



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

21 лекція, 42 години. П'ять змістових модулів

Дисципліна: Фізика (ОК6)

Галузь знань: G — Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальність: G4 — Енерговиробництво, спеціалізація G4.02 — Теплоенергетика

Освітньо-професійна програма: «Експлуатація теплотехнічного і теплотехнологічного устаткування і систем теплопостачання»

Освітньо-професійний ступінь: фаховий молодший бакалавр

ПЕРЕДМОВА

Конспект розроблено як основне навчальне джерело з дисципліни «Фізика» для здобувачів спеціальності G4 — Енерговиробництво відповідно до п. 1.8 освітньо-професійної програми, який передбачає використання власних навчально-методичних розробок педагогічних працівників.

Його призначення — не переказати підручник загальної фізики, а відібрати з нього те, що безпосередньо працює у виробництві, транспортуванні, обліку та споживанні теплової енергії, і подати у зв'язці з обладнанням, з яким ви матимете справу.

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.

Кожна лекція побудована однаково: план, теоретичний виклад із виходом на конкретне застосування, 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	Лекцій	Практ.	СР	Годин
I	Механіка та основи гідростатики	10	8	12	30
II	Молекулярна фізика і термодинаміка	14	10	16	40
III	Електрика і магнетизм	10	6	12	28
IV	Коливання, хвилі та оптика	4	4	5	13
V	Атомна та ядерна фізика	4	2	3	9
	РАЗОМ	42	30	48	120

Модульний контроль № 1 охоплює модулі I–II, модульний контроль № 2 — модулі III–V.

МОДУЛЬ I. МЕХАНІКА ТА ОСНОВИ ГІДРОСТАТИКИ

5 лекцій, 10 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.
4. Похибки вимірювань та обробка результатів.

1. Предмет фізики та її місце в підготовці теплоенергетика

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 ідеального газу чудово працює для повітря в котельні й зовсім не працює для насиченої водяної пари. Класична механіка точна для насоса й безпорадна для електрона в атомі. Фахівець відрізняється від дилетанта саме тим, що знає межі моделі, якою користується.

Теплоенергетика має справу з перетворенням енергії: хімічна енергія палива переходить у внутрішню енергію продуктів згоряння, далі в теплоту робочого тіла, далі в механічну роботу або в теплоту, доставлену споживачеві. На кожному переході діють фізичні закони, які не можна обійти. Оператор, який знає лише інструкцію, здатний вести режим; фахівець, який розуміє фізику, здатний пояснити відхилення й знайти його причину.

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, енергія), 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.

У теплоенергетиці широко вживаються позасистемні одиниці: бар, атмосфера, кілокалорія, кіловат-година, кінська сила. Користуватися ними допустимо, але у формули підставляють величини в СІ. Змішування систем дає помилку, яку важко виявити, бо результат виглядає правдоподібно.

Перевірка розмірності — найпростіший і найнадійніший спосіб самоконтролю. Якщо в задачі на потужність у відповіді вийшли джоулі, помилку треба шукати не в арифметиці, а у формулі.

3. Прямі та непрямі вимірювання

Пряме вимірювання — зчитування величини безпосередньо зі шкали приладу: температури з термометра, тиску з манометра, струму з амперметра.

Непряме вимірювання — обчислення шуканої величини за формулою через інші, виміряні прямо. Витрату теплоносія рідко міряють безпосередньо: її обчислюють за перепадом тиску на звужувальному пристрої або за часом проходження ультразвукового сигналу. Теплову потужність обчислюють за витратою і різницею температур.

Практично всі величини, з якими працює теплоенергетик, вимірюються непрямо. Тому розуміння того, як накопичуються похибки окремих вимірювань, є професійною необхідністю, а не академічною вправою.

4. Похибки вимірювань

Абсолютна похибка — модуль різниці між вимірним 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 кілограм при зважуванні вагона несуттєва, а при дозуванні реагенту для водопідготовки неприпустима.

Систематична похибка повторюється й зміщує результат в один бік. Її причини — неправильне градування приладу, неврахований опір з'єднувальних проводів, неврахована температура холодного спаю термопар. Багаторазове повторення вимірювання її не усуває, і в цьому головна підступність.

Випадкова похибка змінює знак і величину від досліду до досліду. Її зменшують повторенням вимірювань та усередненням.

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 бар» некоректний; правильно «6,3 ± 0,2 бар». Зайві цифри в записі не додають точності, а лише вводять в оману.

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 : $\varepsilon = n \cdot \varepsilon_1$

Питання для самоконтролю

1. Чому вимірювання витрати теплоносія майже завжди є непрямим?
2. Манометр класу 1,0 з межею 25 бар показує 4 бари. Обчисліть абсолютну та відносну похибку. Чи вдало дібрано прилад?
3. Чому багаторазове повторення вимірювання не усуває систематичну похибку?

ЛЕКЦІЯ 2

КІНЕМАТИКА ТА ДИНАМІКА. ЗАКОНИ НЬЮТОНА. СИЛИ В МЕХАНІЦІ

План лекції

1. Механічний рух. Кінематичні характеристики.
2. Рух по колу. Кутові величини.
3. Закони Ньютона.
4. Сили в механіці. Тертя та його роль в обладнанні.

1. Кінематика поступального руху

Механічний рух — зміна положення тіла в просторі з часом відносно обраної системи відліку. Основні характеристики: переміщення, швидкість, прискорення.

Рівномірний прямолінійний рух відбувається зі сталою швидкістю, рівноприскорений — зі сталим прискоренням. Графіки залежностей дозволяють читати рух без обчислень: площа під графіком швидкості дає шлях, нахил графіка швидкості дає прискорення.

2. Рух по колу

Практично все динамічне обладнання теплоенергетики обертається: насоси, вентилятори, димососи, турбіни, електродвигуни. Для опису обертання зручніші кутові величини — кутова швидкість, період, частота.

Кутова швидкість пов'язана з частотою обертання співвідношенням $\omega = 2\pi n$. У паспортах обладнання частоту вказують в обертах за хвилину, тому перед підстановкою її ділять на 60. Пропуск цього кроку дає помилку в шістдесят разів і є однією з найчастіших на практичних заняттях.

Лінійна швидкість точки на відстані R від осі дорівнює ωR . Периферія робочого колеса рухається значно швидше за центр, і саме там виникають найбільші навантаження.

Доцентрове прискорення спрямоване до центра обертання і дорівнює $\omega^2 R$. Йому відповідає відцентрова сила, пропорційна квадрату кутової швидкості. Подвоєння частоти обертання збільшує цю силу вчетверо — саме тому вимоги до балансування роторів так різко зростають із обертами.

3. Закони Ньютона

Перший закон визначає інерціальні системи відліку: тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки на нього не діють інші тіла. Інертність тіла характеризується масою.

Другий закон пов'язує прискорення з силою і масою. Це основне рівняння динаміки, придатне для розв'язання переважної більшості практичних задач.

Третій закон описує рівність дії та протидії. Сили завжди виникають парами, прикладені до різних тіл і тому не врівноважують одна одну.

4. Сили в механіці

Сила тяжіння діє на всі тіла поблизу поверхні Землі. Вага тіла — це сила, з якою тіло діє на опору або підвіс; вона дорівнює силі тяжіння лише в стані спокою або рівномірного руху.

Сила пружності виникає при деформації й описується законом Гука. Докладно деформації розглядаються в лекції 5.

Сила тертя для теплоенергетики особливо важлива. Вона завжди перетворює механічну енергію на теплоту й тому зменшує ККД будь-якого механізму. Розрізняють тертя спокою,

ковзання і кочення; останнє значно менше, через що в опорах валів застосовують підшипники кочення.

Мащення замінює сухе тертя в'язким тертям шару масла й зменшує його в рази. Саме тому втрата мащення в підшипнику насоса призводить не просто до зростання споживаної потужності, а до лавиноподібного нагрівання: більше тертя — більше теплоти — гірші властивості масла — ще більше тертя. Процес самопідсилюється і закінчується заклинюванням.

При аналізі руху зв'язаних тіл кожне тіло розглядають окремо, записують для нього другий закон Ньютона і розв'язують систему рівнянь. Це стандартний алгоритм, який працює і для вантажу на блоці, і для системи «двигун — муфта — насос».

Ключові формули

- Швидкість: $v = s/t$; прискорення: $a = \Delta v/t$
- Кутова швидкість: $\omega = 2\pi n = \pi N/30$, де N — оберти за хвилину
- Лінійна швидкість точки: $v = \omega R$
- Доцентрове прискорення: $a_c = \omega^2 R = v^2/R$
- Другий закон Ньютона: $F = m \cdot a$
- Сила тертя: $F_{тр} = \mu \cdot N$

Питання для самоконтролю

1. Насос має частоту обертання 2900 об/хв і діаметр робочого колеса 200 мм. Яка лінійна швидкість на периферії колеса?
2. У скільки разів зросте відцентрова сила від залишкового дисбалансу при переході з 1450 на 2900 об/хв?
3. Чому втрата мащення в підшипнику призводить до лавиноподібного нагрівання, а не до поступового?

ЛЕКЦІЯ 3

ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ ТА ЕНЕРГІЇ. РОБОТА, ПОТУЖНІСТЬ, ККД

План лекції

1. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу.
2. Робота сили. Потужність.
3. Кінетична та потенціальна енергія. Закон збереження енергії.
4. ККД машин і механізмів. Ланцюг перетворень.

1. Закон збереження імпульсу

Імпульс тіла дорівнює добутку маси на швидкість. У замкненій системі сумарний імпульс залишається сталим незалежно від характеру взаємодії між тілами.

Розрізняють пружний удар, при якому механічна енергія зберігається, і непружний, при якому частина її переходить у внутрішню енергію тіл. Забивання деталі, осадка заклепки, зупинка потоку в трубопроводі — приклади непружної взаємодії.

Найважливіший для теплоенергетики прояв — гідравлічний удар. Рухома маса води при різкому закритті засувки не може зупинитися миттєво, і її імпульс перетворюється на різкий стрибок тиску, здатний зруйнувати трубопровід. Саме тому арматуру на магістралях закривають повільно, а на відповідальних ділянках встановлюють запобіжні пристрої. Докладніше явище розглядається в лекції 18.

2. Робота і потужність

Робота сили дорівнює добутку сили на переміщення в напрямку її дії. Сила, перпендикулярна до переміщення, роботи не виконує. Одиниця роботи — джоуль.

Потужність — робота за одиницю часу, вимірюється у ватах. У теплоенергетиці потужність визначає, чи впорається установка із завданням у даний момент, а енергія — витрату палива за період.

Плутати ці поняття не можна. Котел потужністю 100 кВт за добу безперервної роботи виробить 2400 кВт·год теплової енергії. Потужність — це темп, енергія — накопичений результат.

3. Енергія та закон її збереження

Кінетична енергія пов'язана з рухом, потенціальна — з положенням тіла в силовому полі або з деформацією. Повна механічна енергія є їх сумою.

Закон збереження і перетворення енергії стверджує: енергія не виникає з нічого і не зникає безслідно, вона лише переходить з однієї форми в іншу. Це універсальний закон без жодного відомого винятку. Будь-який проєкт, що обіцяє отримати енергії більше, ніж витрачено, суперечить йому і є або помилковим, або шахрайським.

У насосній установці ланцюжок перетворень такий: електрична енергія мережі — механічна енергія на валу двигуна — механічна енергія на валу насоса — енергія потоку рідини, що складається з енергії тиску, кінетичної та потенціальної складових. На кожному переході частина енергії розсіюється у вигляді теплоти.

4. Коефіцієнт корисної дії

ККД — відношення корисної енергії або роботи до всієї витраченої. Величина безрозмірна, завжди менша за одиницю.

Ключове правило, яке порушують найчастіше: ККД послідовно з'єднаних елементів перемножуються, а не додаються і не усереднюються. Двигун із ККД 0,9 і насос із ККД 0,8 дають разом 0,72, а не 0,85.

Звідси впливає стратегія підвищення ефективності системи: шукати треба найслабшу ланку. Покращення елемента з ККД 0,95 до 0,97 майже нічого не дасть, якщо в ланцюзі є ланка з ККД 0,6. Це стосується і системи «котел — тепла мережа — споживач»: чудовий котел не врятує розбиту теплотрасу.

Корисна потужність насоса дорівнює добутку густини рідини, прискорення вільного падіння, напору і об'ємної витрати. Споживану з мережі потужність отримують діленням корисної на добуток ККД усіх ланок.

Ключові формули

- Імпульс: $p = m \cdot v$; закон збереження: $\Sigma p = \text{const}$
- Робота: $A = F \cdot s \cdot \cos \alpha$; потужність: $P = A/t$

- Кінетична енергія: $W_k = m \cdot v^2 / 2$
- Потенціальна енергія: $W_p = m \cdot g \cdot h$
- ККД: $\eta = A_{\text{кор}} / A_{\text{вitr}}$
- ККД ланцюга: $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$
- Корисна потужність насоса: $P_{\text{кор}} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$

Питання для самоконтролю

1. Насос подає 30 м³/год води на висоту 20 м. Яка його корисна потужність?
2. Чому загальний ККД ланцюга завжди нижчий за найгірший із проміжних?
3. Чому засувки на магістральних трубопроводах закривають повільно?

ЛЕКЦІЯ 4

ТИСК. ОСНОВИ ГІДРОСТАТИКИ ТА ГІДРОДИНАМІКИ. РІВНЯННЯ НЕРОЗРИВНОСТІ

План лекції

1. Тиск. Види тиску та прилади для його вимірювання.
2. Закон Паскаля. Гідростатичний тиск. Закон Архімеда.
3. Рівняння нерозривності та рівняння Бернуллі.
4. В'язкість. Режими течії. Втрати напору.

