індукції, двигун — навпаки, на основі дії сили Ампера. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором є основним приводом будівельних машин: розчинозмішувачів, бетононасосів, лебідок, вентиляторів, кранових механізмів.

Вихрові струми виникають у суцільних провідних тілах при зміні магнітного потоку. В осердях трансформаторів вони шкідливі й спричиняють нагрівання, тому осердя набирають з ізольованих пластин.

Але в приладах неруйнівного контролю вихрові струми корисні. Прилад для пошуку арматури й вимірювання товщини захисного шару бетону працює саме на зміні індуктивності котушки та на вихрових струмах, наведених у сталевому стрижні. Так само побудовані детектори металу й прихованої проводки. Знання фізичного принципу пояснює й обмеження приладу: він не бачить неметалеві комунікації й дає похибку при густому армуванні, коли поля сусідніх стрижнів накладаються.

Ключові формули

- Магнітний потік: $\Phi = BA \cos \alpha$
- Сила Ампера: $F = BIl \sin \alpha$
- Сила Лоренца: $F = qvB \sin \alpha$

- Закон електромагнітної індукції: $\varepsilon = -\Delta\Phi/\Delta t$
- ЕРС самоіндукції: $\varepsilon = -L \cdot \Delta I/\Delta t$

Питання для самоконтролю

1. Чому правило Ленца є наслідком закону збереження енергії?
2. Чому осердя трансформатора набирають з тонких ізольованих пластин, а не роблять суцільним?
3. На якому фізичному явищі працює прилад для визначення товщини захисного шару бетону і в яких випадках він дає похибку?

ЛЕКЦІЯ 14

ЗМІННИЙ СТРУМ. ТРАНСФОРМАТОР. ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА НА БУДМАЙДАНЧИКУ

План лекції

1. Змінний струм. Діючі значення. Види опору.
2. Трифазний струм. Асинхронний двигун.
3. Трансформатор і передавання електроенергії.
4. Дія струму на людину. Заземлення, занулення, ПЗВ.

1. Змінний струм

Змінний струм отримують обертанням рамки в магнітному полі. Промислова частота в Україні — 50 герц. Діючі значення сили струму й напруги менші за амплітудні приблизно в 1,41 раза: побутова напруга 230 вольтів є діючим значенням, амплітудне сягає близько 325 вольтів.

У колі змінного струму, крім активного опору, діють індуктивний і ємнісний. Індуктивний опір зростає з частотою, ємнісний — спадає. Повний опір кола визначається їх сукупністю, а між струмом і напругою виникає зсув фаз.

Звідси поняття коефіцієнта потужності. Двигуни й зварювальні трансформатори мають індуктивний характер навантаження, і за низького коефіцієнта потужності лінія передає більший струм при тій самій корисній потужності. Для будівельного майданчика це означає додаткове нагрівання кабелів і збільшений спад напруги.

2. Трифазна система й асинхронний двигун

Трифазна система складається з трьох ЕРС, зсунутих на третину періоду. Вона дозволяє передавати ту саму потужність меншою кількістю металу й, головне, створює обертове магнітне поле.

Саме обертове поле захоплює ротор асинхронного двигуна. Ротор обертається повільніше за поле — різниця називається ковзанням, і без неї індукція в роторі не виникала б. Пусковий струм асинхронного двигуна в п'ять-сім разів перевищує номінальний, що й пояснює просідання напруги на майданчику при пуску потужного механізму та необхідність узгодження уставок захисту з пусковим режимом.

3. Трансформатор

Трансформатор складається з двох обмоток на спільному осерді й працює лише на змінному струмі, бо його дія ґрунтується на взаємній індукції. Відношення напруг дорівнює відношенню чисел витків, а потужність у первинній та вторинній обмотках приблизно однакова, тому підвищення напруги супроводжується пропорційним зменшенням струму.

Це основа економічного передавання енергії. Втрати в лінії пропорційні квадрату струму, тому підвищення напруги у десять разів зменшує втрати у сто разів. ККД сучасних силових трансформаторів перевищує 98 відсотків.

На майданчику трансформатор виконує ще одну функцію — розділовальну й понижувальну. Для переносних світильників і ручного інструменту в приміщеннях з підвищеною небезпекою застосовують знижену напругу 42 або 12 вольтів саме тому, що ризик ураження визначається напругою дотику.

