

**Д. В. Степанов, С.Й. Ткаченко**

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА  
ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ**

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

**Д. В. Степанов, С.Й. Ткаченко**

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА**  
**ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ**

**Навчальний посібник**

Вінниця  
ВНТУ  
2011

УДК 621.3  
ББК 31.391  
С79

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 10 від 26. 05. 2011 р.)

Рецензенти :

**М. О. Прядко**, доктор технічних наук, професор

**І. І. Пуховий**, доктор технічних наук, професор

**М. В. Губинський**, доктор технічних наук, професор

**Степанов, Д. В.**

С79 Теплоенергетика. Вступ до спеціальності : навчальний посібник / Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 100 с.

В посібнику розглянуто гуманітарні, методичні та організаційні особливості підготовки теплоенергетиків. Згідно з навчальним планом наведено відомості з основних дисциплін: гідрогазодинаміка; технічна термодинаміка; тепломасообмін; котельні установки промислових підприємств; теплотехнологічні процеси і установки; нагнітачі та теплові двигуни; нетрадиційні джерела енергії; моделювання, оптимізація та автоматичне керування теплоенергетичними процесами. Наведено основи енергоменеджменту та методи зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище. В посібнику наведений конспект лекцій, завдання для практичних занять та самостійної роботи студентів.

**УДК 621.3**  
**ББК 31.391**

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕДМОВА .....  | 5  |
| 1 НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС У ВНЗ.....   | 6  |
| 1.1 Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавра та магістра<br>теплоенергетики ..... | 6  |
| 1.2 Навчальний план спеціальності.....   | 8  |
| 1.3 Організація навчального процесу.....   | 9  |
| 1.4 Гуманітарна складова підготовки теплоенергетика.....                           | 10 |
| 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ .....   | 13 |
| 2.1 Основи технічної термодинаміки.....  | 13 |
| 2.1.1 Параметри і рівняння стану.....  | 13 |
| 2.1.2 Термодинамічні процеси .....   | 16 |
| 2.1.3 Закони перетворення енергії .....  | 17 |
| 2.1.4 Діаграми.....  | 17 |
| 2.2 Основи гідрогазодинаміки .....   | 18 |
| 2.2.1 Фізичні властивості рідин і газів .....                                      | 19 |
| 2.2.2 Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля .....                           | 20 |
| 2.2.3 Динаміка і кінематика рідини .....   | 21 |
| 2.2.4 Рівняння Бернуллі для цілого потоку в'язкої рідини .....                     | 23 |
| 2.2.5 Гідравлічні опори .....  | 23 |
| 2.3 Основи тепломасообміну .....   | 25 |
| 2.3.1 Теплопровідність .....   | 27 |
| 2.3.2 Конвективний теплообмін .....  | 29 |
| 2.3.3 Теплове випромінювання .....   | 30 |
| 2.3.4 Масообмін .....  | 31 |
| 3 ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ .....   | 40 |
| 3.1 Склад палива, теплота згорання .....   | 40 |
| 3.2 Горіння палива. Газогенерація та піроліз.....                                  | 42 |
| 3.3 Поновлювані джерела енергії .....  | 44 |
| 3.3.1 Енергія вітру.....   | 44 |
| 3.3.2 Енергія Сонця .....  | 45 |
| 3.3.3 Енергія Землі.....   | 46 |
| 3.3.4 Енергія біомаси.....   | 47 |
| 4 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ .....   | 50 |
| 4.1 Котельні установки .....   | 50 |
| 4.2 Нагнітачі та теплові двигуни .....   | 53 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.2.1 | Класифікація нагнітачів.....   | 53 |
| 4.2.2 | Характеристики та робоча точка нагнітача .....   | 57 |
| 4.2.3 | Теплові двигуни.....   | 58 |
| 4.3   | Тепломасообмінні установки.....  | 59 |
| 4.3.1 | Теплообмінники.....  | 59 |
| 4.3.2 | Теплотехнологічні установки.....   | 60 |
| 5     | ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ.....  | 66 |
| 5.1   | Джерела теплопостачання.....   | 66 |
| 5.1.1 | Парові та водогрійні котельні .....  | 66 |
| 5.1.2 | ТЕЦ та ТЕС .....   | 67 |
| 5.2   | Теплові мережі .....   | 68 |
| 5.3   | Системи виробництва і розподілу енергоносіїв .....   | 69 |
| 6     | ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ, ЕКОНОМІКА ТА<br>ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ.....                                | 71 |
| 6.1   | Консалтингові схеми в енергетиці .....   | 71 |
| 6.2   | Енергетичний аудит.....  | 72 |
| 6.3   | Енергетичний менеджмент .....  | 74 |
| 6.4   | Енергозбереження.....  | 76 |
| 6.5   | Економіка теплоенергетики .....  | 79 |
| 7     | ЗАХОДИ ЗМЕНШЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ<br>ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА НАВКОЛИШНЄ<br>СЕРЕДОВИЩЕ ..... | 82 |
| 7.1   | Техногенне навантаження на навколишнє середовище.....  | 82 |
| 7.2   | Методи зменшення техногенного навантаження .....   | 83 |
| 7.3   | Аналіз ефективності теплоенергетичного обладнання.....   | 84 |
| 8     | ВИМІРЮВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ<br>ПРОЦЕСІВ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ОБЛАДНАННІ .....              | 87 |
| 8.1   | Теплотехнічні вимірювання.....   | 87 |
| 8.1.1 | Вимірювання температур .....   | 87 |
| 8.1.2 | Вимірювання тисків .....   | 88 |
| 8.1.3 | Вимірювання витрати і кількості потоку.....  | 89 |
| 8.1.4 | Вимірювання складу та властивостей речовини.....   | 90 |
| 8.2   | Моделювання та оптимізація процесів і обладнання.....  | 90 |
| 8.3   | Автоматизація технологічних процесів.....  | 92 |
|       | ЛІТЕРАТУРА .....   | 94 |
|       | Додаток А.....   | 95 |
|       | ГЛОСАРІЙ.....  | 98 |