1. Тиск і його вимірювання

Тиск дорівнює відношенню сили, що діє перпендикулярно до поверхні, до площі цієї поверхні. Одиниця в СІ — паскаль. Це дуже мала одиниця, тому на практиці користуються кілопаскалями, мегапаскалями і барами.

Розрізняють три види тиску, і плутанина між ними — джерело постійних помилок. Абсолютний тиск відлічують від нуля, тобто від вакууму. Надлишковий — від атмосферного. Вакуумметричний показує, наскільки тиск нижчий за атмосферний.

Манометр показує надлишковий тиск: при атмосферному його стрілка стоїть на нулі. У формули термодинаміки, зокрема в рівняння стану газу, підставляють абсолютний тиск, тобто до показів манометра додають приблизно 0,1 МПа. У практичних розрахунках котельні цей крок обов'язковий.

2. Гідростатика

Закон Паскаля: тиск, створений зовнішньою силою на рідину або газ у замкненій посудині, передається в усі точки без зміни. На цьому ґрунтується робота гідравлічних домкратів, приводів запірної арматури та гідравлічних випробувань трубопроводів.

Незалежно від нього діє гідростатичний тиск, створений вагою стовпа рідини. Стовп води висотою 10 метрів створює приблизно 0,1 МПа, тобто одну атмосферу — зручне співвідношення для швидких оцінок. Саме воно визначає, чому в багатоповерховому будинку тиск на першому поверсі значно вищий, ніж на верхньому, і чому вимоги до міцності обладнання нижніх поверхів жорсткіші.

У сполучених посудинах однорідна рідина встановлюється на одному рівні незалежно від форми посудин. Це принцип роботи водомірного скла котла та розширювальних баків.

Закон Архімеда визначає виштовхувальну силу, що дорівнює вазі витісненої рідини. У теплотехніці він пояснює природну конвекцію: нагрітий шар рідини має меншу густину і виштовхується вгору холоднішим.

3. Рівняння нерозривності та Бернуллі

Рівняння нерозривності випливає із закону збереження маси: через будь-який переріз труби за одиницю часу проходить однакова маса рідини. Для нестисливої рідини добуток швидкості на площу перерізу сталий, тому у звуженій ділянці швидкість зростає обернено пропорційно площі.

Рівняння Бернуллі є формою закону збереження енергії для потоку: сума статичного тиску, динамічного напору і гідростатичного тиску вздовж лінії течії залишається сталою. Кожен член має розмірність тиску і зміст енергії одиниці об'єму.

Практичний наслідок: там, де швидкість зростає, статичний тиск падає. На цьому працюють витратоміри зі звужувальними пристроями, ежектори й пальникові пристрої. Вимірявши перепад тиску на діафрагмі, обчислюють витрату теплоносія.

Застереження принципової ваги: рівняння записане для ідеальної рідини без тертя. У реальному трубопроводі частина напору незворотно втрачається, тому в інженерні розрахунки додають член втрат. Без нього результат буде оптимістично невірним.

4. В'язкість, режими течії та втрати напору

В'язкість — внутрішнє тертя в рідині, опір шарів взаємному зсуву. Саме вона є причиною втрат напору. В'язкість води суттєво падає з нагріванням, тому гаряча вода тече легше за холодну.

Число Рейнольдса — безрозмірний критерій, що визначає режим течії як відношення сил інерції до сил в'язкості. При малих значеннях течія ламінарна, шари рухаються паралельно; при великих — турбулентна, з інтенсивним перемішуванням. У теплових мережах течія практично завжди турбулентна, і це добре: турбулентність різко поліпшує тепловіддачу.

Втрати напору складаються з двох частин. Втрати по довжині на тертя описуються формулою Дарсі — Вейсбаха: вони пропорційні довжині, квадрату швидкості й обернено пропорційні діаметру. Місцеві втрати виникають на поворотах, засувках, трійниках і звуженнях та обчислюються через коефіцієнти місцевого опору.

Практично найважливіший наслідок: заростання труби відкладеннями зменшує діаметр, а залежність опору від діаметра дуже сильна. Зменшення внутрішнього діаметра на п'яту частину може збільшити втрати напору в кілька разів. Це і є фізичне обґрунтування необхідності водопідготовки, а не просто вимога регламенту.

Важливо розрізняти оборотне й необоротне падіння тиску. На звуженні тиск падає оборотно: за розширенням швидкість спадає й тиск частково відновлюється. Втрати на тертя необоротні: у горизонтальній трубі сталого діаметра швидкість не змінюється, але тиск однаково спадає вздовж довжини. Саме ці втрати компенсує напір насоса.

Ключові формули

- Тиск: $p = F/S$; гідростатичний: $p = \rho \cdot g \cdot h$
- Абсолютний тиск: $p_{\text{абс}} = p_{\text{надл}} + p_{\text{атм}} \approx p_{\text{надл}} + 0,1 \text{ МПа}$
- Закон Архімеда: $F_A = \rho \cdot g \cdot V$
- Рівняння нерозривності: $v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$; витрата $Q = v \cdot S$

- Рівняння Бернуллі: $p + \rho v^2/2 + \rho gh = \text{const}$
- Число Рейнольдса: $Re = v \cdot d \cdot \rho / \mu$
- Втрати на тертя: $\Delta p = \lambda \cdot (l/d) \cdot \rho v^2/2$

Питання для самоконтролю

1. Манометр на котлі показує 0,6 МПа. Який абсолютний тиск у котлі?
2. Вода тече трубою діаметром 100 мм зі швидкістю 1,2 м/с. Яка швидкість на ділянці діаметром 60 мм і яка об'ємна витрата?
3. Чому падіння тиску на звуженні не є втратою енергії, а падіння тиску на тертя — є?

ЛЕКЦІЯ 5

МЕХАНІКА ДЕФОРМІВНОГО ТІЛА. НАПРУЖЕННЯ, ЗАКОН ГУКА, ГРАНИЦЯ МІЦНОСТІ

План лекції

1. Види деформацій твердого тіла.
2. Механічне напруження та відносна деформація.
3. Закон Гука. Модуль Юнга.
4. Діаграма розтягу. Запас міцності. Напруження в стінці трубопроводу.

1. Види деформацій

Деформація — зміна форми або розмірів тіла під дією сил. Розрізняють розтяг, стиск, зсув, згин і кручення. У реальних конструкціях вони зазвичай поєднуються.

Для теплоенергетики кожен вид має конкретний прояв. Розтяг — стінка трубопроводу під внутрішнім тиском і анкерні болти. Стиск — опори й фундаменти обладнання. Зсув — заклепкові й болтові з'єднання. Згин — трубопровід між опорами під власною вагою. Кручення — вал насоса, що передає момент від двигуна.

Деформація пружна, якщо після зняття навантаження тіло повністю відновлює форму, і пластична, якщо залишається залишкова зміна. Конструкції розраховують так, щоб робочі деформації лишалися в пружній області.

2. Напруження та відносна деформація

Механічне напруження — внутрішня сила, віднесена до площі перерізу. Одиниця та сама, що й у тиску, — паскаль, на практиці мегапаскаль.

Саме напруження, а не сила, визначає, чи витримає деталь. Однакова сила, прикладена до тонкого і товстого стрижня, дає різні напруження, і руйнується той, у якого напруження перевищило допустиме.

Відносна деформація — відношення зміни довжини до початкової довжини. Величина безрозмірна, зазвичай дуже мала: для сталі при робочих навантаженнях вона становить тисячні частки.

3. Закон Гука та модуль Юнга

Закон Гука для твердого тіла стверджує: у пружній області напруження прямо пропорційне відносній деформації. Коефіцієнтом пропорційності є модуль Юнга — характеристика матеріалу, що показує його жорсткість.

Для сталі модуль Юнга становить близько 200 ГПа, для міді приблизно 110 ГПа, для алюмінію близько 70 ГПа. Що більший модуль, то менше деформується матеріал під тим самим навантаженням.

Модуль Юнга не слід плутати з міцністю. Чавун має високий модуль, але крихкий; сталь має той самий порядок модуля і при цьому пластична. Жорсткість і міцність — різні властивості.

4. Діаграма розтягу та розрахунок трубопроводу

Діаграма розтягу показує залежність напруження від відносної деформації для зразка матеріалу. На ній виділяють три характерні точки. Границя пружності — межа, до якої деформація повністю оборотна. Границя текучості — напруження, за якого матеріал починає деформуватися без збільшення навантаження. Границя міцності — максимальне напруження, після якого настає руйнування.

Робочі напруження в конструкціях завжди приймають із запасом відносно границі текучості. Запас міцності враховує неточність розрахунку, неоднорідність матеріалу, корозійне зношення й можливі перевантаження. Для трубопроводів теплових мереж він зазвичай становить від півтора до трьох.

Ключовий для вашої спеціальності розрахунок — напруження в стінці труби під внутрішнім тиском. Кільцеве напруження дорівнює добутку тиску на внутрішній діаметр, поділеному на подвоєну товщину стінки. Воно вдвічі перевищує поздовжнє, тому труби, що руйнуються від внутрішнього тиску, тріскаються вздовж, а не поперек.

З цієї формули видно головне: напруження прямо пропорційне тиску й діаметру і обернено пропорційне товщині стінки. Тому корозійне стоншення стінки на чверть збільшує напруження приблизно на третину, і труба, що роками працювала нормально, раптово виходить із ладу без будь-якого зростання тиску.

Окремо слід пам'ятати, що механічні властивості сталі залежать від температури. При нагріванні границя текучості знижується, тому допустимі напруження для гарячих ділянок паропроводу приймають меншими, ніж для холодних.

Ключові формули

- Механічне напруження: $\sigma = F/S$
- Відносна деформація: $\varepsilon = \Delta l / l_0$
- Закон Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, звідки $\Delta l = F \cdot l_0 / (E \cdot S)$
- Модуль Юнга сталі: $E \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ Па} = 200 \text{ ГПа}$
- Кільцеве напруження в стінці труби: $\sigma = p \cdot d / (2 \cdot s)$
- Запас міцності: $n = \sigma_{\text{гран}} / \sigma_{\text{роб}}$

Питання для самоконтролю

1. Труба з внутрішнім діаметром 200 мм і товщиною стінки 5 мм працює під тиском 1,2 МПа. Яке кільцеве напруження в стінці?
2. Чому труби під внутрішнім тиском тріскаються вздовж, а не поперек?
3. Чому корозійне стоншення стінки небезпечне навіть тоді, коли тиск у системі не зростає?

МОДУЛЬ II. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

7 лекцій, 14 годин

ЛЕКЦІЯ 6

ОСНОВИ МКТ. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ. ГАЗОВІ ЗАКОНИ. РІВНЯННЯ СТАНУ

План лекції

1. Основні положення МКТ та їх дослідне обґрунтування.
2. Ідеальний газ. Основне рівняння МКТ. Температура.
3. Рівняння стану. Ізопроцеси.
4. Реальні гази та межі застосовності моделі.

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії

МКТ спирається на три положення: речовина складається з частинок; частинки перебувають у безперервному хаотичному русі; між частинками діють сили взаємодії. Дослідними підтвердженнями є броунівський рух, дифузія і здатність газів необмежено розширюватися.

Кількість речовини вимірюється в молях. Один моль містить стільки частинок, скільки атомів у 12 грамах вуглецю-12 — це стала Авогадро, приблизно $6,02 \cdot 10^{23}$. Молярна маса дозволяє перейти від маси речовини до кількості молів.

Температура є мірою середньої кінетичної енергії поступального руху молекул. Це визначення пояснює існування абсолютного нуля: нижче температури, за якої рух припиняється, опуститися неможливо. Шкала Кельвіна відлічується саме від цієї точки, нуль за Цельсієм відповідає 273,15 К.

2. Ідеальний газ

Ідеальний газ — модель, у якій нехтують власним об'ємом молекул і силами взаємодії між ними, а зіткнення вважають абсолютно пружними. Для повітря і димових газів при звичайних тисках модель дає цілком прийнятну точність.

Основне рівняння МКТ пов'язує тиск газу з концентрацією молекул і середньою кінетичною енергією їх руху. Фізичний зміст тиску за цією моделлю — сумарний результат ударів молекул об стінку посудини.

3. Рівняння стану та ізопроцеси

Рівняння Клапейрона — Менделєєва пов'язує чотири параметри газу: тиск, об'єм, кількість речовини і абсолютну температуру. Це головна робоча формула розділу, з якої виводяться всі газові закони.

Найважливіше застереження курсу: температуру підставляють виключно в кельвінах. Підстановка градусів Цельсія — найпоширеніша помилка, і підступність її в тому, що результат зазвичай виглядає правдоподібно.

Ізотермічний процес відбувається при сталій температурі: добуток тиску на об'єм сталий. Ізобарний — при сталому тиску: об'єм пропорційний абсолютній температурі. Ізохорний — при сталому об'ємі: тиск пропорційний абсолютній температурі.

Ізохорний процес має пряме значення для безпеки. Газовий балон біля джерела тепла нагрівається при незмінному об'ємі, і тиск у ньому зростає пропорційно абсолютній

температурі. Саме тому зберігання балонів поблизу нагрівальних приладів заборонено, а самі балони мають запобіжні пристрої.