4. Електробезпека

Тяжкість ураження електричним струмом визначається насамперед силою струму, що пройшов через тіло, тривалістю дії, шляхом проходження, родом і частотою струму та станом людини. Струм близько 0,5-1,5 міліампера людина відчуває, близько 10-15 міліампер уже не може самостійно розтиснути руку, близько 100 міліампер за секунди спричиняє фібриляцію серця.

Опір тіла людини не є сталим. Суха неушкоджена шкіра має опір у десятки кілоомів, волога або пошкоджена — кілька сотень омів. Будівельний майданчик з його вологістю, металевими конструкціями й ґрунтовою основою належить до умов підвищеної небезпеки саме тому, що реальний опір у колі ураження мінімальний.

Крокова напруга виникає при розтіканні струму в ґрунті навколо місця замикання: потенціал спадає з відстанню, і між двома точками, на яких стоять ноги людини, з'являється різниця потенціалів. Тому із зони розтікання виходять дрібними кроками або стрибками.

Захисне заземлення з'єднує металеві частини обладнання із землею й знижує напругу дотику до безпечного значення. Занулення з'єднує їх з нульовим захисним провідником, перетворюючи замикання на корпус у коротке замикання, яке вимикає автомат. Пристрій захисного вимкнення реагує на різницю струмів у фазному й нульовому провідниках: щойно частина струму йде повз, тобто через людину або пошкоджену ізоляцію, ПЗВ вимикає коло за десятки мілісекунд. Уставка 30 міліампер для розеткових груп і 10 міліампер для особливо небезпечних умов обрана саме за порогом фібриляції.

Ключові формули

- Діюче значення: $I = I(\max) / \sqrt{2}$, $U = U(\max) / \sqrt{2}$
- Індуктивний опір: $X(L) = 2\pi fL$, ємнісний: $X(C) = 1 / (2\pi fC)$
- Активна потужність: $P = UI \cos \varphi$
- Коефіцієнт трансформації: $k = U_1/U_2 = N_1/N_2$
- Струм через тіло людини: $I = U / R(\text{тіла})$

Питання для самоконтролю

1. Трансформатор має 1200 витків первинної та 60 витків вторинної обмотки, напруга живлення 230 В. Визначте вторинну напругу й поясніть, для чого така схема потрібна на майданчику.
2. Чому підвищення напруги в лінії електропередачі зменшує втрати, хоча передана потужність не змінюється?
3. Поясніть принцип дії ПЗВ і чому його уставку для розеткових груп обрано саме 30 мА.

Модуль III завершено. Матеріал лекцій 11-18 входить до модульного контролю № 2.

МОДУЛЬ IV. КОЛИВАННЯ, ХВИЛІ, АКУСТИКА ТА ОПТИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 15

МЕХАНІЧНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС. ЗВУК. ОСНОВИ БУДІВЕЛЬНОЇ АКУСТИКИ

План лекції

1. Гармонічні коливання та їх характеристики.
2. Вільні, згасаючі й вимушені коливання. Резонанс.
3. Механічні хвилі. Звук і його характеристики.
4. Звукоізоляція огорожень. Вібрація на майданчику.

1. Гармонічні коливання

Коливання — рух, що повторюється в часі. Гармонічні коливання описують амплітудою, періодом, частотою та фазою. Період математичного маятника залежить від довжини, пружинного — від маси й жорсткості; в обох випадках від амплітуди він не залежить.

Будь-яка конструкція має власні частоти коливань, що визначаються її масою та жорсткістю. Для перекриття, прогонової будови мосту, щогли або димаря ці частоти можна обчислити, і вони є паспортною характеристикою конструкції не меншою мірою, ніж міцність.

2. Згасання й резонанс

Вільні коливання реальної системи згасають через тертя й внутрішні втрати. Вимушені коливання підтримуються зовнішньою періодичною силою і відбуваються з її частотою.

Резонанс настає, коли частота зовнішньої сили збігається з власною частотою системи: амплітуда різко зростає, обмежуючись лише згасанням. У будівельних конструкціях резонанс небезпечний і може призвести до руйнування за навантажень, значно менших за розрахункові статичні.

Класичні приклади — розгойдування пішохідного мосту від синхронного кроку, вібрація перекриття від обладнання, коливання гнучких щогл і димарів від вітрових вихорів. Методи боротьби впливають з фізики: змінити власну частоту конструкції, змінивши жорсткість або масу, відлаштувати частоту джерела, або збільшити згасання демпферами.

