

Лекція 6

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

5.1. Альтернативні способи і ресурси оптимізації технічних об'єктів

Основні поняття

Оптимізація (англ. optimization, optimisation) — процес надання будь-чому найвигідніших характеристик, співвідношень (наприклад, оптимізація виробничих процесів і виробництва, енерговикористання тощо).

Задача оптимізації — задача знаходження точки (точок) екстремуму, або декількох екстремумів заданої функції.

Оптимальний (від лат. optimus) — найкращий з можливих варіантів чогось, найвідповідніший певному завданню, умовам. Наприклад, максимальна продуктивність устаткування чи відповідний мінімуму витрат по закінченому виробничому циклу. Оптимальні розрізи — значення розмірів чи конструкції технологічного елемента, зумовлені спеціальним розрахунком для досягнення максимального виробничого ефекту, мінімальних трудових чи грошових витрат та ін. критерію.

Критерій оптимальності — основний показник якості роботи системи, фундаментальне поняття системи оптимального функціонування об'єктів (машин, процесів, підприємства, галузі, економіки загалом). В економіці, наприклад, критерієм оптимальності може бути максимум прибутку, мінімум трудових затрат, мінімальний час досягнення мети тощо.

Математичною оптимізацією або математичним програмуванням в математиці, інформатиці та дослідженні операцій називають відбір найкращого елемента (за певним критерієм) з множини доступних альтернатив. У найпростішому випадку задача оптимізації полягає у знаходженні екстремуму (мінімуму або максимуму) дійсної функції шляхом систематичного вибору вхідних значень з дозволеного набору та обчислення значення функції.

Подальші узагальнення теорії та методів оптимізації до інших формулювань становлять велику область прикладної математики.

Оптимізація охоплює знаходження «найкращих можливих» значень деякої цільової функції в межах області визначення, включаючи різні типи цільових функцій та різні типи областей значення (Рис. 5.1).

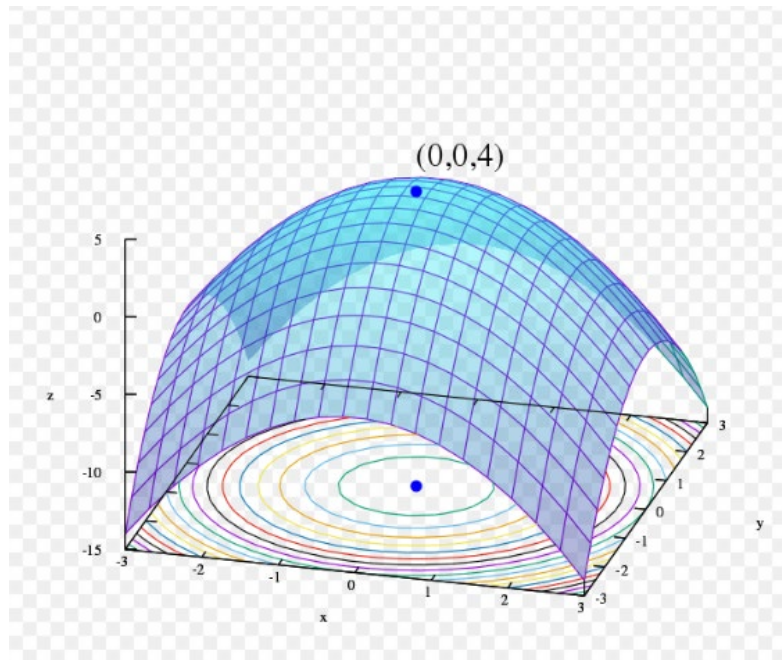


Рис. 5.1. Графік параболіду, заданого рівнянням $z = f(x, y) = -(x^2 + y^2) + 4$.
Глобальний максимум в точці $(x, y, z) = (0, 0, 4)$.

Методи оптимізації класифікують відповідно до задач оптимізації:

- *Локальні методи*: сходяться до якого-небудь локального екстремуму цільової функції. У разі унімодальної цільової функції, цей екстремум єдиний, і буде глобальним максимумом/мінімумом.
- *Глобальні методи*: мають справу з багатоекстремальними цільовими функціями. При глобальному пошуку основною задачею є виявлення тенденцій глобальної поведінки цільової функції.

Існуючі в цей час методи пошуку можна розбити на три великі групи:

1. детерміновані;
2. випадкові (стохастичні);
3. комбіновані.

За критерієм вимірності допустимої множини, методи оптимізації поділяють на методи *одномірної оптимізації* і методи *багатомірної оптимізації*.

За видом цільової функції й допустимої множини, задачі оптимізації й методи їхнього розв'язання можна розділити на такі класи:

- Задачі оптимізації, у яких цільова функція $f(x)$ і обмеження є лінійними функціями, розв'язуються так званими методами лінійного програмування.
- В іншому разі мають справу із задачею нелінійного програмування і застосовують відповідні методи.

За вимогами до гладкості й наявності в цільової функції частинних похідних, їх також можна розділити на:

- прямі методи, що вимагають тільки обчислень цільової функції в точках наближень;
- методи першого порядку: вимагають обчислення перших частинних похідних функції;
- методи другого порядку: вимагають обчислення других частинних похідних.

Крім того, оптимізаційні методи поділяються на такі групи:

- аналітичні методи;
- чисельні методи;
- графічні методи.

Крім того, розділами математичного програмування є параметричне програмування, динамічне програмування і стохастичне програмування. Математичне програмування використовується при розв'язанні оптимізаційних задач дослідження операцій.

Спосіб знаходження екстремуму повністю обумовлюється класом задачі. Але перед тим, як отримати математичну модель, потрібно виконати 4 етапи моделювання:

- Визначення меж системи оптимізації (факторний простір)
- Вибір змінних проєктування (керованих змінних)
- Визначення обмежень на керовані змінні
- Вибір числового критерію оптимізації (цільової функції)

5.2. Оптимізація технічних об'єктів із застосуванням планування експерименту

Планування експерименту – сучасна поширена процедура вибору числа та умов проведення дослідів, необхідних та достатніх для вирішення задачі досліджень, зокрема, задач оптимізації із заданою точністю.

5.2.1. Підходи до планування експерименту, експериментальні плани

Розрізняють два підходи планування експерименту:

- **класичний**, при якому по черзі змінюється кожен фактор до визначення часткового максимуму при постійних значеннях інших факторів,
- **статистичний**, де одночасно змінюють багато факторів.

При цьому суттєвим є:

- мінімізація числа дослідів;
- одночасне варіювання всіма параметрами;
- використання математичного апарата, який формалізує дії експериментатора;
- вибір чіткої стратегії, що дозволяє ухвалювати обґрунтовані рішення після кожної серії експериментів.

Загалом розрізняють такі експериментальні плани:

- дисперсійного аналізу;
- відбору суттєвих факторів;
- багатфакторного аналізу;
- отримання поверхні відгуку;
- динамічних задач планування;
- вивчення механізмів явищ;
- побудови діаграм «склад — властивість»,
- побудови діаграм «склад — стан».

Для складання математичних моделей, що описують область високої кривизни поверхні відгуку, використовуються плани другого порядку. У цьому випадку застосовується ортогональне центральне композиційне планування і ротатабельне планування.

При цьому ротатабельне планування дозволяє отримати більш точний математичний опис у порівнянні з ортогональним центральним композиційним плануванням. Це досягається завдяки збільшенню дослідів в центрі плану та спеціальному вибору величини зоряного плеча.

Англійськими хіміками Боксом і Вілсоном запропоновано метод крутого сходження (рух по градієнту), що дозволяє найкоротшим шляхом визначити координати екстремуму досліджуваного процесу. Для математичного опису екстремальної області застосовують різні методи планування експерименту, в основі яких лежить представлення

екстремальної області (рис. 5.1) поліномами другого порядку, що адекватно описують досліджуваний процес.

До таких планів належить план Бокса — Бенкена — один з різновидів статистичних планів, що застосовуються при плануванні наукових та, особливо, промислових експериментів. Ці плани дозволяють отримувати максимальну кількість об'єктивної інформації про вплив чинників, що вивчаються, на виробничий процес за допомогою найменшого числа спостережень (дослідів). Вони належать до симетричних некомпозиційних трирівневих планів другого порядку і являють собою поєднання дворівневого $(-1, +1)$ повного факторного експерименту з неповноблочним збалансованим планом. Область планування — гіперкуб, причому кожен із чинників набуває значення на трьох рівнях: $-1, 0$ і $+1$. Плани Бокса — Бенкена за рядом статистичних характеристик перевершують центрально-композиційні ортогональні і ротатабельні плани, що широко застосовуються в промисловому експерименті.