4. Реальні гази та застосування в теплоенергетиці

У реальних газів молекули мають власний об'єм і взаємодіють між собою. При високих тисках і низьких температурах відхилення від моделі ідеального газу стають суттєвими.

Особливо важливий випадок — водяна пара поблизу лінії насичення. Тут модель ідеального газу непридатна принципово, і жодні поправки її не рятують. Розрахунки виконують за таблицями властивостей води й водяної пари, які є основним довідковим інструментом теплотехніка. Спроба порахувати параметри насиченої пари за рівнянням стану дає результат, що виглядає розумно, але не має нічого спільного з дійсністю.

Типові застосування рівняння стану у вашій спеціальності: розрахунок об'єму природного газу, приведенного до нормальних умов, для обліку витрати; визначення об'єму повітря, потрібного на горіння; розрахунок об'ємів димових газів для добору димососа; перевірка тиску в балонах і розширювальних баках.

Ключові формули

- Кількість речовини: $\nu = m/M = N/N_A$
- Стала Авогадро: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
- Рівняння стану: $pV = \nu RT$, $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
- Зв'язок шкал: $T(\text{К}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$
- Ізотермічний: $p_1 V_1 = p_2 V_2$ | Ізобарний: $V_1/T_1 = V_2/T_2$ | Ізохорний: $p_1/T_1 = p_2/T_2$
- Об'єднаний газовий закон: $p_1 V_1/T_1 = p_2 V_2/T_2$

Питання для самоконтролю

1. Балон з газом при 20°C має абсолютний тиск 10 МПа. Яким стане тиск при нагріванні до 50°C ?
2. Чому температуру в газових законах підставляють тільки в кельвінах?
3. Чому параметри насиченої водяної пари не можна обчислювати за рівнянням стану ідеального газу?

ЛЕКЦІЯ 7

ВНУТРІШНЯ ЕНЕРГІЯ. КІЛЬКІСТЬ ТЕПЛОТИ. ТЕПЛОЄМНІСТЬ. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

План лекції

1. Внутрішня енергія як функція стану.
2. Кількість теплоти та робота як функції процесу.
3. Теплоємність. Рівняння теплового балансу.
4. Перший закон термодинаміки та його застосування до ізопроцесів.

1. Внутрішня енергія

Внутрішня енергія системи — сума кінетичної енергії хаотичного руху всіх молекул і потенціальної енергії їх взаємодії. Для ідеального газу вона визначається лише температурою і кількістю речовини.

Внутрішня енергія є функцією стану: її значення залежить тільки від того, у якому стані система перебуває зараз, і не залежить від шляху, яким вона в цей стан прийшла. Це дуже зручна властивість — вона дозволяє рахувати зміну енергії, не аналізуючи весь процес.

Теплота і робота, навпаки, є функціями процесу. Тому фраза «у тілі міститься стільки теплоти» фізично некоректна: теплота існує лише як передача енергії, а не як її запас. Змінити внутрішню енергію можна двома способами — теплообміном і виконанням роботи.

2. Теплоємність

Теплоємність — кількість теплоти, потрібна для нагрівання тіла на один кельвін. Питома теплоємність віднесена до одиниці маси і є характеристикою речовини, молярна — до одного моля.

Питома теплоємність води становить приблизно $4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ і є однією з найвищих серед поширених речовин. Саме це зробило воду основним теплоносієм: кубометр води переносить приблизно в три з половиною тисячі разів більше теплоти, ніж кубометр повітря за тієї самої різниці температур.

Інші переваги води як теплоносія — доступність, нетоксичність, низька вартість. Недоліки теж суттєві: вона замерзає при нуль градусів, спричиняє корозію за наявності розчиненого кисню, утворює накип, а при температурах понад сто градусів потребує підтримання надлишкового тиску, щоб не закипіти.

Для газів розрізняють теплоємність при сталому тиску і при сталому об'ємі, причому перша завжди більша. Причина прямо впливає з першого закону: при сталому тиску газ розширюється, і частина наданої теплоти йде на роботу, тому для того самого нагрівання теплоти потрібно більше. У розрахунку нагрівання повітря в припливній установці беруть теплоємність при сталому тиску.

3. Рівняння теплового балансу

Рівняння теплового балансу є формою закону збереження енергії для теплообміну: скільки теплоти віддали гарячі тіла, стільки й отримали холодні, якщо система теплоізована.

Це основний робочий інструмент для розрахунку теплообмінних апаратів. За заданими витратами теплоносіїв і трьома з чотирьох температур визначають четверту; за потрібною тепловою потужністю визначають витрату.

У реальному апараті частина теплоти втрачається в навколишнє середовище, тому в баланс вводять ККД апарата. Для добре ізованого теплообмінника він становить 0,95–0,98.

4. Перший закон термодинаміки

Перший закон формулюється так: теплота, надана системі, витрачається на зміну її внутрішньої енергії та на виконання роботи проти зовнішніх сил.

Правило знаків має принципове значення. Теплота, надана системі, додатна; відведена — від'ємна. Робота, виконана системою над зовнішніми тілами, додатна; виконана над системою — від'ємна. Переплутані знаки дають фізично абсурдний результат.

Застосування до ізопроцесів дає прості висновки. В ізохорному процесі газ роботи не виконує, тому вся надана теплота йде на зміну внутрішньої енергії. В ізотермічному внутрішня енергія ідеального газу не змінюється, тому вся теплота йде на роботу. В ізобарному теплота розподіляється між обома складовими.

Адіабатним називають процес без теплообміну з навколишнім середовищем — практично це або дуже швидкий процес, або процес у добре ізольованій системі. При адіабатному стисненні вся робота йде на збільшення внутрішньої енергії, і газ нагрівається; при адіабатному розширенні газ виконує роботу за рахунок внутрішньої енергії й охолоджується. Саме тому повітря на виході з компресора гаряче, хоча його спеціально не нагрівали, а газ після дроселювання охолоджується.

Ключові формули

- Перший закон термодинаміки: $Q = \Delta U + A$
- Кількість теплоти на нагрівання: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$
- Рівняння теплового балансу: $Q_{\text{відд}} = Q_{\text{отр}}$
- Робота газу при сталому тиску: $A = p \cdot \Delta V$
- Ізохорний: $Q = \Delta U$, $A = 0$ | Ізотермічний: $\Delta U = 0$, $Q = A$ | Адіабатний: $Q = 0$, $\Delta U = -A$
- Питома теплоємність води: $c \approx 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$

Питання для самоконтролю

1. Скільки теплоти потрібно для нагрівання 150 кг води від 12 °С до 85 °С?
2. Чому теплоємність газу при сталому тиску більша за теплоємність при сталому об'ємі?
3. Назвіть дві переваги і два недоліки води як теплоносія.

ЛЕКЦІЯ 8

ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ. ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ. ЦИКЛ КАРНО. ТЕПЛОВИЙ НАСОС

План лекції

1. Оборотні й необоротні процеси.
2. Другий закон термодинаміки. Поняття ентропії.
3. Теплові двигуни. Цикл Карно.
4. Холодильна машина і тепловий насос. Когенерація.

1. Оборотні й необоротні процеси

Оборотним називають процес, який можна провести у зворотному напрямку так, щоб і система, і навколишнє середовище повернулися у початковий стан. Усі реальні процеси необоротні: теплота самочинно переходить від гарячого тіла до холодного, газ самочинно розширюється, тертя перетворює роботу на теплоту.

Зворотні процеси самі собою не відбуваються ніколи. Ніхто не спостерігав, щоб кімната самочинно нагрілася, віддавши теплоту холодному предмету, хоча закон збереження енергії цього не забороняв би. Отже, потрібен ще один закон, який задає напрямок процесів.

2. Другий закон термодинаміки

Одне формулювання: неможливий процес, єдиним результатом якого є передача теплоти від холоднішого тіла до гарячішого. Інше: неможливий процес, єдиним результатом якого є повне перетворення теплоти на роботу.

Ключове слово в обох — «єдиним». Закон не забороняє передавати теплоту від холодного тіла до гарячого взагалі: саме це роблять холодильник і тепловий насос. Він забороняє робити це без витрати роботи ззовні.

Ентропія є мірою необоротності й водночас функцією стану. У замкненій системі при необоротних процесах ентропія зростає, при оборотних лишається сталою, самочинно зменшуватися не може.

Практичний наслідок для теплоенергетики: жодна теплова машина не може перетворити всю отриману теплоту на роботу, частина обов'язково має бути віддана холодильнику. Це не недосконалість конструкції, а принципова заборона.

3. Теплові двигуни та цикл Карно

Теплова машина працює циклічно: робоче тіло отримує теплоту від нагрівника, виконує роботу і віддає частину теплоти холодильнику, після чого повертається у початковий стан. Термічний ККД дорівнює відношенню виконаної роботи до отриманої теплоти.

Цикл Карно складається з двох ізотерм і двох адіабат і є ідеальним оборотним циклом. Його ККД визначається виключно температурами нагрівника і холодильника, обидві в кельвінах.

Це надзвичайно важливий результат: ефективність теплової машини визначається насамперед температурним перепадом, а не досконалістю конструкції. Підвищити ККД можна або підвищивши температуру нагрівника, або знизивши температуру холодильника, і обидва шляхи обмежені — перший жароміцністю матеріалів, другий температурою навколишнього середовища.

ККД циклу Карно є теоретичною межею, недосяжною на практиці. Якщо в розрахунку реальний ККД вийшов вищим за карнотівський, у розрахунку помилка. Це найзручніший спосіб самоперевірки в задачах розділу.

У паросиловій установці теплової електростанції робочим тілом є водяна пара. Пара високих параметрів з котла розширюється в турбіні, виконуючи роботу, потім конденсується в конденсаторі й насосом повертається в котел. Саме необхідність конденсувати пару, віддаючи теплоту довкіллю, і є тим «холодильником», якого вимагає другий закон.

4. Тепловий насос і когенерація

Тепловий насос працює за оберненим циклом: витрачаючи роботу, він переносить теплоту від холоднішого середовища до теплішого. Його ефективність характеризує коефіцієнт перетворення, що показує, скільки теплоти доставлено на одиницю витраченої роботи.

Цей коефіцієнт може бути значно більшим за одиницю — типово від трьох до п'яти. Закон збереження енергії при цьому не порушується: теплота не створюється, а переноситься, і більшість її взята з навколишнього середовища. Витрачена електроенергія відповідає лише роботі перенесення.

Чим менша різниця температур між джерелом і споживачем, тим вищий коефіцієнт перетворення. Тому теплові насоси набагато ефективніші в системах низькотемпературного опалення, як-от тепла підлога, ніж у високотемпературних

радіаторних системах, і їхня ефективність падає в найлютіші морози, коли теплота потрібна найбільше.

Когенерація — одночасне виробництво електричної і теплової енергії. Її термодинамічний сенс у тому, що теплоту, яку двигун усе одно змушений віддати холодильнику, використовують корисно — для опалення чи гарячого водопостачання, замість того щоб викидати в довкілля. Коефіцієнт використання палива при цьому зростає з приблизно тридцяти-сорока відсотків до вісімдесяти й вище.

Ключові формули

- ККД теплової машини: $\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = A / Q_1$
- ККД циклу Карно: $\eta = 1 - T_2/T_1$ (температури в кельвінах)
- Коефіцієнт перетворення теплового насоса: $COP = Q_{\text{корисна}} / A_{\text{витрачена}}$
- Зміна ентропії: $\Delta S = Q / T$

Питання для самоконтролю

1. Теплова машина працює між температурами 350 °С і 40 °С. Який максимально можливий ККД?
2. Чому тепловий насос не порушує закон збереження енергії, доставляючи більше теплоти, ніж споживає електроенергії?
3. Чому ефективність теплового насоса падає саме в найхолоднішу погоду?

ЛЕКЦІЯ 9

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА: ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, КОНВЕКЦІЯ, ВИПРОМІНЮВАННЯ. ТЕРМІЧНИЙ ОПІР

План лекції

1. Три механізми передавання теплоти.
2. Теплопровідність. Закон Фур'є.
3. Термічний опір і коефіцієнт теплопередачі.
4. Теплопередача через плоску і циліндричну стінку. Теплоізоляція.

1. Три механізми теплопередачі

Теплопровідність — перенесення теплоти безпосередньо в речовині без переміщення самої речовини. Це основний механізм у твердих тілах: через стінку труби, стінку котла, огорожувальну конструкцію будівлі.

Конвекція — перенесення теплоти разом із рухом рідини або газу. Природна конвекція виникає через різницю густин нагрітих і холодних шарів, вимушена створюється насосом або вентилятором і значно інтенсивніша. Це основний механізм на межі «стінка — теплоносій».

Теплове випромінювання не потребує середовища і передається навіть у вакуумі. Його роль різко зростає з температурою, і в топці котла воно є основним способом передачі теплоти до екранних поверхонь. Кількісні закони випромінювання розглядаються в лекції 19.

У реальному обладнанні всі три механізми діють одночасно, і завдання інженера — визначити, який переважає у конкретному вузлі.

2. Теплопровідність і закон Фур'є

Закон Фур'є у спрощеній формі: тепловий потік через плоский шар пропорційний коефіцієнту теплопровідності, площі та різниці температур і обернено пропорційний товщині шару.

Коефіцієнт теплопровідності є характеристикою матеріалу. У металів він високий — у міді близько 390, у сталі 46–58 Вт/(м·К). У теплоізоляційних матеріалів низький — у мінеральної вати і пінополістиролу 0,035–0,05 Вт/(м·К). Різниця майже на чотири порядки і є фізичною основою теплоізоляції.