Зворотний бік резонансу — корисний. Робота вібратора для ущільнення бетонної суміші, віброрейки, вібраційного заглиблювача паль побудована саме на вимушених коливаннях, підібраних під характеристики середовища.

3. Хвилі та звук

Механічна хвиля — поширення коливань у пружному середовищі. У поздовжній хвилі частинки коливаються вздовж напрямку поширення, у поперечній — уперек. У газах і рідинах поширюються лише поздовжні хвилі, у твердих тілах — обидва типи.

Швидкість звуку в повітрі за нормальних умов близько 340 метрів за секунду, у воді близько 1500, у бетоні від 3500 до 4500, у сталі близько 5000. На вимірюванні швидкості ультразвуку в бетоні побудований ультразвуковий метод контролю міцності й виявлення дефектів: тріщина, порожнина або розшарування збільшують час проходження сигналу.

Звук характеризують частотою, яку ми сприймаємо як висоту, та інтенсивністю. Через величезний діапазон інтенсивностей застосовують логарифмічну шкалу — рівень звукового тиску в децибелах. Подвоєння інтенсивності дає приріст близько 3 децибел, а не подвоєння числа. Тому два однакові джерела шуму разом дають не вдвічі більший рівень, а лише на три децибели вищий.

4. Звукоізоляція та вібрація

Захист від повітряного шуму підпорядковується закону маси: чим важча й масивніша перегородка, чим менша її площа отворів і чим вища частота звуку, тим більша звукоізоляція. Подвоєння поверхневої густини огороження дає приблизно 6 децибел приросту.

Однак легкі багатошарові конструкції можуть перевершувати масивні: два тонкі листи з пружним зв'язком і заповненням волокнистим матеріалом працюють як система мас із пружиною, і на середніх частотах дають високу ізоляцію при малій вазі. Ключова умова — відсутність жорстких містків між шарами, бо будь-яке жорстке з'єднання передає коливання в обхід ізоляції.

Ударний шум — кроки, пересування меблів, робота інструменту — передається безпосередньо конструкцією. Протидія йому суто механічна: розірвати шлях передавання пружним шаром. Так працює плаваюча підлога, де стяжка відокремлена від плити перекриття й від стін пружним прошарком.

Вібрація від будівельних машин, ущільнювачів і транспорту передається ґрунтом на сусідні будівлі. Її нормують за віброшвидкістю й віброприскоренням, а захист забезпечують віброізолювальними опорами, траншеями-екранами та обмеженням режимів роботи в часі. Фізично всі ці заходи роблять одне й те саме — вносять у шлях передавання ділянку з різким перепадом жорсткості.

Ключові формули

- Період і частота: $T = 1/f$
- Період математичного маятника: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$
- Період пружинного маятника: $T = 2\pi\sqrt{m/k}$
- Довжина хвилі: $\lambda = v/f = vT$
- Рівень звукового тиску: $L = 20 \lg(p / p_0)$, дБ
- Додавання двох однакових джерел: приріст 3 дБ

Питання для самоконтролю

1. Чому резонанс небезпечний для конструкції навіть при малій амплітуді збурювальної сили?
2. Два однакові компресори працюють поруч, кожен створює 85 дБ. Який сумарний рівень і чому не 170 дБ?

3. Чому жорсткий місток між шарами звукоізолювальної перегородки зводить нанівець її ефективність?

ЛЕКЦІЯ 16

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ОПТИКА І СВІЛОТЕХНІКА

План лекції

1. Електромагнітне поле й хвилі. Шкала випромінювань.
2. Теплове випромінювання. Основи тепловізійного обстеження.
3. Закони геометричної оптики. Хвильові та квантові властивості світла.
4. Світлотехнічні величини. Природне й штучне освітлення.

1. Електромагнітні хвилі

Змінне електричне поле породжує магнітне, а змінне магнітне — електричне. Так утворюється електромагнітна хвиля, здатна поширюватися у вакуумі зі швидкістю близько 300 тисяч кілометрів за секунду.

Шкала електромагнітних хвиль охоплює радіохвилі, інфрачервоне випромінювання, видиме світло, ультрафіолет, рентгенівське й гамма-випромінювання. Усі вони мають однакову природу й відрізняються лише частотою, а отже й енергією кванта. Саме тому радіохвиля нешкідлива, а гамма-квант іонізує речовину.