Для вивчення промислового процесу застосовують еволюційні планування експерименту, де дослідник повинен весь час пристосовуватися до умов виробництва, що змінюються. Специфічним є планування з відсіюванням експериментів.

Сучасна теорія планування експерименту склалася у 1960-х роках. Її методи тісно пов'язані з теорією наближення функцій та математичним програмуванням. Розроблено оптимальні плани і досліджено їхні властивості для широкого класу моделей.

Планування експерименту та обробка даних здійснюється за допомогою комп'ютерних програм: Mathcad, Statistica, Axum7, Statgraphics, Simulink та ін.

5.2.2. Планування і оптимізація технологічних об'єктів на основі системи планування експерименту STATGRAPHICS

Комп'ютерна система планування експерименту, зокрема, така як STATGRAPHICS Plus for Windows, істотно змінила практику моделювання. Якщо раніше це вважалося сферою обмеженого кола кваліфікованих професіоналів в математичній статистиці, які володіють у досить повному обсязі її тонкощами, то сьогодні планування стало доступне широкому колу фахівців в інших галузях знань, зокрема, у електротехніці. Працюючи з модулем планування експерименту Design of Experiment (DOE), дослідник отримує повну впевненість в тому, що проведений ним статистичний аналіз даних здійснюється найбільш коректним чином. Модуль DOE автоматично проводить дослідника

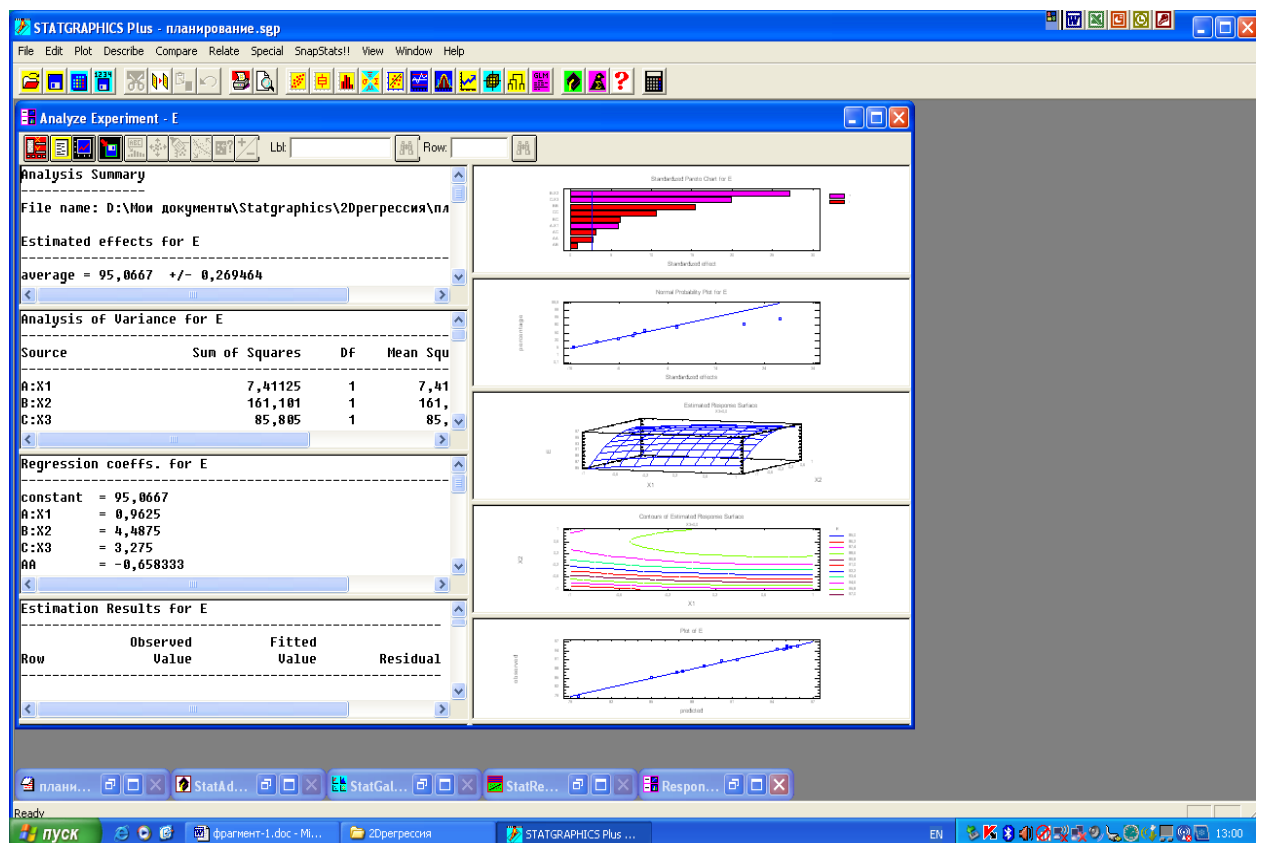


Рис.5.2 – Робочий інтерфейс програми Statgraphics при роботі в модулі DOE

через весь цикл планування експерименту. DOE допомагає сформулювати критерій оптимальності плану експерименту, пропонує ряд оптимальних планів і наводить всі необхідні табличні та графічні викладки на кожному етапі проведення експерименту.

У всіх видах експериментів результати та висновки залежать від кількості різнорідних даних. Тому перша послуга, яку надає модуль DOE – допомога в організації збору інформації про досліджуваний об'єкт, для чого передбачена можливість генерації великої кількості як стандартних, так і нестандартних робочих таблиць, їх редагування і роздрук (рис. 5.2).

У плануванні експерименту значна увага приділяється способам відображення експериментальної інформації. У STATGRAPHICS включений весь спектр графічних процедур, які дозволяють підбирати, а також ясно і точно «простежувати» особливості аналізованого матеріалу, починаючи від карт Парето і до тривимірних поверхонь відгуку різного виду і контурних кривих, на яких можна простежити факторні координати оптимуму. При цьому всі графічні відображення є інтерактивними. Можна (як в автоматичному, так і ручному режимах) підібрати найбільш ілюстративні рисунки та графіки експериментальних планів, у супроводі відповідних чисельних

результатів.

Модуль планування експерименту програми STATGRAPHICS Plus for Windows надає повний набір різних типів планів аж до тих, в яких враховуються взаємодії аналізованих факторів по восьмий порядок включно. Крім того, за бажанням експериментатора можуть бути розглянуті взаємодії більш високого порядку. Все це разом узятє, включаючи експертну консультаційну систему StatAdvisor, що допомагає інтерпретувати результати і виявляти вади в проведеному аналізі, дозволяє говорити про модуль DOE, як про високорозвинений інструмент, що суттєво підвищує ефективність планування експерименту.

Модуль DOE програмного пакету STATGRAPHICS широко використовується при дослідженні технологічних процесів. Більшість з цих процесів носять масовий статистичний характер і їхній опис неможливий без застосування методів математичної статистики. У більшості випадків завдання дослідника зводиться до розробки статистичної регресійної моделі процесу у вигляді поліноміальної залежності вихідного параметра (параметрів), а саме цільової функції або параметра оптимізації від ряду вхідних.

Основні об'єкти наукових досліджень

Визначення (вибір) об'єктів наукових досліджень – широке, спеціальне питання, яке ми розглянемо у рамках цієї лекції.

У енергетичній галузі досліджують ***техніко-технологічні процеси і пристрої, економічні, логістичні процеси.***

Економічні процеси є предметом вивчення економіки промисловості. **Логістичні процеси** (транспорт) тісно з ними пов'язані. **Техніко-технологічні процеси і пристрої** досліджують в рамках інженерних дисциплін.

При цьому слід зауважити, що «чисто» економічних, техніко-технологічних чи логістичних об'єктів майже не існує, за винятком окремих локальних задач.

Як правило, економічні і логістичні об'єкти базуються (і використовують) техніко-технологічні компоненти.

А шуканим параметром при дослідженні техніко-технологічних об'єктів є оптимальні (раціональні) режими їх роботи. При цьому шукана функція відгуку, критерій оптимізації об'єктів враховує економічну складову.

У енергетичній інженерії, зокрема, в теплоенергетиці та гідроенергетиці у загальному випадку об'єктом дослідження може бути **або спосіб (технологія), або пристрій.**

Відмінні ознаки способу:

- перелік операцій технологічного чи інш. процесу;
- порядок слідування операцій;
- режимні параметри операцій.