Критично важлива обставина експлуатації: коефіцієнт теплопровідності ізоляції різко зростає при зволоженні, бо вода проводить теплоту в двадцять з лишком разів краще за повітря в порах матеріалу. Намокла мінеральна вата може втратити більшу частину ізоляційних властивостей, залишаючись зовні цілою. Це поширена й неочевидна причина зростання тепловтрат, яку виявляють лише тепловізійним обстеженням.

3. Термічний опір і коефіцієнт теплопередачі

Термічний опір шару дорівнює товщині, поділеній на коефіцієнт теплопровідності. Чим він більший, тим краща ізоляція.

Для багатошарової конструкції термічні опори шарів додаються — так само, як опори послідовно з'єднаних резисторів в електричному колі. Ця аналогія дуже корисна: вона одразу показує, що найтонший шар із найгіршою теплопровідністю може визначати весь опір конструкції, і що додавати ізоляцію має сенс саме там, де опір найменший.

Коефіцієнт теплопередачі враховує весь ланцюг: тепловіддачу від гарячого теплоносія до стінки, теплопровідність самої стінки і тепловіддачу від стінки до холодного середовища. Він є величиною, оберненою до повного термічного опору.

Практичний наслідок для теплообмінників: занижена швидкість теплоносія різко погіршує тепловіддачу, бо на стінці утворюється товстий загальмований шар. Апарат із правильно розрахованою площею може «не гріти» саме через недостатню циркуляцію, а не через брак поверхні.

4. Розрахунок тепловтрат і вибір ізоляції

Для плоскої стінки тепловий потік обчислюють безпосередньо за законом Фур'є через суму термічних опорів шарів. Для циліндричної стінки трубопроводу формула складніша, бо площа поверхні зростає з радіусом, але логіка та сама.

У розрахунку огорожувальної конструкції будівлі враховують усі шари: штукатурку, кладку, утеплювач, оздоблення, а також опори тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхнях. Найбільшу частку тепловтрат зазвичай дають вікна, попри їхню меншу площу, — саме тому заміна вікон дає відчутніший ефект, ніж утеплення стін такої самої площі.

Збільшення товщини ізоляції знижує тепловтрати, але залежність не лінійна: перші сантиметри дають найбільший ефект, кожен наступний — дедалі менший. Термічний опір зростає пропорційно товщині, а тепловий потік обернено пропорційний опору, тому подвоєння товщини зменшує втрати не вдвічі від початкових, а лише наближає їх до нуля дедалі повільніше. Саме тому нескінченне нарощування ізоляції економічно недоцільне: існує оптимальна товщина, за якої вартість додаткового шару вже не окупується економією палива.

Ключові формули

- Закон Фур'є: $Q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T \cdot \tau / d$; тепловий потік: $q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T / d$
- Термічний опір шару: $R = d / \lambda$
- Багатошарова стінка: $R_{\text{заг}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$
- Коефіцієнт теплопередачі: $k = 1 / R_{\text{заг}}$
- Тепловий потік через багатошарову стінку: $q = S \cdot \Delta T / R_{\text{заг}}$

Питання для самоконтролю

1. Стіна площею 15 м^2 має товщину $0,12 \text{ м}$ і коефіцієнт теплопровідності $0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Різниця температур 35 К . Який тепловий потік через стіну?
2. Чому намокла ізоляція практично втрачає свої властивості, залишаючись зовні цілою?
3. Чому нескінченне збільшення товщини ізоляції економічно недоцільне?

ЛЕКЦІЯ 10

ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ. ПАРООУТВОРЕННЯ, КИПІННЯ, КОНДЕНСАЦІЯ. ВЛАСТИВОСТІ ВОДЯНОЇ ПАРИ

План лекції

1. Агрегатні стани та фазові переходи.
2. Плавлення і кристалізація.
3. Випаровування, кипіння, конденсація.
4. Насичена і перегріта пара. Параметри пари в котельних установках.

1. Фазові переходи

При фазовому переході температура речовини не змінюється, хоча теплота підводиться безперервно. Уся теплота йде на перебудову структури, тобто на подолання сил взаємодії між молекулами. На графіку залежності температури від наданої теплоти це виглядає як горизонтальна ділянка.

Питома теплота плавлення льоду становить приблизно $330 \text{ кДж}/\text{кг}$, питома теплота пароутворення води — приблизно $2260 \text{ кДж}/\text{кг}$. Порівняйте: щоб нагріти кілограм води від нуля до ста градусів, потрібно близько 420 кДж , а щоб перетворити цей самий кілограм на пару — у п'ять з половиною разів більше.

Практичний висновок величезної ваги: у паровому котлі саме пароутворення, а не нагрівання визначає потрібну потужність. І навпаки, при конденсації пари вивільняється та сама велика кількість теплоти — на цьому ґрунтується висока ефективність парового опалення й робота конденсаційних котлів.

2. Випаровування і кипіння

Випаровування відбувається з вільної поверхні за будь-якої температури: найшвидші молекули долають сили притягання й вилітають. Оскільки з рідини йдуть найенергійніші молекули, вона при цьому охолоджується.

Кипіння відбувається в усьому об'ємі й настає, коли тиск насиченої пари зрівнюється із зовнішнім тиском. Звідси головне: температура кипіння залежить від тиску. У горах вода кипить нижче ста градусів, а в котлі під тиском — значно вище.

Саме ця залежність дозволяє отримувати пару високої температури: щоб мати пару при 200 градусах, у котлі підтримують тиск приблизно 1,6 МПа. Та сама залежність працює у зворотний бік у деаераторах: знижуючи тиск, домагаються кипіння за низької температури й видаляють розчинені гази.

І та сама залежність пояснює небезпеку: у водогрійному котлі вода при 130 градусах не кипить лише тому, що перебуває під тиском. Аварійне падіння тиску призводить до миттєвого скипання всього об'єму з утворенням величезної кількості пари — це явище лежить в основі найтяжчих аварій у котельнях.

3. Насичена і перегріта пара

Насиченою називають пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною: скільки молекул вилітає з поверхні, стільки й повертається. Тиск насиченої пари однозначно визначається температурою і не залежить від об'єму посудини.

Ця однозначність має пряме практичне застосування: у паровому котлі температуру контролюють за манометром, бо кожному тиску відповідає єдина температура насичення. У водогрійному котлі такого зв'язку немає, і температуру доводиться міряти окремо.

Перегріта пара — пара, нагріта вище температури насичення за даного тиску. Її параметри вже не пов'язані однозначно, і для розрахунків користуються таблицями. Перегрів застосовують, щоб пара не почала конденсуватися в турбіні, бо краплі води руйнують лопатки.

Вимоги до якості пари не є формальністю. Волога пара спричиняє ерозію лопаток турбіни й гідравлічні удари в паропроводах. Винесення солей із котлової води осаджується на лопатках і в арматурі, порушуючи роботу обладнання. Тому вологість і сольовий склад пари жорстко нормуються.

4. Конденсація і повернення конденсату

Конденсація — зворотний до пароутворення процес, при якому вивільняється та сама питома теплота. У системах парового опалення саме теплота конденсації є корисною, а не теплота охолодження пари.

Конденсат — це хімічно підготовлена вода з високою температурою. Скидати його в каналізацію означає двічі втрачати гроші: на водопідготовку нової порції і на її нагрівання. Тому системи повернення конденсату є стандартним елементом промислових котелень, а відсоток повернення — одним із показників ефективності.

У димових трактах конденсація має інший бік. Якщо температура поверхні опускається нижче точки роси димових газів, на ній випадає конденсат, який у поєднанні з оксидами сірки утворює кислоту й спричиняє інтенсивну корозію. Саме тому температуру відхідних газів у звичайних котлах не знижують нижче певної межі, попри те що це погіршує ККД. Конденсаційні котли розв'язують цю суперечність застосуванням кислотостійких матеріалів.

Ключові формули

- Теплота плавлення: $Q = \lambda \cdot m$, для льоду $\lambda \approx 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг
- Теплота пароутворення: $Q = r \cdot m$, для води $r \approx 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг
- Повна теплота: $Q = c \cdot m \cdot \Delta T + r \cdot m$
- Умова кипіння: $p_{\text{нас}}(T) = p_{\text{зовн}}$

Питання для самоконтролю

1. Скільки теплоти потрібно, щоб 40 кг води при 100 °С повністю перетворити на насичену пару? Порівняйте з теплою нагрівання цієї води від 20 °С.
2. Чому в паровому котлі температуру можна контролювати за манометром, а у водогрійному ні?
3. Чому температуру відхідних газів у звичайному котлі не знижують нижче певної межі, хоча це підвищило б ККД?

ЛЕКЦІЯ 11

ВОЛОГІСТЬ ПОВІТРЯ. ТЕПЛОВЕ РОЗШИРЕННЯ ТІЛ

План лекції

1. Абсолютна та відносна вологість. Точка роси.
2. Психрометр і гігрометр. Мікроклімат приміщень.
3. Теплове розширення твердих тіл.
4. Теплове подовження трубопроводів. Компенсатори.

1. Вологість повітря

Абсолютна вологість — маса водяної пари в одиниці об'єму повітря. Відносна вологість — відношення фактичного парціального тиску пари до тиску насиченої пари за тієї самої температури, у відсотках.

Точка роси — температура, до якої треба охолодити повітря, щоб пара в ньому стала насиченою. При охолодженні нижче точки роси надлишок вологи випадає конденсатом.

Найважливіший практичний висновок: відносна вологість змінюється при зміні температури навіть тоді, коли вміст вологи в повітрі не змінився. Тому конденсат утворюється на холодних поверхнях трубопроводів, у кутах приміщень і на внутрішніх поверхнях зовнішніх стін без будь-якого додаткового зволоження.

Це основна причина корозії обладнання в котельнях і теплових пунктах, а в житлових приміщеннях — причина появи плісняви саме в кутах: там термічний опір огороження найменший, температура поверхні найнижча, і вона першою опускається нижче точки роси.

Вимірюють вологість психрометром — парою термометрів, один із яких обгорнутий вологою тканиною. Випаровування охолоджує вологий термометр, і за різницею показів за таблицею визначають відносну вологість.

2. Теплове розширення твердих тіл

При нагріванні амплітуда коливань частинок у кристалічній ґратці зростає, і середні відстані між ними збільшуються. Тіло розширюється.

Лінійне розширення описується коефіцієнтом лінійного розширення: відносно видовження пропорційне зміні температури. Для сталі коефіцієнт становить приблизно $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для міді близько $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для алюмінію близько $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Об'ємне розширення описується коефіцієнтом, приблизно втричі більшим за лінійний. Для рідин теплове розширення значно суттєвіше, ніж для твердих тіл, і саме тому в системах опалення обов'язковий розширювальний бак: вода при нагріванні від десяти до дев'яноста

градусів збільшує об'єм приблизно на три з половиною відсотки, і цьому об'єму треба кудись подітися.

Вода має аномалію: при нагріванні від нуля до чотирьох градусів вона стискається, а не розширюється, і максимальну густину має саме при чотирьох градусах. Наслідок — лід плаває, а водойми не промерзають до дна.

3. Теплове подовження трубопроводів

Це ключова тема лекції для вашої спеціальності. Ділянка сталевих трубопроводів довжиною 100 метрів при нагріванні від 10 до 130 градусів подовжується приблизно на 14 сантиметрів. Цифра здається малою лише доти, доки не спробувати цьому подовженню завадити.

Якщо ділянка защемлена з обох боків і подовжитися не може, у ній виникають температурні напруження. Їх обчислюють за законом Гука: напруження дорівнює добутку модуля Юнга, коефіцієнта лінійного розширення і різниці температур. Принципово важливо, що довжина ділянки в цю формулу не входить — напруження однакове і для десятиметрової, і для кілометрової защемленої ділянки.

Підставивши значення для сталі й різницю температур 120 градусів, отримаємо напруження близько 290 МПа. Це порівнянно з границею текучості конструкційної сталі. Тобто защемлений трубопровід руйнує сам себе, без будь-якого зовнішнього навантаження — саме так зривають опори й деформують арматуру після пуску теплотраси.

Захист від цього забезпечують компенсатори. П-подібні й Z-подібні компенсатори сприймають подовження за рахунок згину ділянки труби. Сальникові дозволяють трубам ковзати, але потребують обслуговування ущільнення. Сильфонні компенсують подовження гофрованою вставкою і не потребують обслуговування, але чутливі до перекосів.

Разом із компенсаторами встановлюють нерухомі опори, які фіксують трубу в певних точках і задають напрямок подовження, та рухомі опори, які дозволяють трубам ковзати. Помилка в розстановці опор зводить нанівець роботу компенсатора.

Ключові формули

- Відносна вологість: $\varphi = p / p_{\text{нас}} \cdot 100 \%$
- Лінійне розширення: $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$
- Коефіцієнт лінійного розширення сталі: $\alpha \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Об'ємне розширення: $\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T$, $\beta \approx 3\alpha$
- Температурне напруження в защемленій ділянці: $\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$

Питання для самоконтролю

1. Ділянка сталевих трубопроводів довжиною 80 м нагрівається від 15 °С до 120 °С. На скільки вона подовжиться?
2. Обчисліть температурне напруження в цій ділянці, якби вона була защемлена. Порівняйте з границею текучості сталі.
3. Чому пліснява з'являється саме в кутах зовнішніх стін?