2. Теплове випромінювання й тепловізор

Будь-яке тіло з температурою вище абсолютного нуля випромінює електромагнітні хвилі. Потужність випромінювання пропорційна четвертому степеню абсолютної температури — закон Стефана-Больцмана. Зі зростанням температури максимум випромінювання зміщується до коротших хвиль: тіло спершу лише гріє, потім починає світитися червоним, далі білим.

Реальні тіла випромінюють слабше за ідеальне чорне тіло, і міру цього задає ступінь чорноти поверхні. Для більшості будівельних матеріалів він високий, близько 0,9, а для полірованого металу низький — близько 0,05. Через це блискуча металева поверхня на термограмі виглядає холодною, навіть якщо вона гаряча, і оператор тепловізора мусить це враховувати.

Тепловізійне обстеження будівлі фіксує розподіл температури зовнішньої поверхні огорожень. Ділянки з підвищеною температурою вказують на посилений тепловий потік — мостки холоду, дефекти утеплення, протікання в теплотрасі. Обстеження проводять за достатнього перепаду температур усередині й назовні, за відсутності прямого сонця й опадів — інакше зображення відображає не теплові втрати, а прогрівання поверхні сонцем.

Низькоемісійне покриття скла працює на цій самій фізиці: тонкий шар з низьким ступенем чорноти відбиває інфрачервоне випромінювання назад у приміщення, майже не зменшуючи пропускання видимого світла.

3. Оптика

Закони відбивання й заломлення описують поведінку світла на межі середовищ. Показник заломлення характеризує зменшення швидкості світла в середовищі. Явище повного внутрішнього відбивання лежить в основі світловодів.

Лінзи будують зображення за правилами, що випливають з формули тонкої лінзи. Інтерференція, дифракція й поляризація підтверджують хвильову природу світла; фотоефект і тиск світла — квантову. Корпускулярно-хвильовий дуалізм означає, що світло не є ні хвилею, ні потоком частинок у звичному сенсі, а має властивості обох моделей залежно від умов дослідів.

Поляризаційні явища мають і практичне застосування в лабораторії будівельних матеріалів: поляризаційний мікроскоп дозволяє розрізняти мінерали заповнювача й продукти гідратації цементу за оптичними властивостями.

4. Світлотехніка

Основні світлотехнічні величини: світловий потік у люменах, сила світла в канделах, освітленість у люксах, яскравість. Освітленість спадає обернено пропорційно квадрату відстані від точкового джерела й залежить від кута падіння.

Нормована освітленість робочих поверхонь залежить від точності зорової роботи. Для загального освітлення приміщень загального призначення нормують десятки й сотні люксів, для точних робіт — значно більше. На будівельному майданчику нормується освітленість зон виконання робіт, проходів і місць складування.

Природне освітлення оцінюють коефіцієнтом природної освітленості — відношенням освітленості в точці приміщення до одночасної освітленості під відкритим небом, у відсотках. Він не залежить від погоди й тому придатний як нормативна характеристика. Саме КПО визначає мінімальну площу світлових прорізів при проектуванні.

Світлова віддача джерела — відношення світлового потоку до споживаної потужності. Лампа розжарювання дає близько 10-15 люменів на ват, люмінесцентна — 60-90, світлодіодна — понад 100. Окрім віддачі, для комфорту важливі індекс кольоропередачі та колірна температура; для приміщень тривалого перебування холодне різке світло є несприятливим.

Ключові формули

- Швидкість хвилі: $c = \lambda f$
- Закон Стефана-Больцмана: $P = \epsilon \sigma T^4 A$
- Показник заломлення: $n = c/v$
- Формула тонкої лінзи: $1/F = 1/d + 1/f$
- Освітленість: $E = \Phi/A$
- Освітленість від точкового джерела: $E = I \cos \alpha / r^2$
- Коефіцієнт природної освітленості: $\text{КПО} = (E(\text{вн}) / E(\text{зовн})) \cdot 100 \%$

Питання для самоконтролю

1. Чому блискуча металева поверхня на термограмі виглядає холоднішою за сусідню поштукатурену, навіть маючи ту саму температуру?
2. Світильник силою світла 1000 кд висить на висоті 3 м. Яка освітленість безпосередньо під ним?
3. Чому коефіцієнт природної освітленості, а не абсолютна освітленість, узятий за нормативну характеристику природного світла?