Пристрій — сукупність технічних засобів, окремий технічний засіб або його складова частина, які призначені для виконання однієї або кількох заданих

функцій. Пристрої можна класифікувати за фізичним принципом їх роботи, за призначенням:

- механічний, пневматичний, гідравлічний, оптичний, електричний, електронний пристрій тощо;
- електротехнічний, радіотехнічний, побутовий пристрій тощо.

Основні відмінні ознаки пристрою:

- набір елементів (деталей),
- форма і матеріал цих елементів;
- взаємозв'язки елементів.

Розглянемо основні можливі об'єкти наукового дослідження у теплоенергетиці та гідроенергетиці.

ГІДРОЕНЕРГЕТИКА

Гідроелектростанції

Різновиди ГЕС

ГЕС, будівля якої є частиною греблі, називається русловою (наприклад, Кременчуцька, Київська ГЕС).

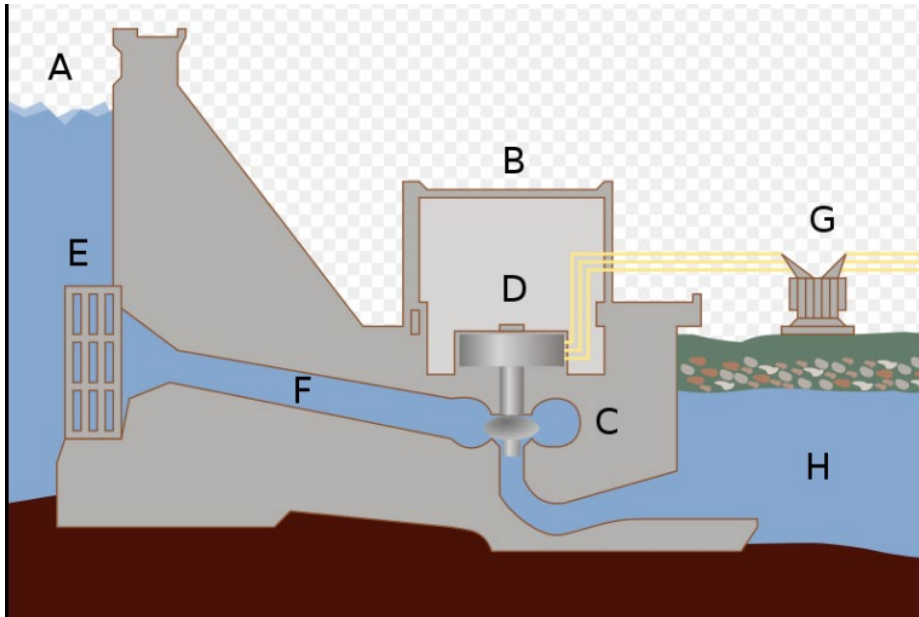
Якщо будівля розташована окремо, біля основи греблі на протилежному від водосховища боці, то така ГЕС називається пригреблевою (наприклад, ДніпроГЕС).

ГЕС, до якої вода подається трубами, називається дериваційною (наприклад, Інгурський каскад на Кавказі).

Гідроакумулявальні електростанції (ГАЕС) з оборотними гідроагрегатами (що працюють як генератори струму або водяні помпи) в години малого споживання електроенергії перекачують воду з водосховища у верхній басейн, а в години пікових навантажень виробляють енергію як звичайні ГЕС (наприклад, Київська ГЕС, Дністровська ГАЕС).

ГЕС з використанням енергії припливів називають припливними (наприклад, ГЕС у Франції на річці Ранс).

Гідроелектростанції – використовують перепад води для генерації електроенергії. Турбіна перетворює кінетичну енергію води в механічну енергію. Потім генератор перетворює механічну енергію турбіни в електричну енергію.



Дамба гідроелектростанції (руслової і пригреблевої) А - водосховище, В - електростанція, С - турбіна, D - генератор, Е - водозабірна труба, F - напірний трубопровід, G - міжміські лінії електропередач, Н - річка

Основні об'єкти дослідження: гідротурбіна, електрогенератор.

Дериваційна ГЕС

(на прикладі Інгузької ГЕС)

В межах проєкту річка Інгури перекрита бетонною арковою греблею заввишки 272 метри, довжиною 605 м та товщиною від 10 (по гребеню) до 90 (по основі) м, яка потребувала 3,8 млн м³ матеріалу (крім того, здійснена екскавація 3,4 млн м³ ґрунту). Вона утримує водосховище з об'ємом 1110 млн м³, в тому числі 676 млн м³ корисний об'єм.



Зі сховища ресурс потрапляє до дериваційного тунелю завдовжки 15 км з діаметром 9,5 метра, який прокладений під водорозділом з річкою Еріскалі. Остання первісно була лівою притокою Окумі (впадає у Чорне море північніше від устя Інгури), проте наразі

каналізована та самостійно виведена у море. Тунель здатен транспортувати до 450 м³/сек, а його будівництво потребувало вибірки 1,7 млн м³ породи та використання 490 тис м³ бетону. На шляху існують два акведуки для переходу над долинами Олорі та верхньої Ерісцкалі довжиною 210 та 91 м відповідно.

Споруджений у підземному виконанні на глибині 100 метрів машинний зал станції має розміри 127х22 м при висоті 51 м. При його створенні вибрано 685 тис. м³ породи та використано 277 тис м³ бетону.

Основне обладнання ГЕС становлять п'ять турбін типу «Френсіс» потужністю 260 МВт кожні, які при напорі у 325 м передбачені забезпечувати виробництво 4430 млн кВт-год електроенергії на рік.

Відпрацьована вода по відвідному тунелю завдовжки 3,2 км з перетином 10,8х13,2 м транспортується на Ерісцкалі Гальського водосховища, яке живить ГЕС Варднілі І. Прокладання цього тунелю потребувало виймання 551 тис. м³ породи та 139 тис. м³ бетону.

Об'єкти дослідження: гідротурбіна, електрогенератор, трубопровідний транспорт.

Гідроакумулююча електростанція

На гідроакумулюючих електростанціях (ГАЕС) при надлишку електроенергії насос закачує воду у верхній резервуар ГАЕС, перетворюючи електричну енергію на потенціальну енергію стовпа води. Накопичена вода використовується для виробництва електроенергії в гідротурбінах для покриття піків споживання.



Об'єкти дослідження: гідротурбіна, електрогенератор, трубопровідний транспорт.

Припливні гідроелектростанції

Припливна електростанція (ПЕС) — особливий вид гідроелектростанції, що використовує енергію припливів, а фактично кінетичну енергію обертання Землі у залежності від інших астрономічних тіл.

Припливні електростанції будують на узбережжі морів, де гравітаційні сили Місяця та Сонця двічі на добу змінюють рівень води. Коливання можуть досягати 13 метрів.

Існує думка, що робота припливних електростанцій гальмує обертання Землі. Однак з огляду на колосальну масу Землі, вплив припливних електростанцій непомітний. Кінетична енергія обертання Землі ($\sim 10^{29}$ Дж) настільки велика, що робота припливних станцій потужністю 1000 ГВт буде збільшувати тривалість добі на 9 порядків менше природного гальмування ($\sim 2 \times 10^{-5}$ с на рік).

Для отримання енергії затоку або гирло річки перекривають греблею, в якій встановлено гідроагрегати, що можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі насоса (для перекачування води у водосховище для подальшої роботи у відсутність припливів і відпливів). В останньому випадку вони називаються гідроакумулюючими електростанціями. Принцип акумулювання енергії такий: під час припливу у водосховище закачується додаткова кількість води, котра після падіння зовнішнього рівня може бути спущена, з додаткової висоти утвореної зміною зовнішнього рівня.

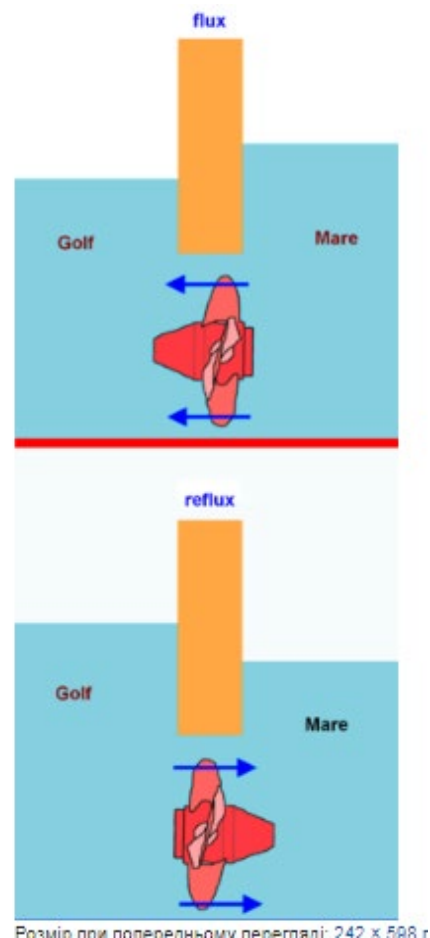
Розташування припливних електростанцій в гирлах річок, має значний вплив на екосистему. Через це багато урядів останнім часом неохоче дають згоду на будівництво таких станцій.