ЛЕКЦІЯ 12

ГОРІННЯ ЯК ФІЗИКО-ХІМІЧНИЙ ПРОЦЕС. ТЕПЛОТА ЗГОРЯННЯ ПАЛИВА. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС КОТЛОАГРЕГАТА

План лекції

1. Паливо та його види. Теплота згоряння.
2. Умови повного згоряння. Коефіцієнт надлишку повітря.
3. Температура горіння.
4. Тепловий баланс котлоагрегата. ККД котла та шляхи його підвищення.

1. Паливо і теплота згоряння

Горіння — швидка екзотермічна реакція окиснення палива киснем повітря. З погляду фізики це перетворення хімічної енергії на внутрішню енергію продуктів згоряння.

Теплота згоряння — кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості палива. Розрізняють вищу і нижчу теплоту згоряння. Вища враховує теплоту конденсації водяної пари, утвореної при згорянні водню палива; нижча її не враховує.

У звичайних котлах водяна пара виходить із димовими газами й не конденсується, тому в розрахунках користуються нижчою теплотою згоряння. У конденсаційних котлах пара конденсується навмисно, і саме тому їхній ККД, обчислений за нижчою теплотою, може формально перевищувати сто відсотків — це не порушення законів фізики, а наслідок вибору бази для розрахунку.

Орієнтовні значення нижчої теплоти згоряння: природний газ приблизно 34 МДж/м³, мазут близько 40 МДж/кг, кам'яне вугілля 20–28 МДж/кг, деревні пелети 17–18 МДж/кг. Порівнювати види палива коректно саме за теплотою згоряння, а не за масою чи об'ємом.

2. Коефіцієнт надлишку повітря

Для повного згоряння потрібна цілком певна кількість повітря, яку обчислюють стехіометрично за складом палива. Для природного газу це приблизно 9,5 кубометра повітря на кубометр газу.

На практиці теоретичної кількості не досить: перемішування палива з повітрям ніколи не буває ідеальним, і частина палива не знайшла б окиснювача. Тому повітря подають із надлишком, а відношення фактичної кількості до теоретичної називають коефіцієнтом надлишку повітря.

Тут виникає оптимум, і розуміння його є ключем до всієї теми. За недостатнього повітря згоряння неповне: у димових газах з'являється оксид вуглецю, частина хімічної енергії палива просто викидається в димар нествореною теплотою. Це хімічний недопал.

За надмірного повітря згоряння повне, але зайве повітря треба нагріти до температури димових газів і винести в димар. Ця теплота теж втрачається. Крім того, зростає об'єм газів і навантаження на димосос.

Тому оптимальний коефіцієнт надлишку існує і для газових котлів становить приблизно 1,05–1,15. Знаходять його за складом димових газів: контролюють вміст кисню й оксиду вуглецю. Поява оксиду вуглецю означає, що повітря замало; зростання вмісту кисню — що його забагато.

3. Температура горіння

Теоретична температура горіння — та, яку мали б продукти згоряння, якби вся теплота пішла на їх нагрівання без втрат. Для природного газу вона перевищує дві тисячі градусів.

Реальна температура в топці значно нижча через тепловіддачу до екранних поверхонь, дисоціацію продуктів згоряння за високих температур і, головне, через надлишок повітря. Кожен відсоток зайвого повітря знижує температуру в топці.

Температура в топці важлива не лише для тепловіддачі: вона визначає інтенсивність променистого теплообміну, який залежить від температури в четвертому степені, а також впливає на утворення оксидів азоту, вміст яких у викидах нормується.

4. Тепловий баланс котлоагрегата

Тепловий баланс — застосування першого закону термодинаміки до котла. Уся теплота, внесена паливом, дорівнює сумі корисно використаної теплоти і всіх втрат.

Основні статті втрат такі. Втрати з відхідними газами — зазвичай найбільші, від п'яти до восьми відсотків; вони визначаються температурою газів на виході й коефіцієнтом надлишку повітря. Втрати від хімічного недопалу — наявність оксиду вуглецю в газах. Втрати від механічного недопалу — незгорілі частинки палива, суттєві для твердого палива й практично відсутні для газу. Втрати в навколишнє середовище через обмурівку — зазвичай один-два відсотки.

ККД котла визначають двома способами. Прямий баланс: відношення корисно використаної теплоти до внесеної паливом. Обернений баланс: сто відсотків мінус сума всіх втрат. Другий спосіб точніший, бо втрати вимірювати легше, ніж витрату палива й теплоти одночасно, і саме він показує, куди саме дівається теплота.

Звідси випливають конкретні шляхи підвищення ККД: налагодження режиму горіння з оптимальним надлишком повітря, зниження температури відхідних газів установкою економайзера або конденсаційного теплообмінника, очищення поверхонь нагріву від накипу й сажі, ізоляція обмурівки, автоматичне регулювання за складом димових газів.

Зверніть увагу на різницю понять. ККД котла становить 90–94 відсотки і показує ефективність перетворення теплоти палива на теплоту теплоносія. ККД теплової електростанції становить 35–40 відсотків, бо там теплоту перетворюють на роботу і діє обмеження другого закону термодинаміки. Порівнювати ці числа безпосередньо некоректно: вони описують різні процеси.

Ключові формули

- Теплота, внесена паливом: $Q = B \cdot Q_{\text{нр}}$, де B — витрата палива
- Корисна теплота котла: $Q_{\text{кор}} = G \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$
- ККД за прямим балансом: $\eta = Q_{\text{кор}} / (B \cdot Q_{\text{нр}})$
- ККД за оберненим балансом: $\eta = 100 \% - \Sigma q_{\text{втрат}}$
- Коефіцієнт надлишку повітря: $\alpha = V_{\text{факт}} / V_{\text{теор}}$

Питання для самоконтролю

1. Про що свідчить поява оксиду вуглецю в димових газах і що при цьому робити з подачею повітря?
2. Чому надлишок повітря знижує ККД котла, хоча згоряння при цьому повніше?

3. Чому ККД котла становить близько 92 %, а ККД теплової електростанції лише близько 38 %? Чи коректно порівнювати ці числа?

МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 1 проводиться після завершення модуля II й охоплює матеріал лекцій 1–12.

МОДУЛЬ III. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

5 лекцій, 10 годин

ЛЕКЦІЯ 13

ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЗАРЯД, НАПРУЖЕНІСТЬ, ПОТЕНЦІАЛ. ЄМНІСТЬ. ПРОВІДНИКИ І ДІЕЛЕКТРИКИ

План лекції

1. Електричний заряд. Закон Кулона.
2. Електричне поле: напруженість і потенціал.
3. Провідники та діелектрики в полі.
4. Електроємність. Конденсатори. Статична електрика на виробництві.

1. Заряд і закон Кулона

Електричний заряд — фундаментальна властивість частинок, що виявляється в електромагнітній взаємодії. Заряд дискретний: будь-який заряд кратний елементарному, що дорівнює приблизно $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. У замкненій системі сумарний заряд 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

Заряди взаємодіють не безпосередньо, а через поле. Силовою характеристикою поля є напруженість — сила, що діє на одиничний позитивний заряд. Енергетичною характеристикою є потенціал.

Різниця потенціалів, або напруга, дорівнює роботі поля з переміщення одиничного заряду між двома точками. Саме напругу вимірюють вольтметром, і саме вона фігурує в усіх практичних розрахунках — потенціал сам по собі визначений лише з точністю до вибору нуля, за який зазвичай беруть землю.

3. Провідники й діелектрики

У провідниках є вільні заряди. Внесений у поле провідник перерозподіляє власні заряди так, що поле всередині нього стає нульовим. На цьому ґрунтується електростатичний захист: металевий корпус приладу або екран кабелю захищає вміст від зовнішніх полів.

У діелектриках вільних зарядів практично немає, але молекули поляризуються і створюють власне поле, спрямоване проти зовнішнього. Через це поле в діелектрику послаблюється. Здатність діелектрика витримувати поле без пробоя характеризує електрична міцність — вона визначає товщину ізоляції кабелів і відстані між струмовідними частинами.

Найважливіше практичне питання теми — статична електрика на теплоенергетичних об'єктах. При русі рідин і сипких матеріалів трубопроводами відбувається розділення зарядів: одна частина заряду залишається на стінці, друга виноситься потоком. На ізольованому обладнанні заряд накопичується, і потенціал може досягати десятків кіловольт.

Це не абстрактна проблема. Іскровий розряд статичної електрики є реальною причиною займання пари палива при зливів й наливів. Заходи захисту прямо впливають з фізики явища:

заземлення цистерни й трубопроводу до початку зливу, а не після; обмеження швидкості перекачування нормативами, бо інтенсивність розділення зарядів зростає зі швидкістю; застосування антистатичних присадок, що підвищують провідність палива.

4. Електроємність і конденсатори

Електроємність характеризує здатність накопичувати заряд і дорівнює відношенню заряду до потенціалу. Конденсатор — система двох провідників, розділених діелектриком.

При паралельному з'єднанні ємності додаються, при послідовному додаються обернені величини. Це протилежно правилам для резисторів і є частим джерелом плутанини.

У теплоенергетиці конденсатори застосовують насамперед у компенсаційних установках для підвищення коефіцієнта потужності, а також у пускових пристроях однофазних двигунів і фільтрах перетворювачів частоти.

Ключові формули

- Закон Кулона: $F = k \cdot q_1 \cdot q_2 / (\epsilon \cdot r^2)$, $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
- Напруженість поля: $E = F/q$
- Робота поля: $A = q \cdot U$
- Електроємність: $C = q/U$
- Паралельне з'єднання: $C = C_1 + C_2$ | Послідовне: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$
- Енергія конденсатора: $W = C \cdot U^2 / 2$

Питання для самоконтролю

1. Чому металевий корпус приладу захищає його вміст від зовнішніх електричних полів?
2. Чому обмеження швидкості перекачування палива є заходом пожежної безпеки?
3. Чому цистерну заземлюють до початку зливу, а не після нього?

ЛЕКЦІЯ 14

ПОСТІЙНИЙ СТРУМ. ЗАКОН ОМА. ОПІР. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

План лекції

1. Електричний струм. Сила струму та напруга.
2. Закон Ома для ділянки кола і для повного кола. ЕРС.
3. Опір провідника. З'єднання провідників.
4. Робота і потужність струму. Закон Джоуля — Ленца. Електронагрів.

1. Струм і закон Ома

Електричний струм — впорядкований рух заряджених частинок. Сила струму дорівнює заряду, що проходить через переріз провідника за одиницю часу. За напрямком струму умовно приймають напрямок руху позитивних зарядів, хоча в металах рухаються електрони у протилежний бік.

Закон Ома для ділянки кола: сила струму прямо пропорційна напрузі й обернено пропорційна опору. Це базове співвідношення всієї електротехніки.

Для підтримання струму в замкненому колі потрібне джерело зі сторонніми силами неелектричної природи. Їх характеризує електрорушійна сила. Закон Ома для повного кола

враховує внутрішній опір джерела, і саме цей опір обмежує струм короткого замикання скінченим значенням. Наслідок, знайомий кожному: напруга в мережі просідає при вмиканні потужного споживача, бо зростає падіння на внутрішньому опорі джерела й на опорі підвідної лінії.

2. Опір провідника

Опір прямо пропорційний довжині провідника й обернено пропорційний площі перерізу; коефіцієнтом пропорційності є питомий опір — характеристика матеріалу.

Мідь і алюміній мають малий питомий опір і тому застосовуються для передачі струму. Ніхром і фехраль мають високий питомий опір, і з них виготовляють нагрівальні елементи: тут високий опір потрібен навмисне, щоб на елементі виділялася теплота.

При виборі перерізу проводу враховують не лише падіння напруги, а й допустиму густину струму: занадто тонкий провід перегріється навіть за прийнятного падіння напруги.

Опір металів зростає з температурою приблизно лінійно. Практичний наслідок: опір нагрівального елемента в робочому стані помітно більший за виміряний у холодному, тому розрахунок потужності за холодним опором систематично її завищує. Значно корисніший наслідок тієї самої залежності — термометри опору, які розглядаються в наступній лекції.

3. З'єднання провідників і розрахунок кіл

При послідовному з'єднанні через усі елементи тече однаковий струм, опори додаються. При паралельному на всіх елементах однакова напруга, додаються обернені величини опорів; загальний опір паралельної групи завжди менший за найменший у ній.

Схеми зі змішаним з'єднанням розраховують послідовним згортанням: спершу знаходять опір паралельних груп, потім додають послідовні ділянки, визначають загальний струм і розгортають розрахунок назад до окремих гілок.

Перевірку виконують балансом потужностей: сума потужностей, що виділяються на всіх елементах, має дорівнювати потужності джерела. Розбіжність означає помилку в розрахунку.

4. Закон Джоуля — Ленца та електронагрів

Кількість теплоти, що виділяється у провіднику зі струмом, пропорційна квадрату сили струму, опору й часу. Це основа всього електронагріву: ТЕНів, електрододатків, електродних водонагрівачів.

Той самий закон описує втрати в лініях електропередачі та нагрівання контактних з'єднань. Квадратична залежність від струму має принципові наслідки: подвоєння струму збільшує втрати вчетверо. Звідси вся логіка побудови електроенергетики — передавати за високої напруги й малого струму.

Для експлуатації критично важливий ще один наслідок. Послаблене контактне з'єднання має підвищений опір, на ньому виділяється додаткова теплота, воно нагрівається, окислюється, опір зростає ще більше. Процес самопідсилюється і є однією з головних причин пожеж в електроустановках. Саме тому тепловізійне обстеження контактів у щитах входить до регламенту обслуговування.