МОДУЛЬ V. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 17

БУДОВА АТОМА. СПЕКТРИ. РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

План лекції

1. Досліди Резерфорда. Ядерна модель атома.
2. Постулати Бора. Енергетичні рівні.
3. Спектри й спектральний аналіз.
4. Рентгенівське випромінювання та дослідження матеріалів.

1. Ядерна модель атома

Досліди Резерфорда з розсіювання альфа-частинок на золотій фользі показали, що практично вся маса атома зосереджена в надзвичайно малому позитивно зарядженому ядрі, а електрони займають простір, у десятки тисяч разів більший за розміри ядра. Атом виявився майже порожнім.

Планетарна модель суперечила класичній електродинаміці: електрон, що рухається з прискоренням, мав би випромінювати енергію й упасти на ядро. Розв'язання прийшло з квантовою теорією.

2. Постулати Бора

Атом може перебувати лише в певних стаціонарних станах з дискретними значеннями енергії, і в цих станах не випромінює. Випромінювання або поглинання відбувається при переході з одного рівня на інший, а енергія кванта дорівнює різниці енергій рівнів.

Саме дискретність рівнів пояснює, чому спектри атомів лінійчасті, а не суцільні. Кожен хімічний елемент має свій неповторний набір рівнів, а отже — свій спектр.

3. Спектри й спектральний аналіз

Спектр випускання дають розжарені гази, спектр поглинання утворюється, коли світло проходить крізь холодний газ. Суцільний спектр характерний для розжарених твердих тіл і рідин.

Спектральний аналіз дозволяє визначити хімічний склад речовини за її спектром — швидко, точно й для дуже малих кількостей. У будівельній лабораторії спектральні методи застосовують для визначення складу металів і сплавів, контролю домішок у цементі та заповнювачах, дослідження причин корозії.

4. Рентгенівське випромінювання

Рентгенівське випромінювання виникає при гальмуванні швидких електронів на аноді рентгенівської трубки, а також при переходах електронів на внутрішні оболонки атома. Воно має високу проникну здатність, яка тим більша, чим менша густина й атомний номер речовини.

У будівництві та суміжних галузях рентгенівські методи застосовують у двох напрямках. Перший — рентгеноструктурний і рентгенофазовий аналіз: за дифракцією променів на кристалічній ґратці визначають фазовий склад цементного каменю, ступінь гідратації, наявність новоутворень. Другий — радіографічний контроль зварних швів металевих конструкцій, де дефект, порожнина чи непровар дають на плівці ділянку підвищеного почорніння.

Рентгенівське випромінювання іонізує речовину, тому роботи з ним належать до радіаційно небезпечних і потребують захисту часом, відстанню та екрануванням. Просвічування швів на об'єкті виконують з огороженням зони й видаленням персоналу.

Ключові формули

- Енергія кванта: $E = h\nu$
- Умова переходу між рівнями: $h\nu = E(n) - E(m)$
- Зв'язок енергії й довжини хвилі: $E = hc/\lambda$

Питання для самоконтролю

1. Чому спектр атома лінійчастий, а спектр розжареної сталі суцільний?
2. Яку інформацію про цементний камінь дає рентгенофазовий аналіз і чому саме рентгенівське випромінювання для цього придатне?
3. Чому радіографічний контроль зварних швів виконують з видаленням персоналу із зони, хоча тривалість просвічування мала?

ЛЕКЦІЯ 18

ФІЗИКА АТОМНОГО ЯДРА. РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА В БУДІВНИЦТВІ

План лекції

1. Склад ядра. Ядерні сили та енергія зв'язку.
2. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.
3. Дози опромінення та їх вимірювання.
4. Природна радіоактивність будівельних матеріалів. Радон і захист від нього.

1. Будова ядра

Ядро складається з протонів і нейтронів, які утримуються разом ядерними силами — найсильнішою з відомих взаємодій, що діє лише на відстанях порядку розмірів ядра. Енергія зв'язку ядра дорівнює енергії, потрібній для повного його розщеплення на нуклони.

Питома енергія зв'язку максимальна для ядер середньої маси. Тому енергія вивільняється і при поділі важких ядер, і при синтезі легких — обидва процеси ведуть до утворення ядер з більшою питомою енергією зв'язку.