Перша електростанція такого типу була запущена в 1966 році у французькому містечку Сен-Мало на Ла-Манші.

ПЕС є у Франції, Великій Британії, Канаді, Китаї, Індії, США та інших країнах. ПЕС «Ля Ранс», побудована в естуарії річки Ранс (Північна Бретань) має найбільшу в світі дамбу, її довжина становить 800 м. Гребля також служить мостом, по якому проходить високошвидкісна траса, що з'єднує міста Сен-Мало і Дінард. Потужність станції становить 240 МВт.

Об'єкти дослідження: **гідротурбіна, електрогенератор,**

Теплоенергетика



Основу всієї енергетичної системи світу становить **теплоенергетика**.

2/3 електростанцій у світі працюють на теплових циклах, переважно Цикл Ренкіна (Rankin cycle) на водяній парі та Цикл Брайтона у газовій турбіні.

Теоретичну основу теплоенергетики становить термодинаміка.

Теплоенергетика — галузь енергетики, в якій електрична або теплова енергія виробляється з використанням хімічної енергії органічного палива.

Основу всієї енергетичної системи світу становить теплоенергетика. 2/3 електростанцій у світі працюють на теплових циклах, переважно Цикл Ренкіна (Rankin cycle) на водяній парі та Цикл Брайтона у газовій турбіні.

Методи виробництва теплової енергії

1. Спалювання органічного палива в окисному середовищі, заснований на використанні теплоти екзотермічних хімічних реакцій.
2. Самокерована ланцюгова ядерна реакція поділу важких ядер трансуранових елементів.
3. Перетворення електричної енергії на теплову.
4. Перетворення сонячної енергії на теплову.
5. Використання теплоти геотермальних вод.
6. Перетворення теплової енергії теплоносія з низьким енергетичним потенціалом на високопотенційну теплову енергію іншого теплоносія з витратами деякої кількості інших видів енергії, що підводяться ззовні (наприклад, теплові насоси, що використовують електроенергію)

Теоретичну основу теплоенергетики становить термодинаміка, тепломасообмін та гідродинаміка.

Головним завданням теплоенергетики є проблема раціонального використання теплової енергії в промисловості та комунальному господарстві. Предметом вивчення теплоенергетики є термодинамічні цикли і схеми енергоустановок, ступінь їх досконалості, питання горіння палива, теплообмін, теплофізика, властивості робочих тіл і теплоносіїв та ін.

Перетворення теплової енергії здійснюється в різних машинах, апаратах та пристроях, які поділяються на:

- генеруючі: **Теплогенератор**, піч
- акумулюючі: Сонячний колектор
- перетворюючі: парова турбіна
- транспортуючі: Теплотраса, Теплообмінник
- споживачі: Опалювальний прилад

Технічну основу сучасної теплоенергетики складають теплосилові установки теплових електростанцій (ТЕС), які складаються з котлоагрегатів та парових турбін.

Теплоенергетика у світовому масштабі переважає серед традиційних видів, на базі вугілля виробляється 46% усієї електроенергії світу, на базі газу – 18%, ще близько 3% – за рахунок спалювання біомас, нафта використовується для 0,2%. Сумарно теплові станції забезпечували у 2011 р. близько 80 % загальної вироблення всіх електростанцій світу.

На 2013 рік, середній ККД теплових електростанцій дорівнював 34%, при цьому найефективніші вугільні електростанції мали ККД у 46%, а найефективніші газові електростанції — 61%.

Типи теплових електростанцій:

1. Паротурбінні електростанції — енергія перетворюється за допомогою паротурбінної установки;
2. Газотурбінні електростанції — енергія перетворюється за допомогою газотурбінної установки;
3. Парогазові електростанції — енергія перетворюється за допомогою парогазової установки.

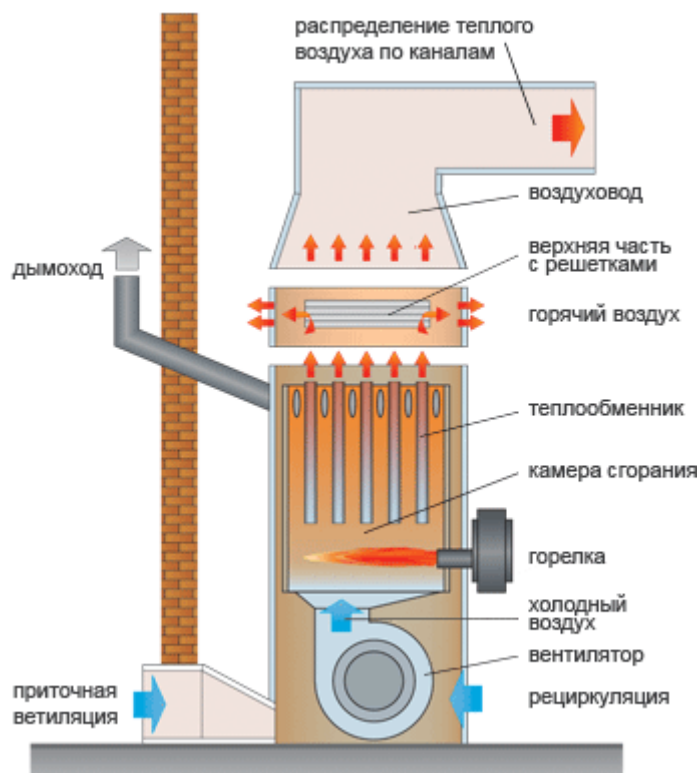
У світі теплоенергетика переважає серед традиційних видів електроенергетики, обсяги виробництва цієї галузі становлять 90 % від загального виробітку всіх електростанцій світу. На основі нафти виробляється 39 % усієї електроенергії в країнах світу, на основі вугілля — 27 %, газу — 24 %.

Енергетика таких країн, як Польща і ПАР практично повністю заснована на використанні вугілля, а Нідерландів — на використанні газу. Дуже велика частка теплоенергетики в Китаї, Австралії, Мексиці.

Теплогенератор

Теплогенератор — сукупність пристроїв і механізмів для виробництва теплової енергії у вигляді водяної пари, гарячої води або підігрітого повітря на основі перетворення різних видів енергії (хімічної, випромінювання, електричної та ін.) в теплову. Застосовується в промисловості, транспорті та побуті для індивідуального опалення та гарячого водопостачання приміщень або невеликих будівель різного призначення.

Як правило, теплогенератор складається з камери згоряння з повітряним теплообмінником, пальника та вентилятора відцентрового або осьового. Паливом для теплогенератора може служити природний газ, дизельне пальне або відпрацьоване масло в залежності від типу пальника, так само виробляються теплогенератори на твердому паливі в дровах, вугіллі, гранулах, деревних відходах.



Гарячі гази, отримані в камері згорання, направляються в теплообмінник і далі димохід. Теплообмінник, у свою чергу, обдувається повітряним потоком, що створює вентилятор, нагріваючи його. Нагріте повітря розподіляється по приміщенню через ґрати в корпусі теплогенератора або через систему підключених до нього вентиляційних каналів.

При цьому досягається збільшення температури повітря, що подається на 20—70 К (для спец. задач до 150), що дозволяє влаштовувати на базі теплогенераторів також і системи припливної вентиляції приміщень.

Теплова потужність теплогенераторів лежить у діапазоні від 20 до 2000 кВт. Приблизно до 300 (400) кВт теплогенератори виготовляються в єдиному корпусі, від 350 (400) кВт теплогенератори для транспортування поділяють на секцію нагріву (теплообмінника) та секцію вентиляторів.

Статичний тиск на виході із теплогенератора визначається потужністю вентилятора. Залежно від навантаження (вентиляційної системи) статичний тиск може бути різним і лежить в діапазоні від 100 до 2000 Па (залежить від параметрів вентилятора).