Окремо варто порівняти способи отримання теплоти з погляду енергетики. Електронагрів має ККД, близький до одиниці: практично вся електроенергія переходить у теплоту. Але сама ця електроенергія вироблена на ТЕС із ККД близько 38 відсотків, тому від спаленого

палива до теплоти в приміщенні доходить менше сорока відсотків. Пряме спалювання газу в котлі дає понад дев'яносто. Тепловий насос, споживаючи ту саму електроенергію, доставляє теплоти в три-чотири рази більше. Це і є фізичне обґрунтування того, чому електронагрів вважають найменш ефективним способом опалення, попри його стовідсотковий власний ККД.

Ключові формули

- Сила струму: $I = q/t$
- Закон Ома для ділянки: $I = U/R$; для повного кола: $I = \varepsilon / (R + r)$
- Опір провідника: $R = \rho \cdot l / S$
- Залежність від температури: $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$
- Послідовно: $R = R_1 + R_2$ | Паралельно: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$
- Потужність: $P = U \cdot I = I^2 \cdot R = U^2/R$
- Закон Джоуля — Ленца: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$

Питання для самоконтролю

1. Мідний провід довжиною 80 м має переріз 4 мм². Який його опір і яке падіння напруги при струмі 16 А?
2. Чому послаблене контактне з'єднання пожежонебезпечне і чому цей процес самопідсилюється?
3. ККД електронагрівача близький до 100 %. Чому ж електроопалення вважають найменш ефективним?

ЛЕКЦІЯ 15

СТРУМ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ

План лекції

1. Провідність металів, електролітів, газів і напівпровідників.
2. Електроліз. Електрохімічна корозія обладнання.
3. Явище Зеебека. Термопари.
4. Термометри опору й терморезистори. Правила встановлення датчиків.

1. Струм у різних середовищах

У металах носіями заряду є вільні електрони. Опір зумовлений їх розсіюванням на теплових коливаннях ґратки, тому з нагріванням він зростає.

У напівпровідниках з нагріванням з'являється більше вільних носіїв, і опір різко зменшується. Це і корисна властивість для терморезисторів, і причина теплового пробоя при перегріві приладів.

У газах струм можливий лише за наявності іонізації. При достатній іонізації розвивається самостійний розряд, і газ переходить у стан плазми. Електрична дуга застосовується у зварюванні, але вона ж виникає при розмиканні кіл під навантаженням і руйнує контакти — тому апарати захисту оснащують дугогасними камерами.

В електролітах носіями є іони обох знаків, і проходження струму супроводжується перенесенням речовини — це електроліз, описуваний законами Фарадея.

2. Електрохімічна корозія

Тема має пряме експлуатаційне значення. Коли два різні метали контактують у присутності електроліту, утворюється гальванічна пара: виникає різниця потенціалів, тече струм, і менш благородний метал руйнується.

Вода в системах теплопостачання завжди містить розчинені солі й тому є електролітом. Пряме з'єднання мідної та сталевих труби без діелектричної вставки створює гальванічну пару, у якій сталь інтенсивно руйнується саме в зоні контакту. Це поширена помилка монтажу, наслідки якої проявляються через місяці.

Розчинений у воді кисень різко прискорює корозію, тому в системах теплопостачання застосовують деаерацію — видалення розчинених газів кип'ятінням за зниженого тиску. Це не формальність регламенту, а необхідна умова довговічності обладнання.

Методи захисту: підбір сумісних матеріалів, діелектричні вставки між різнорідними металами, протекторний захист анодом із менш благородного металу, катодний захист із зовнішнім джерелом струму, водопідготовка.

3. Термопар

Ефект Зеебека: у замкненому колі з двох різнорідних провідників, спаї яких перебувають за різних температур, виникає термо-ЕРС, пропорційна різниці температур спаїв.

Це основа термопар — головного засобу вимірювання високих температур у топках, газоходах і на паропроводах, де контактні датчики опору вже не працюють. Термопара хромель-алюмель типу К має чутливість близько 41 мікрівольта на кельвін і робочий діапазон до 1200 градусів; платинородій-платинова типу S працює до 1600 градусів.

Принципово важливо: термопара вимірює саме різницю температур робочого й холодного спаїв, а не абсолютну температуру. Без урахування температури холодного спаю покази будуть систематично зміщені, причому влітку, коли щитове приміщення нагрівається, зміщення зростає. Сучасні перетворювачі виконують компенсацію холодного спаю автоматично.

Градувальна характеристика термопар нелінійна, тому перерахунок термо-ЕРС у температуру виконують за таблицями або поліномами, а не простим діленням на чутливість. Для оцінних розрахунків лінійне наближення прийнятне.

4. Термометри опору та встановлення датчиків

Термометр опору використовує залежність опору металу від температури. Стандартні датчики Pt100 і Pt1000 мають опір 100 і 1000 Ом при нуль градусів. Діапазон — приблизно до 600 градусів, точність вища за термопару, характеристика ближча до лінійної.

Опір з'єднувальних проводів додається до опору датчика й вносить систематичну похибку, завжди в бік завищення температури. Її усувають трипровідною або чотирипровідною схемою ввічнення. Для Pt1000 вплив проводів у десять разів менший, ніж для Pt100, — це аргумент на користь першого при великій довжині лінії.

Терморезистори на основі напівпровідників мають від'ємний температурний коефіцієнт і дуже високу чутливість, але вузький діапазон і нелінійність; застосовуються там, де потрібно фіксувати невеликі зміни.

Правила встановлення первинних перетворювачів прямо впливають з фізики. Датчик має бути занурений у потік на достатню глибину, інакше він міряє температуру, змішану з температурою стінки. Його не ставлять у застійній зоні, за засувкою чи одразу після коліна, де потік нерівномірний. Захисну гільзу заповнюють теплопровідною пастою, інакше повітряний прошарок створює теплову інерцію в десятки секунд. Датчик не розміщують поблизу джерел нагріву обмурівкою або сонячного нагріву. Порушення будь-якого з цих правил дає похибку, яку неможливо компенсувати жодним налаштуванням приладу.

Ключові формули

- Термо-ЕРС: $\varepsilon = \alpha \cdot (T_1 - T_2)$, для термопари типу К $\alpha \approx 41$ мкВ/К
- Термометр опору: $R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$, для платини $\alpha = 0,00385$ К⁻¹
- Закон Фарадея для електролізу: $m = k \cdot I \cdot t$
- Умова гальванічної пари: контакт різномірних металів у середовищі електроліту

Питання для самоконтролю

1. Термопара типу К має робочий спай при 600 °С і холодний при 25 °С. Яка термо-ЕРС?
2. Чому пряме з'єднання мідної та сталеві труби без діелектричної вставки є помилкою монтажу?
3. Назвіть три правила встановлення датчика температури в трубопроводі й поясніть фізичну причину кожного.

ЛЕКЦІЯ 16

МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ. ПРИНЦИП ДІЇ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

План лекції

1. Магнітне поле струму. Індукція та магнітний потік.
2. Сила Ампера і сила Лоренца. Магнітні властивості речовин.
3. Електромагнітна індукція. Правило Ленца. Вихрові струми.
4. Генератор і електродвигун. Частотне регулювання приводів.

1. Магнітне поле

Магнітне поле створюється рухомими зарядами, тобто струмами, і діє на рухомі заряди. Постійні магніти не є винятком: їхнє поле породжується мікрострумами всередині речовини.

Силовую характеристикою є магнітна індукція. Магнітний потік крізь поверхню дорівнює добутку індукції на площу і на косинус кута між полем і нормаллю. Якщо площа витка паралельна лініям поля, потік дорівнює нулю.

За поведінкою в полі речовини поділяють на діамагнетики, парамагнетики і феромагнетики. Останні підсилюють поле в сотні й тисячі разів, і саме на них тримається вся електротехніка. Вище точки Кюрі феромагнітні властивості зникають.

2. Сила Ампера і сила Лоренца

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера, пропорційна індукції, струму, довжині провідника й синусу кута між ними. Напрямок визначають правилом лівої руки. Саме ця сила створює обертальний момент в електродвигуні.

Сила Лоренца діє на окремий рухомий заряд, завжди перпендикулярна до швидкості, тому роботи не виконує і змінює лише напрямок руху.

Практичне застосування сили Лоренца у вашій спеціальності — електромагнітний витратомір. Теплоносій, що є слабким електролітом, рухається в магнітному полі; на іони діє сила Лоренца, розділяючи заряди поперек потоку, і між електродами виникає напруга, пропорційна швидкості потоку. Прилад не має рухомих частин і не створює гідравлічного опору, але працює лише з провідними середовищами: для дистильованої води чи мінеральних олів він непридатний.

3. Електромагнітна індукція

При зміні магнітного потоку крізь замкнений контур у ньому виникає ЕРС індукції. Закон Фарадея: ЕРС дорівнює швидкості зміни потоку, взятій з протилежним знаком. Найважливіше тут — саме швидкість зміни, а не величина потоку: сильне, але стале поле не наводить ніякої ЕРС у нерухомому контурі.

Правило Ленца: індукційний струм завжди протидіє причині, що його викликала. Це прямий наслідок закону збереження енергії — інакше система самопідсилювалася б і ми мали б вічний двигун. Практичний прояв: чим більше електричне навантаження генератора, тим більший механічний момент потрібно прикласти до його вала.

Вихрові струми виникають у масивних провідниках у змінному полі. Шкідливі в осердях трансформаторів і двигунів, де нагрівають метал; саме тому осердя набирають із тонких ізольованих пластин. Корисні в індукційних печах, індукційному нагріві деталей під посадку і магнітних гальмах.

Самоіндукція — виникнення ЕРС у контурі через зміну власного струму. При різкому розмиканні кола з обмоткою вона може багаторазово перевищити напругу живлення, спричиняючи іскріння й пробій ізоляції. Для захисту застосовують дугогасні пристрої, RC-ланцюги і зворотні діоди.

4. Електродвигун і частотне регулювання

Генератор перетворює механічну енергію на електричну, електродвигун виконує зворотне перетворення. Конструктивно одна машина може працювати в обох режимах, що використовується в рекуперативному гальмуванні.

Асинхронний двигун, найпоширеніший у теплоенергетиці, має обертове магнітне поле статора, яке наводить струми в короткозамкненому роторі; взаємодія цих струмів із полем створює момент. Частота обертання поля визначається частотою живлення й кількістю пар полюсів.

Звідси випливає фізична основа частотного регулювання. Змінюючи частоту живлення перетворювачем, змінюють частоту обертання насоса або вентилятора. Економічний ефект величезний і зумовлений законами подібності: витрата пропорційна частоті обертання, напір — її квадрату, а потужність на валу — кубу.

Кубічна залежність означає, що зниження обертів усього на двадцять відсотків зменшує споживану потужність приблизно вдвічі. Для порівняння, традиційне регулювання дроселюванням засувкою знижує витрату, але потужність при цьому майже не падає:

енергія просто розсіюється на гідравлічному опорі засувки. Саме тому заміна дросельного регулювання частотним є одним із найефективніших енергозберігальних заходів у котельнях.

Ключові формули

- Магнітний потік: $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$
- Сила Ампера: $F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$ | Сила Лоренца: $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$
- Закон Фарадея: $\varepsilon = -\Delta\Phi/\Delta t$
- ЕРС самоіндукції: $\varepsilon = -L \cdot \Delta I/\Delta t$
- Закони подібності для насоса: $Q \sim n$, $H \sim n^2$, $P \sim n^3$

Питання для самоконтролю

1. Провідник довжиною 0,5 м зі струмом 10 А розміщено в полі з індукцією 0,6 Тл перпендикулярно до ліній. Яка сила діє на провідник?
2. На скільки відсотків зменшиться споживана потужність насоса при зниженні обертів на 20 %?
3. Чому електромагнітний витратомір непридатний для вимірювання витрати мінерального масла?

ЛЕКЦІЯ 17

ЗМІННИЙ СТРУМ. ТРАНСФОРМАТОР. ПЕРЕДАВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА

План лекції

1. Змінний струм. Діюче значення.
2. Опори в колі змінного струму. Коефіцієнт потужності.
3. Трифазний струм. Трансформатор.
4. Передавання електроенергії. Основи електробезпеки.

1. Змінний струм і діюче значення

Змінний струм періодично змінює величину й напрямок за синусоїдним законом. Стандартна частота в Україні — 50 герц.

Оскільки миттєве значення весь час змінюється, вводять діюче значення — таке значення постійного струму, яке за той самий час виділило б у тому самому опорі таку саму кількість теплоти. Воно менше за амплітудне приблизно в 1,41 раза.

Усі щитові прилади показують діюче значення. Напруга мережі 230 В — це діюче значення, амплітудне становить близько 325 В. У розрахунках теплової дії струму підставляють діюче; підстановка амплітудного завищує потужність удвічі.

2. Опори та коефіцієнт потужності

Активний опір зумовлений перетворенням електричної енергії на теплоту і однаковий для постійного та змінного струму. Індуктивний опір виникає в котушках і зростає з частотою; ємнісний виникає в конденсаторах і з частотою зменшується.

Індуктивний і ємнісний опори називають реактивними: на них енергія не перетворюється на теплоту, а періодично накопичується в полі й повертається джерелу. Вони протилежні за дією і частково компенсують один одного — на цьому ґрунтується резонанс і практика компенсації реактивної потужності.

Розрізняють активну потужність, що виконує корисну роботу, реактивну, що циркулює між джерелом і навантаженням, і повну. Коефіцієнт потужності дорівнює відношенню активної до повної й показує, яка частка спожитого струму працює. Для електродвигунів насосів і вентиляторів він зазвичай 0,7–0,85.