2. Радіоактивність і закон розпаду

Радіоактивність — самочинне перетворення нестійких ядер з випромінюванням частинок. Альфа-випромінювання — потік ядер гелію, має велику іонізуючу й малу проникну здатність,

затримується аркушем паперу. Бета-випромінювання — потік електронів або позитронів, проникає крізь кілька міліметрів алюмінію. Гамма-випромінювання — електромагнітне, найпроникніше, послаблюється шаром свинцю або бетону.

Закон радіоактивного розпаду має експоненційний характер і описується періодом напіврозпаду — часом, за який розпадається половина наявних ядер. Активність джерела вимірюється в бекерелях і дорівнює кількості розпадів за секунду.

Важливо розуміти статистичну природу закону: передбачити момент розпаду конкретного ядра неможливо, закон описує поведінку великої їх сукупності.

3. Дози опромінення

Поглинута доза — енергія випромінювання, поглинута одиницею маси, вимірюється в греях. Еквівалентна доза враховує різну біологічну дію видів випромінювання через коефіцієнт якості й вимірюється в зівертах. Для порівняння: альфа-випромінювання має коефіцієнт якості 20, гамма- і бета- — одиницю.

Звідси парадокс, який варто запам'ятати: альфа-випромінювання майже нешкідливе ззовні, бо не проходить крізь роговий шар шкіри, але найнебезпечніше при потраплянні всередину організму з повітрям або пилом, де вся його енергія виділяється в тканині.

Середня річна ефективна доза від природних джерел становить приблизно кілька мілізівертів, причому значну частку дає саме радон у приміщеннях. Три принципи захисту незмінні: захист часом, відстанню та екрануванням.

4. Радіоактивність будівельних матеріалів і радон

Усі природні матеріали містять природні радіонукліди — радій, торій, калій. Нормативи встановлюють питому ефективну активність цих радіонуклідів і за нею поділяють матеріали на класи. Матеріали першого класу придатні для всіх видів будівництва, наступних — для дорожнього будівництва в межах населених пунктів або поза ними.

Цей показник контролюють для щебеню, піску, цементу, цегли, бетону, особливо для матеріалів, виготовлених із промислових відходів — золи, шлаків, фосфогіпсу. Саме тому радіологічний висновок входить до супровідної документації на будівельні матеріали, і перевіряти його — не бюрократична процедура, а елемент забезпечення безпеки майбутніх мешканців.

Радон — радіоактивний інертний газ, продукт розпаду радію. Він виділяється з ґрунту й будівельних матеріалів, і, будучи у сім з половиною разів важчим за повітря, накопичується в підвалах, цокольних і перших поверхах. При вдиханні продукти його розпаду осідають у легенях, і саме альфа-випромінювання спричиняє основну дозу.

Захист від радону будується на трьох напрямках. Перший — відсікання надходження: суцільна бетонна підлога по ґрунту, герметизація вводів комунікацій, протирадонова мембрана. Другий — видалення газу з-під будівлі: підпідлоговий дренажний шар з витяжним стояком, радонова витяжка. Третій — вентиляція приміщень, яка знижує концентрацію розбавленням. Для

більшості будівель саме постійна припливно-витяжна вентиляція нижніх поверхів є найпростішим і найдієвішим заходом.

Загальний висновок курсу: фізика в будівництві не є довідковим додатком до нормативів. Норми на теплоізоляцію, звукоізоляцію, освітленість, радіаційну безпеку й міцність конструкцій — це фізичні закони, доведені до числа й оформлені як вимога. Фахівець, який розуміє, який саме закон стоїть за нормою, здатний ухвалити правильне рішення й тоді, коли готової норми на його випадок немає.

Ключові формули

- Закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{(-t/T)}$
- Активність: $A = \lambda N$, вимірюється в бекерелях
- Поглинута доза: $D = E/m$, вимірюється в греях
- Еквівалентна доза: $H = D \cdot k$, вимірюється в зівертах
- Захист відстанню: $I \sim 1/r^2$

Питання для самоконтролю

1. Чому енергія вивільняється і при поділі важких ядер, і при синтезі легких?
2. Період напіврозпаду радону-222 становить приблизно 3,8 доби. Яка частка ядер залишиться через 11,4 доби?
3. Чому радон накопичується саме в підвалах і на перших поверхах, і які три групи заходів застосовують для захисту?

МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 2 проводиться після завершення модуля V і охоплює матеріал лекцій 11-18.