Для роботи в системах припливної вентиляції, теплогенератор може оснащуватися камерою згорання та теплообмінником з нержавіючої сталі та пристроєм відведення конденсату. Це необхідно, якщо теплообмінник сильно охолоджується (при температурі продуктів згорання на виході після теплообмінника нижче 140—160°C). При постійній (номінальній) витраті повітря, підвищене охолодження теплообмінника може відбуватися за рахунок холодного повітря на вході перед теплообмінником (нижче 0°C) або за рахунок зниження теплової потужності нижче 60—65 % максимальної паспортної (номінальної) навіть при роботі на 100 % рециркульованому повітрі.

Об'єкти дослідження: вентилятор, горілка, камера згорання, теплообмінник.

Атомні електростанції.

Теплова енергія, яка виділяється в процесі ядерної реакції використовується у паровому циклі Ренкіна.

Найпоширенішою конструкцією є **водо-водяний реактор** під тиском (ВВЕР). У першому контурі вода нагрівається до більш ніж 300°C, при тиску достатньому для збереження робочого тіла у рідкому стані, та використовується для виробництва пари у другому контурі. Отримана пара використовується у **паротурбінній установці**.

Менш розповсюджені **киплячі реактори**, де пара виробляється безпосередньо в реакторі та направляється до турбіни при подібних температурі та тиску.

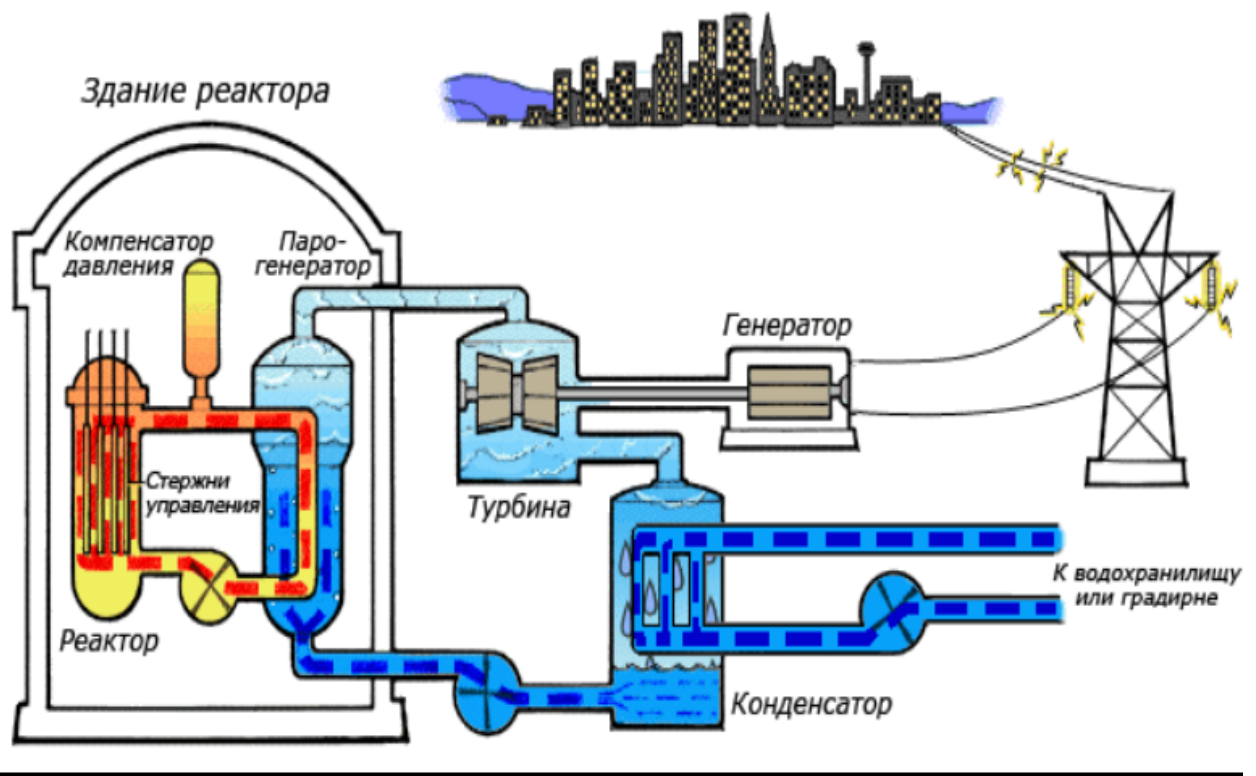


Схема роботи атомної електростанції з водо-водяним реактором.

Інтерактивна схема.

https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE-%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%8F%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F

Водно-водяний ядерний реактор (англ. *Pressurized water reactors (PWR)*) — реактор, який використовує в ролі сповільнювача та теплоносія звичайну (легку) воду. Найпоширеніший у світі тип водо-водяних реакторів — з водою під тиском. У країнах колишнього СРСР діють реактори **ВВЕР**, в інших країнах загальна назва таких реакторів PWR (Реактор з водою під тиском, англ. *Pressurized water reactor*).

Активна зона водно-водяного реактора складається з тепловидільних збірок, заповнених пластинчастими або циліндричними тепловидільними елементами. Корпус тепловидільної

збірки виготовляють з листового матеріалу (алюмінію, цирконію), що слабо поглинає нейтрони. Збірки розміщують в циліндричній клітці, яку разом зі складками поміщають у корпус реактора. Кільцевий простір між ним і зовнішньою стінкою клітки, заповнений водою, виконує роль відбивача. Вода, проходячи знизу вгору через зазори між тепловідільними елементами, охолоджує їх. Таким чином, вона виконує роль теплоносія, сповільнювача та відбивача. Корпус реактора розрахований на міцність, виходячи з тиску води. Горловина корпусу закривається герметичною кришкою, яку знімають при завантаженні та вивантаженні тепловідільних збірок.

У фізичних водно-водяних реакторах зазвичай використовують воду під атмосферним тиском. Корпуси таких реакторів герметичної кришки не мають, і вода в них перебуває під атмосферним тиском (має відкритий рівень).

Енергетичні водно-водяні реактори (зокрема, ВВЕР) повинні працювати з використанням води під тиском.