Низький коефіцієнт потужності є реальною економічною проблемою підприємства: реактивна складова не виконує роботи, але завантажує мережу струмом, який нагріває проводи й потребує більшого перерізу кабелів і потужнішого трансформатора. Підвищують його конденсаторними компенсаційними установками.

3. Трифазний струм і трансформатор

Трифазна система складається з трьох ЕРС однакової частоти, зсунутих за фазою на третину періоду. Вона дозволяє передавати ту саму потужність меншою кількістю провідників і, головне, створює обертове магнітне поле, потрібне для роботи асинхронного двигуна.

Обмотки з'єднують зіркою або трикутником. При з'єднанні зіркою лінійна напруга більша за фазну приблизно в 1,73 рази: саме звідси пара 380/220 В.

Трансформатор перетворює змінну напругу однієї величини на змінну напругу іншої за незмінної частоти. Відношення напруг дорівнює відношенню кількості витків, потужність зберігається з точністю до ККД, який у сучасних трансформаторів становить 0,97–0,99.

Принципово: трансформатор працює лише на змінному струмі. Подання постійної напруги на первинну обмотку призводить до різкого зростання струму і виходу апарата з ладу, бо опір обмотки змінному струму визначається переважно індуктивністю, а постійному — лише малим активним опором.

4. Передавання електроенергії та електробезпека

Кількісне обґрунтування високовольтної передачі впливає із закону Джоуля — Ленца. Передаючи ту саму потужність, за вищої напруги маємо менший струм, а втрати пропорційні квадрату струму. Підвищення напруги з 380 В до 10 кВ зменшує струм приблизно в 26 разів, а втрати — приблизно в 700 разів. Різниця не у відсотках, а на порядки.

Звідси структура електропостачання: генератор — підвищувальний трансформатор — лінія високої напруги — понижувальний трансформатор — споживач.

Основи електробезпеки мають фізичну природу. Небезпечним для людини є струм, а не напруга сама по собі. Значення струму визначається напругою дотику і опором тіла, який залежить від вологості шкіри, взуття й стану підлоги і може змінюватися в десятки разів. У сухих умовах опір тіла вимірюється десятками кілоомів, у вологих падає до сотень омів — саме тому котельня, приміщення з підвищеною вологістю, належить до особливо небезпечних.

Пороговий відчутний струм становить близько 1 мА, невідпускний — близько 10–15 мА, фібриляційний — близько 100 мА. Небезпечність залежить і від шляху струму: найнебезпечніший — через грудну клітку.

Заземлення забезпечує спрацювання захисту і обмежує напругу на корпусі при пробії ізоляції. Воно не робить безпечним доторкання до струмовідних частин: захищає від

напруги, що з'явилася на корпусі, а не від прямого контакту з фазою. Пристрій захисного відключення реагує на струм витоку і спрацьовує саме тоді, коли частина струму йде через людину.

Ключові формули

- Діюче значення: $I = I_{\text{макс}} / \sqrt{2} \approx 0,707 \cdot I_{\text{макс}}$
- Індуктивний опір: $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$ | Ємнісний: $X_C = 1/(2\pi \cdot f \cdot C)$
- Повна потужність: $S = U \cdot I$ | Активна: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$
- Коефіцієнт трансформації: $k = N_1/N_2 = U_1/U_2$
- Зв'язок напруг у зірці: $U_L = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$
- Втрати в лінії: $\Delta P = I^2 \cdot R$, де $I = P / (U \cdot \cos \varphi)$

Питання для самоконтролю

1. Трансформатор має 1200 витків первинної обмотки й 60 витків вторинної при первинній напрузі 6000 В. Яка напруга на вторинній обмотці?
2. У скільки разів зменшаться втрати в лінії при підвищенні напруги передачі з 380 В до 10 кВ?
3. Чому котельню відносять до приміщень з підвищеною електричною небезпекою?

МОДУЛЬ IV. КОЛИВАННЯ, ХВИЛІ ТА ОПТИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 18

МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ. РЕЗОНАНС. ХВИЛІ. ЗВУК І УЛЬТРАЗВУК

План лекції

1. Гармонічні коливання. Маятники.
2. Вільні, згасаючі та вимушені коливання. Резонанс.
3. Хвилі. Звук, інфразвук, ультразвук.
4. Вібрація обладнання. Гідравлічний удар. Ультразвуковий облік теплоносія.

1. Гармонічні коливання

Коливання — процес, що повторюється в часі. Гармонічне коливання описується синусоїдою і характеризується амплітудою, періодом, частотою і фазою. Частота є величиною, оберненою до періоду.

Класичні моделі — пружинний і математичний маятники. Період пружинного маятника залежить від маси й жорсткості пружини, математичного — від довжини й прискорення вільного падіння, але не від маси.

Електромагнітні коливання в контурі з котушки й конденсатора описуються тими самими рівняннями, що й механічні. Ця математична тотожність дозволяє переносити висновки з одного класу явищ на інший.

2. Резонанс

Вільні коливання в реальній системі згасають через тертя або опір. Щоб підтримувати їх, потрібна зовнішня періодична сила — тоді коливання називають вимушеними, і система коливається з частотою цієї сили.

Резонанс настає, коли частота зовнішньої сили збігається з власною частотою системи. Амплітуда при цьому різко зростає, обмежена лише втратами в системі. Що менше згасання, то вища й гостріша резонансна крива.

Для теплоенергетики резонанс — насамперед загроза. Насосний агрегат, ротор якого має залишковий дисбаланс, створює періодичну силу з частотою обертання. Якщо ця частота збігається з власною частотою фундаменту, опори чи ділянки трубопроводу, амплітуда коливань зростає в рази, і руйнуються підшипники, зварні шви, кріплення.

Вивести систему з резонансу можна двома шляхами, обидва випливають із формули власної частоти: змінити частоту збудження, тобто оберти агрегата, або змінити власну частоту системи, змінивши її жорсткість чи масу — додавши ребро жорсткості, переставивши опору, змінивши виліт консолі. Збільшення згасання віброопорами зменшує амплітуду, але саму резонансну частоту не зміщує.

3. Хвилі, звук і ультразвук

Хвиля — поширення коливань у середовищі. Поздовжні хвилі мають напрямок коливань уздовж поширення, поперечні — уперек. Звук у газах і рідинах поширюється лише поздовжніми хвилями. Довжина хвилі дорівнює добутку швидкості на період.

Швидкість звуку у воді становить приблизно 1500 м/с, у повітрі близько 340 м/с, у сталі близько 5000 м/с. Ці значення потрібні для розрахунків ультразвукових приладів.

Звук чутного діапазону лежить приблизно між 20 Гц і 20 кГц. Нижче — інфразвук, вище — ультразвук. Виробничий шум нормується, бо тривала дія понад 80 дБ спричиняє втрату слуху; шум у котельнях створюють насоси, вентилятори, димососи й редуційні пристрої.

Ультразвук у теплоенергетиці має два основні застосування. Перше — неруйнівний контроль: ультразвукова дефектоскопія зварних стиків трубопроводів і вимірювання товщини стінки труби, що дозволяє виявити корозійне стоншення без розтину ізоляції. Друге — облік теплоносія.

4. Гідравлічний удар і ультразвуковий облік

Гідравлічний удар виникає при різкому закритті засувки: рухома маса рідини не може зупинитися миттєво, її кінетична енергія перетворюється на енергію стиснення, і виникає стрибок тиску, що поширюється трубопроводом як хвиля зі швидкістю звуку в рідині.

Величина стрибка за формулою Жуковського пропорційна густині рідини, швидкості поширення хвилі й початковій швидкості потоку. Для води при швидкості потоку 2 м/с стрибок може перевищити 2,5 МПа — у рази більше за робочий тиск мережі. Саме тому гідравлічний удар руйнує трубопроводи, зриває арматуру й деформує опори.

Ключовий параметр — час закриття. Якщо він більший за час пробігу хвилі до кінця ділянки і назад, удар називають непрямим, і стрибок тиску значно менший. Звідси всі технічні засоби: повільне закриття арматури, електроприводи з нормованим часом ходу, запобіжні клапани, повітряні ковпаки й гідроаккумулятори, плавний пуск і зупинка насосів.

Ультразвуковий лічильник теплоти працює на іншому принципі. Два перетворювачі надсилають сигнал навскіс через потік — один за течією, другий проти. За течією сигнал іде швидше, проти — повільніше, і різниця часів прямо пропорційна швидкості потоку. Знаючи переріз труби, обчислюють витрату, а разом із двома датчиками температури — спожиту теплову енергію.

Перевага методу в тому, що прилад не має рухомих частин і не створює гідравлічного опору. Обмеження теж фізичні: наявність бульбашок газу або механічних частинок розсіює сигнал, а нерівномірний профіль потоку спотворює результат — тому нормують прямі ділянки труби до і після приладу.

Ключові формули

- Період і частота: $T = 1/\nu$
- Період пружинного маятника: $T = 2\pi \cdot \sqrt{m/k}$
- Період математичного маятника: $T = 2\pi \cdot \sqrt{l/g}$
- Довжина хвилі: $\lambda = \nu \cdot T = \nu/\nu$
- Умова резонансу: ν зовнішньої сили = ν власна
- Формула Жуковського: $\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_0$
- Швидкість звуку у воді: $c \approx 1500$ м/с

Питання для самоконтролю

1. Насосний агрегат працює на 1450 об/хв. Яка частота збуджувальної сили від дисбалансу ротора в герцах?

2. Оцініть стрибок тиску при різкому закритті засувки, якщо швидкість води в трубі 2 м/с.
3. Чому для ультразвукового лічильника нормують довжину прямих ділянок труби до і після приладу?

ЛЕКЦІЯ 19

ШКАЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ. ХВИЛЬОВА ТА КВАНТОВА ОПТИКА

План лекції

1. Електромагнітні хвилі. Шкала випромінювань.
2. Теплове випромінювання. Закони Стефана — Больцмана і Віна.
3. Хвильова оптика: відбивання, заломлення, інтерференція.
4. Квантова оптика: фотон, фотоефект. Пірометрія і тепловізійне обстеження.

1. Шкала електромагнітних хвиль

Змінне електричне поле породжує змінне магнітне і навпаки; ця взаємна породжуваність робить можливою електромагнітну хвилю, яка не потребує середовища і поширюється у вакуумі зі швидкістю світла.

Уся шкала — від радіохвиль довжиною в кілометри до гамма-випромінювання з довжиною хвилі менше нанометра — є одним фізичним явищем, що відрізняється лише частотою. Видиме світло займає надзвичайно вузьку смугу приблизно від 380 до 760 нанометрів.

Для теплоенергетики найважливіший інфрачервоний діапазон, розташований одразу за червоною межею видимого. Саме в ньому лежить максимум випромінювання тіл із температурами, з якими має справу теплотехніка.

2. Теплове випромінювання

Теплове випромінювання виникає за рахунок внутрішньої енергії тіла. Випромінюють усі тіла з температурою вище абсолютного нуля, а не лише розжарені — просто при кімнатній температурі максимум лежить у далекій інфрачервоній області й оку не видимий.

Абсолютно чорне тіло — ідеальна модель, що повністю поглинає все падаюче випромінювання. Воно ж є найкращим випромінювачем: тіло, яке добре поглинає, добре й випромінює. Ступінь чорноти реальної поверхні показує, яку частку від випромінювання чорного тіла вона віддає.

Ступінь чорноти залежить від стану поверхні, а не лише від матеріалу. Окислена сталь має приблизно 0,8, полірована — менше 0,1, фарбована поверхня будь-якого кольору близько 0,9. Ця обставина є ключовою для всієї пірометрії.

Закон Стефана — Больцмана: потужність випромінювання пропорційна четвертому степеню абсолютної температури. Залежність надзвичайно різка: підвищення температури поверхні з 300 до 600 К збільшує випромінювання у шістнадцять разів. Тому ізоляція високотемпературних ділянок дає непропорційно великий ефект, а в топці котла випромінювання стає основним механізмом теплопередачі.

Закон зміщення Віна: довжина хвилі максимуму випромінювання обернено пропорційна абсолютній температурі. Саме тому розжарений метал змінює колір від темно-червоного до жовтого й білого при нагріванні.

3. Хвильова та квантова оптика

Закони відбивання й заломлення описують поведінку світла на межі середовищ; на них ґрунтуються лінзи й оптичні прилади. Інтерференція, дифракція і поляризація доводять хвильову природу світла.

Водночас хвильова теорія не змогла пояснити спектр теплового випромінювання і фотоефект. Планк припустив, що енергія випромінюється порціями — квантами, пропорційними частоті, а Ейнштейн показав, що світло й поширюється, і поглинається квантами — фотонами.

Фотоефект — виривання електронів із речовини під дією світла. Головний його закон: явище виникає лише за частоти вище певної межі, і нижче червоної межі не виникає за будь-якої інтенсивності. Пояснення просте: електрон поглинає фотон цілком, і якщо енергії одного фотона не досить на роботу виходу, кількість фотонів не допоможе.

Практичні застосування: фотореле, датчики полум'я в автоматичні пальників, фотоелектричні перетворювачі сонячних установок.

4. Пірометрія і тепловізійне обстеження

Пірометр вимірює температуру безконтактно за потоком теплового випромінювання. Це дозволяє контролювати температуру обмурівки котла, підшипників, паропроводів і контактних з'єднань у щитах без зупинки обладнання і без наближення до небезпечних зон.