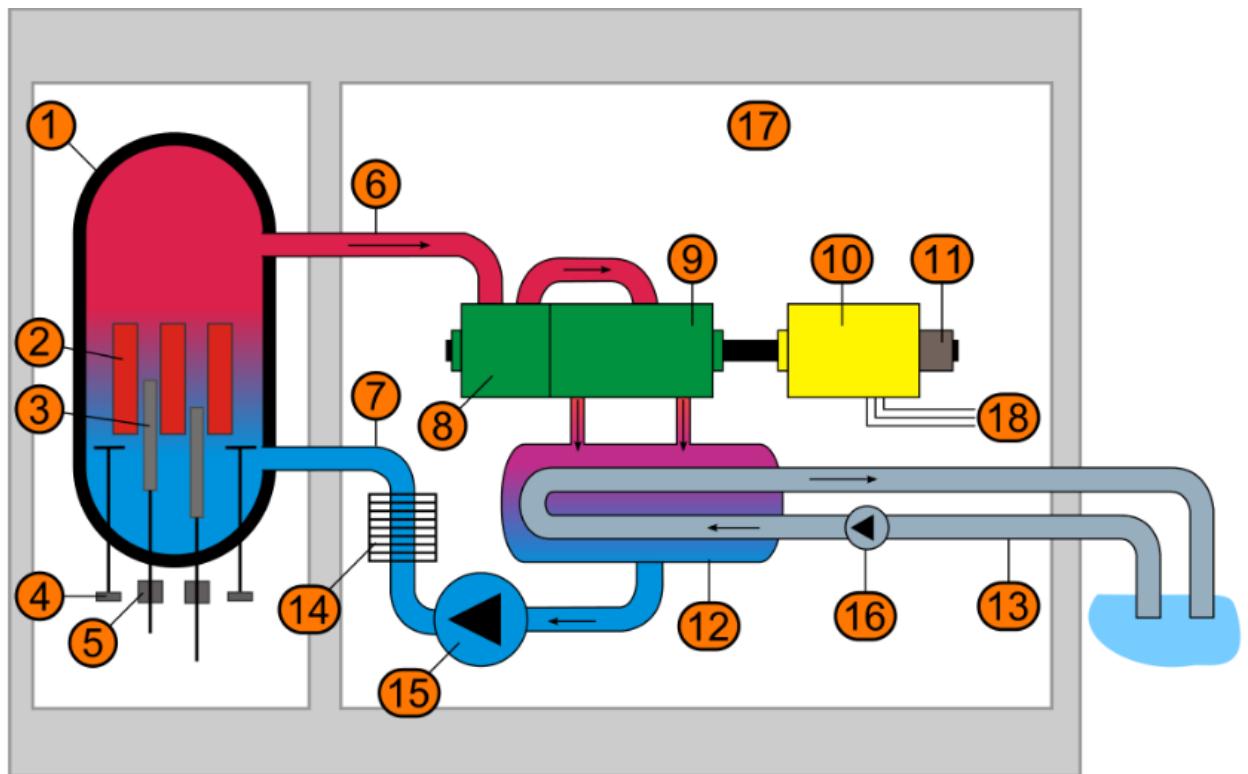


Схема роботи атомної електростанції з киплячим реактором 1. Корпус реактора (КР) 2. Тепловіділяючі збірки 3. Стрижні управління і захисту 4. Циркуляційні насоси (ЦН) 5. Приводи стрижнів СУЗ 6. Пара на турбіну 7. Живильна вода 8. Циліндр високого тиску турбіни (ЦВТ) 9. Циліндр низького тиску турбіни (ЦНТ) 10. Турбогенератор 11. Збудник 12. Конденсатор 13. Охолоджуюча вода конденсатора 14. Підігрівач живильної води 15. Живильний насос 16. Конденсатний насос 17. Залізобетонна оболонка 18. Підключення до мережі

Киплячий ядерний реактор (англ. *Boiling Water Reactor* (BWR)) — енергетичний ядерний реактор, в якому пароводяну суміш отримують безпосередньо в активній зоні.

В АЕС з не киплячими реакторами температура води в першому контурі нижче температури кипіння при встановленому робочому тиску для даних типів реакторів. Для отримання

прийнятного коефіцієнта корисної дії необхідні температури (більше 300 °С), це можливо тільки при високому тиску (в реакторах ВВЕР-1000 робочий тиск у корпусі 15,7 МПа), що вимагає створення високоміцного корпусу. Насичена водяна пара під тиском 1,2–6,0 МПа при температурі до 330 °С виробляється в другому контурі. У киплячих реакторах пароводяну суміш отримують в активній зоні. Тиск води в першому контурі становить близько 7,0 МПа. При цьому тиску вода закипає в об'ємі активної зони вже при температурі 280 °С. Киплячі реактори мають ряд переваг в порівнянні з не киплячими. У киплячих реакторах корпус працює при нижчому тиску, у схемі АЕС немає парогенератора.

Киплячі реактори монтуються в гермооболонці (контейнменті), в якій також монтуються системами зниження тиску. Контейнмент складається з двох головних частин — сухої шахти (сухого боксу) реактора (англ. *dry-well*) і бака-барботера (англ. *wet-well*). У випадку аварії з втратою теплоносія в межах гермооб'єму, пара направляється за допомогою козирків (напрямних апаратів) в бак-барботер з водою, де відбувається її конденсація. На додаток є також системи з розпиленням води в гермооб'ємі.

Ще одна особливість киплячих реакторів полягає в тому, що у них відсутнє борне регулювання, компенсація повільних змін реактивності (наприклад: вигорання палива) виконується лише міжкasetними поглиначами, які виконані у вигляді хреста. Борне регулювання неефективне через високу розчинність бору в парі (більша його частина буде виноситися в турбіну). Бор вводять лише на час перевантаження палива для створення глибокої підкритичності.

У більшості киплячих реакторів поглинаючі стрижні системи управління і захисту (СУЗ) розташовуються знизу. Таким чином значно підвищується їх ефективність, так як максимальний потік теплових нейтронів зміщений у реакторах цього типу в нижню частину активної зони. Така схема також зручніша при перевантаженнях палива та звільняє верхню частину реактора від приводів СУЗ, дозволяючи таким чином більш ефективно організувати сепарацію пари

Для стійкої роботи киплячого корпусного реактора вибирають такий режим, при якому масова **кількість пари** не перевищує певну величину. При великих значеннях масової кількості пари робота реактора може бути нестійкою. Така нестійкість пояснюється тим, що пара витісняє воду з активної зони, а це збільшує довжину уповільнення нейтронів L_S . При дуже бурхливому кипінні значення L_S зростає настільки, що реактор отримує негативну (від'ємну) реактивність і потужність реактора починає падати.

Зниження потужності зменшує інтенсивність кипіння, масову кількість пари, а значить, і довжину уповільнення нейтронів. У результаті такого процесу реактивність стає позитивною, після чого потужність реактора і внаслідок чого інтенсивність кипіння починають зростати. Відбувається небезпечне для конструкції реактора і персоналу, який його обслуговує, коливання потужності.

Якщо **паровміст** нижче допустимого, таких небезпечних коливань потужності не відбувається, реактор саморегулюється, забезпечуючи стабільний режим роботи. Так, зниження рівня потужності та зменшення інтенсивності кипіння звільняє реактивність, що забезпечує повернення рівня потужності до вихідного положення. Паровміст води на виході з активної зони залежить від питомої потужності. Тому допустимий паровміст, нижче якого забезпечується стійка робота киплячого реактора, обмежує потужність реактора з заданими розмірами активної зони. При такому обмеженні з одиниці об'єму киплячого реактора знімається менша потужність, ніж з одиниці об'єму некиплячого реактора. Це істотний недолік киплячих реакторів.

Вказані процеси характерні для активної зони, в якій об'єм води-уповільнювача надлишковий щодо оптимальної її кількості, що визначається з відношення об'єму води до об'єму палива. У цьому випадку зменшення кількості води-уповільнювача нейтронів в активній зоні через кипіння наближає співвідношення обсягів сповільнювача й палива до оптимального і призводить до збільшення властивості «розмноження» палива.

У разі затиснутої активної зони, в якій води відносно бракує навіть за відсутності кипіння, поява кипіння буде супроводжуватися зниженням потужності через нестачу уповільнення нейтронів на воді і погіршення «розмножуючих» властивостей такої активної зони.

Енергетичні об'єкти моделювання: водо-водяний реактор, паротурбінна установка, киплячі реактори, електрогенератор.

Теплоелектростанції: Газотурбінна електростанція

Газотурбінна електростанція — теплова електростанція, в якій, для приведення в рух електричного **генератора**, використовується **газова турбіна** (тепловий двигун безперервної дії, в апараті лопаток якого — енергія стислого і нагрітого газу перетворюється в механічну роботу на валу).

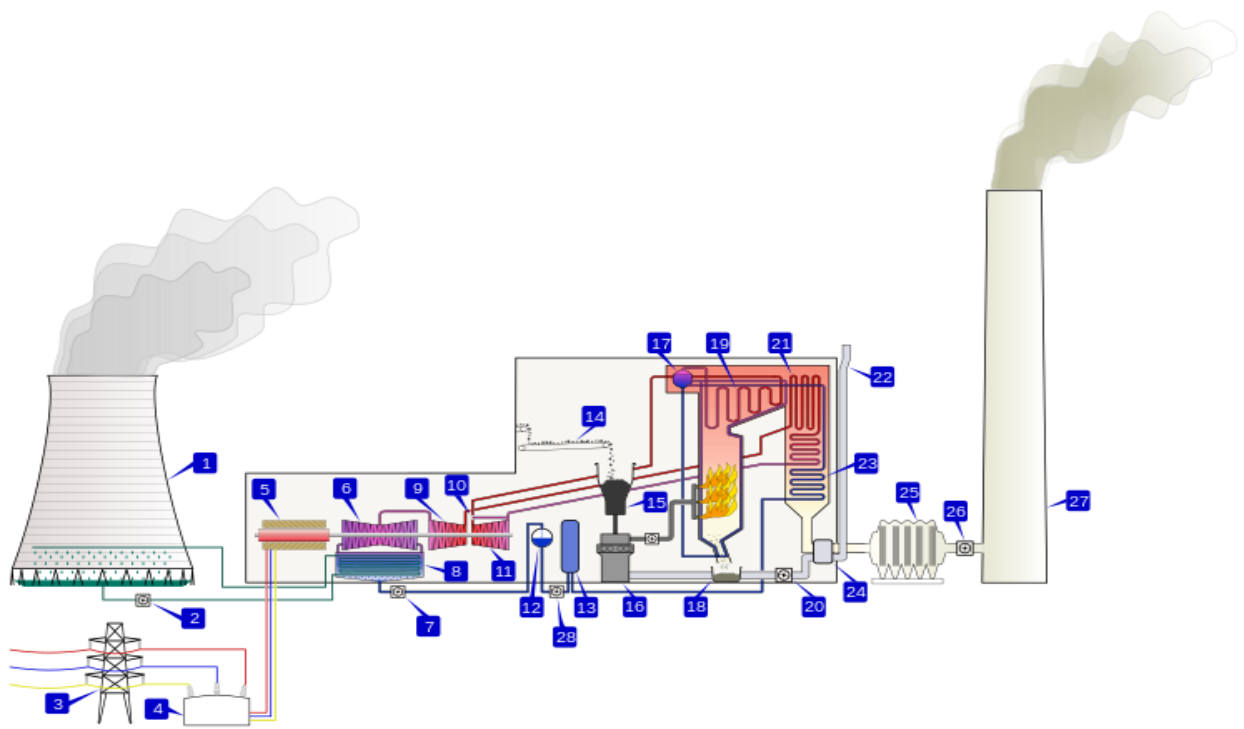
Більш розлого, газова електростанція — це теплова електростанція, яка спалює природний газ для виробництва електроенергії. Електростанції на природному газі виробляють майже чверть світової електроенергії та значну частину загальних викидів парникових газів, отже — змінюють клімат.^[1] Однак, вони можуть забезпечувати сезонне диспетчеризоване вироблення електроенергії, щоб збалансувати змінну в часі енергію від відновлюваних джерел там, де гідроелектростанції або з'єднувальні лінії недоступні.

Україна, зокрема, є одним із виробників у світі газотурбінних електростанцій невеликої потужності.

Об'єкти моделювання: газова турбіна, електрогенератор.

Теплоелектростанції: Спалювання вугілля у факелі на ТЕС.

Використовується паровий цикл Ренкіна – розмелене вугілля (**подрібнення у барабанних млинах до -100 мкм**) системою пневмотранспорту подається у топку **парового котла**, а отримана пара з високою температурою та тиском обертає **парову турбіну**.



Типова схема теплової електричної станції, що працює на вугіллі

- | | | |
|---|---|---|
| 1. <u>Охолоджувач</u> пари | 10. <u>Клапан</u> контролю пари | 19. Головний контур теплообмінник а |
| 2. <u>Водний насос</u> | 11. <u>Турбіна</u> пари високого тиску | 20. Насос гарячого повітря |
| 3. <u>Високовольтна лінія</u> | 12. Водяний <u>дозатор</u> | 21. Вторинний контур теплообмінник а |
| 4. Підвищувальний <u>трансформатор</u> | 13. Водяний <u>нагрівач</u> | 22. Вхідна труба для повітря |
| 5. <u>Електричний генератор</u> (3-фазі) | 14. <u>Конвеєр</u> для вугілля | 23. Первинний контур теплообмінник а |
| 6. <u>Турбіна</u> низького тиску | 15. <u>Бункер</u> для вугілля | 24. Повітряний <u>теплообмінник</u> |
| 7. Водяний насос | 16. <u>Вугільний ежектор</u> | 25. Фільтрувальна установка |
| 8. Збірник конденсату | 17. <u>Паровий котел</u> | 26. Витяжний <u>вентилятор</u> |
| 9. <u>Турбіна</u> середнього тиску | 18. <u>Бункер</u> золи | 27. <u>Димова труба</u> |

Спалювання вугілля у факельних котлах призводить до утворення величезної кількості шкідливих викидів, зокрема SO_x, NO_x, зола тощо. Контроль викидів пиловугільних енергоблоків є дуже витратним.

Енергоблоки з докритичними параметрами пари. Вода нагрівається у барабанному котлоагрегаті для виробництва пари при тиску меншому від критичний (22,1 МПа). Найбільш ефективні енергоблоки даного типу досягають ККД 38%. Питомі капіталовкладення у докритичний енергоблок на 10-20% нижчі ніж у надкритичний блок.

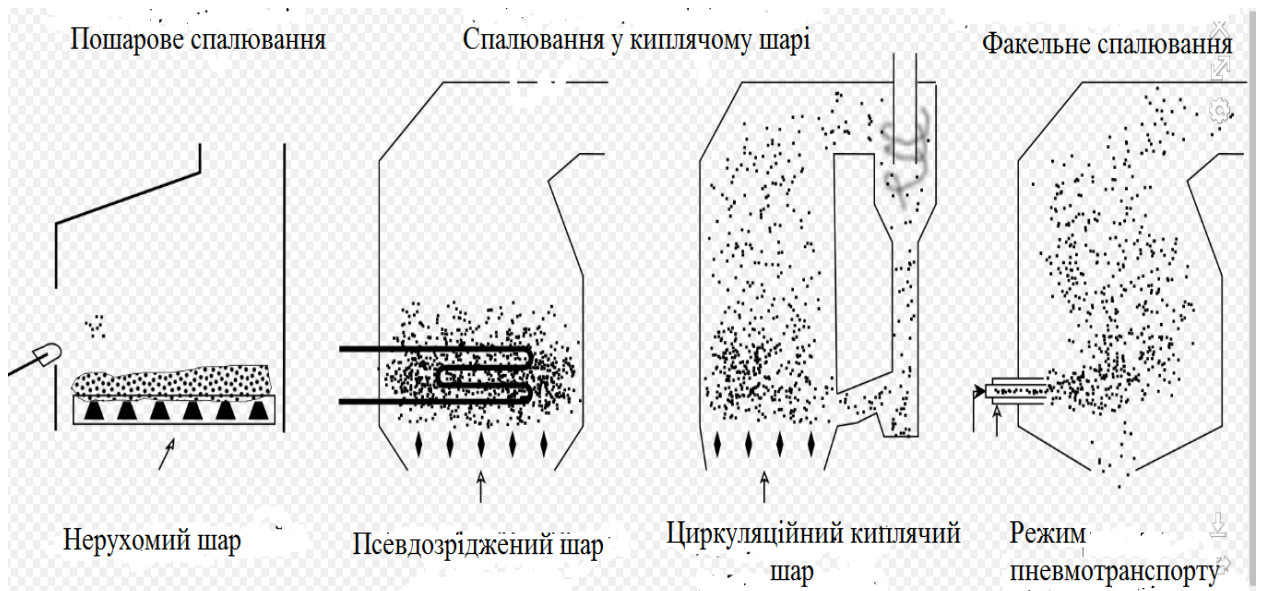
Енергоблоки з надкритичними та ультра-надкритичними (USC) параметрами пари. Надкритичні енергоблоки використовують пару тиском 24-26 МПа, температурою до 580°C та демонструють ефективність до 42-43%. Сучасні USC блоки працюють при температурі до 620°C, та тиску 25-30 МПа. Питомі капіталовкладення USC можуть бути на 10% вищими ніж у суперкритичних енергоблоків, внаслідок використання дорогих матеріалів та технологій.

Перспективні Ультра-надкритичні (A-USC) технології. Розвиток A-USC спрямований на досягнення ефективності 50% та вище, це вимагає температури пари 700-760°C та тиску 30-35 МПа. Матеріали для високотемпературних елементів базуються на нікелевих сплавах.

Об'єкти дослідження: процес подрібнення вихідного вугілля, процес пневмотранспортування і вдування (ежектування) вугілля в ядро факела, процес горіння вугілля у факелі, паровий котел, процеси теплообміну, парова турбіна, електрогенератор.

Теплоелектростанції: Спалювання вугілля у киплячому шарі на ТЕС.

Спалювання в киплячому шарі — одна з технологій спалювання твердих палив в енергетичних котлах, при якій у топці створюється киплячий шар з частинок палива та негорючих матеріалів. Технологія була привнесена в енергетику з хімічної промисловості приблизно в 1970 роки для спалювання вугілля. На сьогоднішній день ця технологія спалювання вважається застарілою.



Технології спалювання в киплячому шарі

У енергоблоках, оснащених котлами з **циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ)** використовується паровий цикл Ренкіна. Вугілля лише подрібнюється, але не розмелюється, а спалювання здійснюється при температурах нижчих ніж у пиловугільному котлі. Вихідний потік повітря підтримує у топці турбулентний шар вугілля та золи. Великі частинки вугілля, які виносяться повітрям сепаруються та повертаються до шару. Технологія підходить для використання широкого спектру палив, у тому числі низькоякісних.

Технологія не вимагає витратної очистки вихідних газів. Внаслідок зниженої температури у топці викиди NOX є низькими. Додавання вапна у киплячий шар дозволяє зв'язати до 95% SO₂.

Об'єкти дослідження: газова турбіна, парова турбіна, електрогенератор, топка з киплячим шаром.