Найпоширеніша помилка експлуатації — невірно заданий ступінь чорноти. Прилад обчислює температуру з виміряного потоку, припускаючи певний ступінь чорноти; якщо фактичний нижчий, покази будуть заниженими. На полірованій нержавіючій трубі пірометр показує температуру значно нижчу за реальну, бо бачить переважно відбите чуже випромінювання. Рішення просте: нанести на ділянку вимірювання матову фарбу або наклеїти стрічку з відомим ступенем чорноти.

Тепловізор будує теплове зображення за тим самим принципом. Інтерпретувати термограму треба обережно: холодніша ділянка може означати як кращу ізоляцію, так і просто інший ступінь чорноти поверхні.

Умови достовірного обстеження прямо впливають з фізики. Потрібна достатня різниця температур усередині й зовні, тому обстеження будівель проводять у холодну пору. Потрібна відсутність прямого сонячного нагріву поверхонь, тому знімають уночі або в похмуру погоду. Потрібна відсутність опадів і сильного вітру, бо вони змінюють теплообмін поверхні. І потрібно враховувати, що звичайне віконне скло непрозоре для теплового інфрачервоного випромінювання: навести тепловізор на об'єкт через вікно неможливо, прилад покаже температуру самого скла.

Ключові формули

- Зв'язок довжини хвилі й частоти: $c = \lambda \cdot \nu$, $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с
- Закон Стефана — Больцмана: $P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4$, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)
- Обмін із середовищем: $P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)$
- Закон зміщення Віна: $\lambda_{\text{макс}} = b/T$, $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К
- Енергія фотона: $E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda$; зручно: $E(\text{eV}) \approx 1240 / \lambda(\text{нм})$
- Рівняння Ейнштейна: $h \cdot \nu = A_{\text{вих}} + m \cdot v^2/2$

Питання для самоконтролю

1. У скільки разів зросте потужність випромінювання поверхні при нагріванні з 27 °C до 327 °C?
2. Чому пірометр, наведений на поліровану нержавіючу трубу, показує занижену температуру і що з цим робити?
3. Чому тепловізійне обстеження будівель проводять узимку і бажано вночі?

МОДУЛЬ V. АТОМНА ТА ЯДЕРНА ФІЗИКА

2 лекції, 4 години

ЛЕКЦІЯ 20

БУДОВА АТОМА. СПЕКТРИ. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ. РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

План лекції

1. Досліди Резерфорда. Ядерна модель атома.
2. Постулати Бора. Енергетичні рівні.
3. Види спектрів. Спектральний аналіз.
4. Рентгенівське випромінювання. Дефектоскопія зварних стиків.

1. Ядерна модель атома

Досліди Резерфорда з розсіювання альфа-частинок показали, що майже вся маса атома зосереджена в надзвичайно малому позитивно зарядженому ядрі, навколо якого рухаються електрони. Розміри ядра приблизно в сто тисяч разів менші за розміри атома — атом майже цілком порожній.

Модель мала суперечність: за класичною електродинамікою електрон, рухаючись по колу, безперервно випромінював би і за мізерну частку секунди впав на ядро. Атоми ж стабільні.

2. Постулати Бора

Бор розв'язав суперечність двома постулатами. Перший: атом може перебувати лише в певних стаціонарних станах із дискретними значеннями енергії, і в цих станах не випромінює. Другий: випромінювання або поглинання відбувається при переході між станами, а енергія фотона дорівнює різниці енергій цих станів.

Дискретність енергетичних рівнів є фундаментальною властивістю мікросвіту, а не наслідком недосконалості моделі. Саме вона пояснює лінійчатий характер атомних спектрів.

3. Спектри та спектральний аналіз

Суцільний спектр дають розжарені тверді тіла й рідини, а також гази під високим тиском — у ньому присутні всі довжини хвиль. Саме такий спектр має теплове випромінювання.

Лінійчатий спектр дають розріджені атомарні гази. Набір ліній унікальний для кожного хімічного елемента — своєрідний відбиток пальця. Спектр поглинання утворюється, коли світло із суцільним спектром проходить крізь газ: газ поглинає саме ті лінії, які сам випромінює.

Спектральний аналіз визначає хімічний склад за спектром: наявність лінії свідчить про присутність елемента, інтенсивність дозволяє оцінити кількість. Метод дуже чутливий і не потребує великої проби.

У теплоенергетиці головне застосування — аналіз димових газів, основний інструмент налагодження режиму горіння. Вміст кисню показує надлишок повітря, поява оксиду вуглецю свідчить про неповне згорання. Сучасні газоаналізатори працюють переважно на поглинанні інфрачервоного випромінювання: кожен газ поглинає свої характерні смуги, і

за ослабленням сигналу визначають концентрацію. Спектральні методи застосовують також для контролю якості живильної води й вхідного контролю матеріалів.

4. Рентгенівське випромінювання і дефектоскопія

Рентгенівське випромінювання отримують у трубці, де розігнані високою напругою електрони гальмуються об анод. Частина їх кінетичної енергії перетворюється на короткохвильове електромагнітне випромінювання з високою проникною здатністю.

Проникна здатність залежить від густини й товщини матеріалу: що щільніший матеріал, то сильніше він поглинає. На цьому ґрунтується радіографічний контроль зварних стиків трубопроводів теплових мереж. Плівку або детектор розміщують з одного боку шва, джерело з іншого; у місцях пор, тріщин, непроварів чи шлакових включень матеріалу менше, поглинання слабше, і дефект проявляється темнішою ділянкою на знімку.

Радіографія виявляє об'ємні дефекти — пори й включення — краще за ультразвук, тоді як ультразвуковий контроль краще знаходить площинні дефекти на кшталт тріщин і непроварів. Тому для відповідальних стиків застосовують обидва методи, а не обирають між ними.

Робота з джерелами рентгенівського та гамма-випромінювання потребує дотримання правил радіаційної безпеки: обмеження часу перебування, дотримання відстані, застосування захисних екранів і огороження зони контролю. Принципи захисту розглядаються в наступній лекції.

Ключові формули

- Другий постулат Бора: $h \cdot \nu = E_2 - E_1$
- Енергія рівнів атома водню: $E_n = -13,6/n^2 \text{ eV}$
- Довжина хвилі переходу: $\lambda = h \cdot c / (E_2 - E_1)$
- Ослаблення випромінювання в матеріалі: $I = I_0 \cdot e^{(-\mu \cdot d)}$

Питання для самоконтролю

1. Чому за класичною електродинамікою атом мав би бути нестабільним і як цю суперечність розв'язав Бор?
2. Про що свідчить підвищений вміст оксиду вуглецю в димових газах, а про що — підвищений вміст кисню?
3. Чому для контролю відповідальних зварних стиків застосовують і радіографію, і ультразвук, а не один із методів?

ЛЕКЦІЯ 21

БУДОВА ЯДРА. РАДІОАКТИВНІСТЬ. ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА. ДОЗИ ТА РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ

План лекції

1. Склад ядра. Ядерні сили. Дефект маси й енергія зв'язку.
2. Радіоактивність. Закон радіоактивного розпаду.
3. Ядерні реакції. Реактор і АЕС. Термоядерний синтез.
4. Дози опромінення та принципи захисту. Сучасна фізична картина світу.

1. Ядро та енергія зв'язку

Ядро складається з протонів і нейтронів, утримуваних ядерними силами — найпотужнішими з відомих, але діючими лише на надзвичайно малих відстанях.

Маса ядра завжди менша за суму мас окремих нуклонів. Ця різниця називається дефектом маси, і їй відповідає енергія зв'язку, пов'язана з масою через співвідношення Ейнштейна.

Питома енергія зв'язку — енергія на один нуклон — максимальна для елементів середини таблиці, поблизу заліза. Це має вирішальне значення: енергія вивільняється при поділі важких ядер і при синтезі легких, бо в обох випадках система рухається до стану з більшою питомою енергією зв'язку. Реакції у зворотному напрямку енергію поглинають.

2. Радіоактивність

Радіоактивність — самочинне перетворення нестійких ядер із випромінюванням частинок. Альфа-випромінювання є потоком ядер гелію: найбільша іонізуюча і найменша проникна здатність, затримується аркушем паперу. Бета-випромінювання — потік електронів, проникає крізь кілька міліметрів алюмінію. Гамма-випромінювання електромагнітне, має найбільшу проникну здатність і потребує захисту зі свинцю чи бетону.

Закон радіоактивного розпаду має статистичний характер: момент розпаду конкретного ядра передбачити неможливо, але для великої кількості частка розпадів за одиницю часу стала. Період напіврозпаду — час, за який розпадається половина наявних ядер.

Ця величина є незмінною характеристикою ізотопу: її неможливо змінити ані нагріванням, ані тиском, ані хімічною обробкою. Саме тому проблема поводження з радіоактивними відходами не має швидкого технологічного розв'язку.

3. Ядерна енергетика

При поділі важкого ядра вивільняється енергія й вилітають кілька нейтронів, здатних спричинити поділ наступних ядер — виникає ланцюгова реакція. Мінімальну масу, за якої реакція самопідтримується, називають критичною.

Керованість реакції в енергетичному реакторі забезпечують два засоби. Сповільнювач знижує швидкість нейтронів до значень, за яких імовірність поділу максимальна. Поглинальні стрижні вбирають надлишкові нейтрони, дозволяючи утримувати реакцію на рівні самопідтримання без розгону.

Далі процес суто теплотехнічний і вам добре знайомий: теплота нагріває теплоносії першого контуру, той через парогенератор передає теплоту другому контуру, пара обертає турбіну, відпрацьована пара конденсується. Атомна станція з погляду теплотехніки — це паросиловий цикл із незвичайним джерелом теплоти, і всі закони термодинаміки, вивчені в модулі II, працюють там без змін, зокрема обмеження другого закону на ККД.

Атомна генерація забезпечує значну частку виробництва електроенергії в Україні й несе базове навантаження енергосистеми.

Термоядерний синтез — злиття легких ядер із вивільненням енергії. Він живить Сонце і є принципово доступнішим за запасами палива, але потребує температур у десятки мільйонів градусів і утримання плазми, тому промислового застосування поки не має.

4. Дози та радіаційний захист

Поглинена доза — енергія іонізуючого випромінювання, поглинена одиницею маси речовини, вимірюється в греях. Різні види випромінювання за однакової поглиненої дози

спричиняють різний біологічний ефект, тому вводять еквівалентну дозу, що враховує коефіцієнт якості, і вимірюють її в зівертах. Нормують саме еквівалентну дозу. Активність джерела вимірюють у бекерелях.

Захист ґрунтується на трьох принципах, кожен із чіткою фізичною основою. Захист часом: доза пропорційна тривалості опромінення. Захист відстанню: інтенсивність спадає обернено пропорційно квадрату відстані, тому подвоєння відстані зменшує дозу вчетверо. Захист екрануванням: матеріал поглинає випромінювання за експоненціальним законом, і вибір матеріалу залежить від типу — свинець проти гамма, легкі водневмісні матеріали проти нейтронів.

Альфа-випромінювання при зовнішньому опроміненні практично нешкідливе, бо затримується шаром шкіри, але при потрапленні всередину організму є найнебезпечнішим саме через високу іонізуючу здатність. Тому в зонах з можливим забрудненням основну увагу приділяють захисту органів дихання, а не екрануванню.

5. Сучасна фізична картина світу

Курс завершено, і варто озирнутися. Ви почали з похибок вимірювання — з розуміння, що будь-яке число має межі достовірності. Далі був закон збереження енергії, який заборонив отримувати щось із нічого. Потім другий закон термодинаміки, який пояснив, чому навіть ідеальний котел не має стовідсоткового ККД. Електродинаміка показала, звідки береться обертання насоса й чому енергію передають під високою напругою. Квантова фізика пояснила, як тепловізор бачить те, чого не бачить око.

Класична фізика чудово описує світ у звичних масштабах і швидкостях, але має межі: на малих масштабах працює квантова механіка, на великих швидкостях — теорія відносності. Знати межі застосовності моделі так само важливо, як знати саму модель. З цього твердження курс починався, ним і завершується.

У наступних семестрах ви зустрінете ці самі закони в іншому вигляді. Теоретичні основи теплотехніки — розгорнута термодинаміка. Гідравліка — розгорнута механіка рідин. Електротехніка — розгорнута електродинаміка. Жодного нового фундаментального закону там не буде: будуть детальні методики розрахунку на тій самій основі.

Головне, що варто винести з курсу, — звичка ставити запитання «чому». Обладнання ламається, режими відхиляються від паспортних, покази приладів суперечать очікуванням. Фахівець, який знає лише інструкцію, у таких ситуаціях безпорадний; фахівець, який розуміє фізику процесу, знаходить причину.

І зовсім практичне наостанок. Перевіряйте розмірність. Це найпростіший і найнадійніший спосіб зловити власну помилку, і він працюватиме все ваше професійне життя.

Ключові формули

- Дефект маси: $\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{ядра}}$
- Енергія зв'язку: $E = \Delta m \cdot c^2$, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с
- Закон радіоактивного розпаду: $N = N_0 \cdot 2^{-(t/T)}$
- Активність: $A = \lambda \cdot N$, вимірюється в бекерелях
- 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 ізотопу становить 6 годин. Яка частка ядер залишиться через добу?
3. Чому альфа-випромінювання майже нешкідливе ззовні, але найнебезпечніше при потраплянні всередину організму?

МОДУЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ № 2 проводиться після завершення модуля V і охоплює матеріал лекцій 13–21.