Теплоелектростанції: Парогазова установка

Парогазова установка (англ. Combined Cycle Gas Turbine, CCGT) — частина електрогенеруючої станції (ТЕС, ТЕЦ, ГРЕС), що служить для виробництва електроенергії.

Парогазова установка містить два окремих двигуна: паросиловий і газотурбінний.

У газотурбінній установці турбіну обертають газоподібні продукти згоряння палив. Паливом може служити як природний газ, і продукти нафтової промисловості (дизельне паливо).

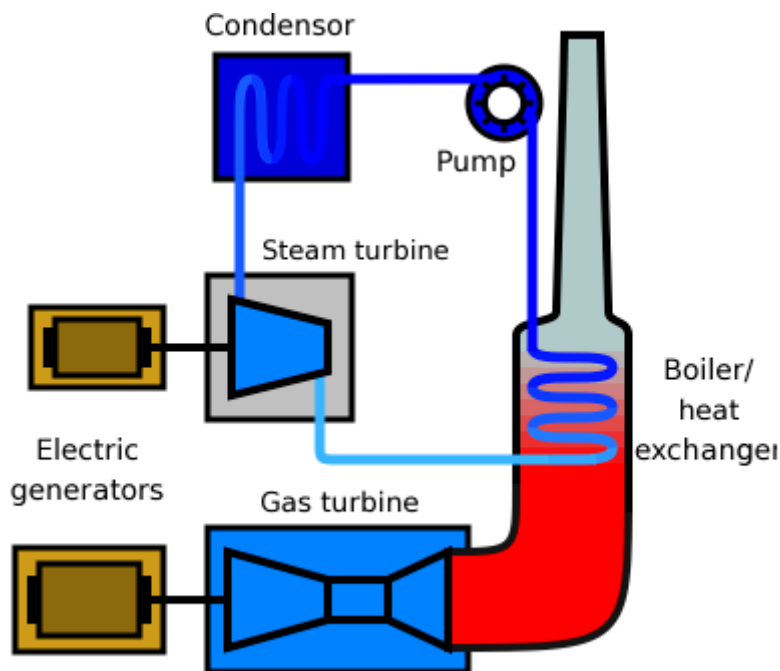


Схема роботи парогазової установки, електрика одержується двічі — за допомогою газової, а потім парової турбіни.

На одному валу з турбіною знаходиться **електрогенератор**, який за рахунок обертання ротора виробляє електричний струм. Проходячи через **газову турбіну**, продукти згоряння віддають лише частину своєї енергії і на виході з неї, коли їх тиск вже близько до атмосферного і робота не може бути ними виконана, все ще мають високу температуру. З виходу газової турбіни продукти згоряння потрапляють у паросилову установку, в котел-утилізатор, де нагрівають воду і утворюється водяна пара. Температура продуктів згоряння достатня для того, щоб довести пару до стану, необхідного для використання в **паровій турбіні** (температура димових газів близько 500°C дозволяє отримувати перегріту пару при тиску близько 100 атмосфер. Парова турбіна приводить в дію другий електрогенератор (схема multi-shaft).

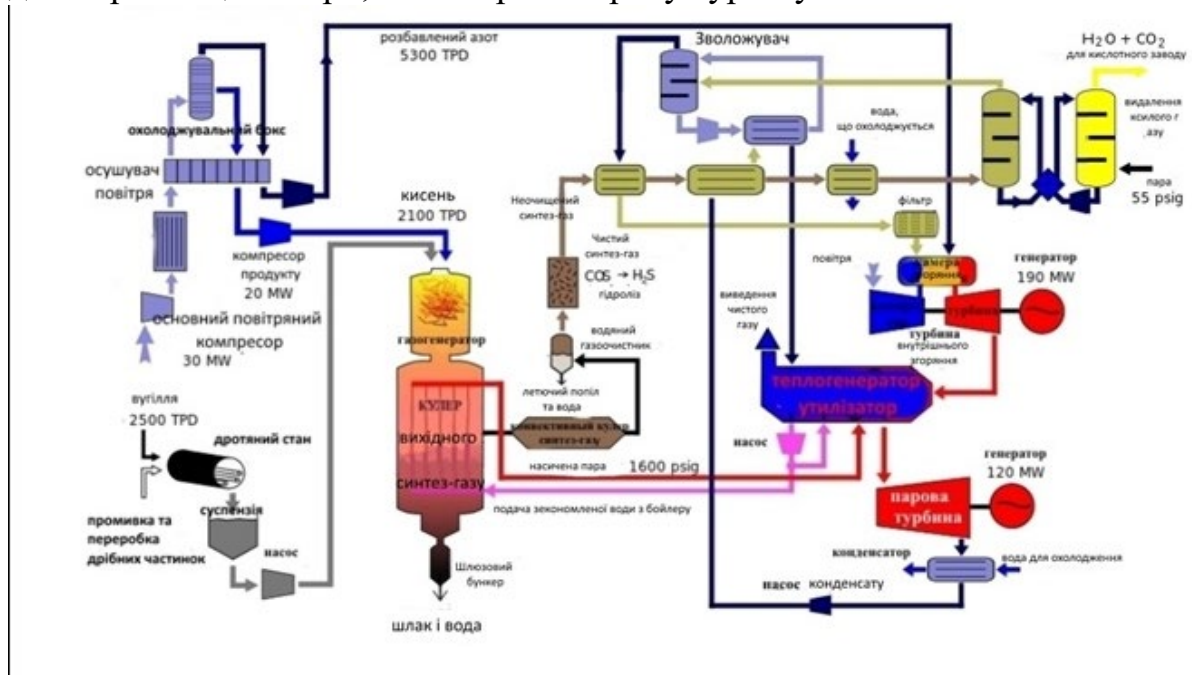
Широко поширені парогазові установки, у яких парова та газова турбіни знаходяться на одному валу, у цьому випадку використовується тільки один, найчастіше двопривідний генератор (схема single-shaft). Така установка не може працювати в газовому режимі (з непрацюючим паровим контуром), так як парова турбіна не може обертатися без пари (потрібна пара на холостому ходу, для охолодження). Також часто пара з двох блоків ГТУ-котел-утилізатор направляється в одну загальну паросилову установку (дуплексна схема).

Іноді парогазові установки створюють з урахуванням існуючих старих паросилових установок (схема topping). У цьому випадку гази, що йдуть, з нової газової турбіни скидаються в існуючий паровий котел, який відповідним чином модернізується. ККД таких установок, як правило, нижче, ніж у нових парогазових установок, спроектованих та побудованих «з нуля».

Об'єкти дослідження: паросиловий і газотурбінний двигуни, газова турбіна, парова турбіна, електрогенератор.

Теплоелектростанції: Парогазова установка з газифікацією вугілля (IGCC).

Використовується комбінація парового циклу Ренкіна та газового циклу Брайтона. В **газифікаторі** з вугілля виробляється синтез-газ, він очищується та подається до газової турбіни, після якої тепло вихідних газів утилізується для виробництва пари, яка обертає парову турбіну.



У процесі газифікації синтез-газ можна виробляти з широкого спектра вуглецевмісної сировини, наприклад, високосірчистого вугілля, важких нафтових залишків і біомаси. Рослина називається комплексною, тому що (1) синтез-газ, що отримується в розділі газифікація, використовується як паливо для газової турбіни в комбінованому циклі, і (2) пар, що виробляється синтез-газовими кулерами в розділі газифікація, використовується в паровій турбіні в змішаному циклі. На цьому прикладі виробництво синтез-газу використовується як паливо в **газовій турбіні**¹, яка виробляє електричну енергію. У звичайному змішаному циклі, так званих "відходів тепла" від вихлопу газової турбіни використовується в котлі-утилізаторі (ку) для виробітку пари для **парової турбіни** циклу. На КЦКГ рослина підвищує загальну ефективність процесу шляхом додавання більш високої температури пари, що утворюється в процесі газифікації в паротурбінному циклі. Ця пара потім використовується в парових турбінах для виробництва додаткової електричної потужності.

Складність та витратність технології IGCC поки не дозволяють їй досягти промислових масштабів розповсюдження. Успішно експлуатуються декілька демонстраційних станцій потужністю 250-300 МВт з ефективністю на рівні 50%.

Об'єкти дослідження: газифікатор, газова турбіна, парова турбіна, електрогенератор.

¹ Газова турбіна ([фр. Turbine](#) від [лат. Turbo](#) — **вихор, обертання**) — це [тепловий двигун](#) безперервної дії, на [лопатках](#) якого [енергія](#) стисненого і нагрітого [газу](#) перетворюється на механічну роботу на [валу](#).