## ПЕРЕДМОВА

Останнім часом на перше місце серед проблем людства виходять питання ефективного виробництва та використання енергоносіїв, запровадження енергоефективних технологій у всіх галузях життєдіяльності, посилення частки нетрадиційної енергетики в балансі країн. В зв'язку з цим підготовка теплоенергетиків набуває особливої актуальності і важливості.

*Теплоенергетика* – галузь, що займається виробництвом і використанням теплової енергії та перетворенням її в інші види енергії.

Даний навчальний посібник призначений для студентів денної та заочної форм навчання напряму підготовки "Теплоенергетика". Посібник підготовлений відповідно до навчальної програми дисципліни "Вступ до фаху".

Даний навчальний посібник покликаний надати студентам загальне уявлення про теплоенергетику і сформувати у нього модель його майбутньої спеціальності.

Матеріали посібника допоможуть майбутнім теплоенергетикам більш свідомо сприйняти фундаментальні та загально-інженерні теплоенергетичні дисципліни.

Автори намагались зорієнтувати студентів на найбільш суттєві проблеми теплоенергетики – підвищення ресурсо- та енергоефективності обладнання, зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище.

На думку авторів, даний посібник буде корисним як для підготовки студентів-теплоенергетиків, так і для інших суміжних спеціальностей.

Викладений матеріал дозволить готуватись до лекційних та практичних занять. Достатня кількість завдань та прикладів із розв'язанням дозволить якісно організувати самостійну роботу студентів.

Автори вдячні рецензентам за корисні поради і зауваження в процесі рецензування і підготовки рукопису.

Автори

# 1 НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС У ВНЗ

## 1.1 Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавра та магістра теплоенергетики

**Освітньо-кваліфікаційна характеристика** (Educational qualifying description) – нормативний документ, в якому відображаються цілі підготовки, визначається місце фахівця в структурі економіки.

Випускник з освітньо-кваліфікаційним рівнем базової вищої освіти за напрямом підготовки "Теплоенергетика" (Heat Power Engineering) підготовлений до роботи в галузі економіки ДК 009-96 секція "Виробництво та розподілення електроенергії, газу та води". Об'єктом його діяльності є "Системи та обладнання теплоенергетики".

Бакалавр з теплоенергетики повинен уміти:

- виконувати пошук та оброблення інформації;
- виконувати аналіз термодинамічних циклів установок;
- розраховувати технічні параметри установок;
- складати теплові та матеріальні баланси, визначати продуктивність установок;
- робити вибір та розробляти схеми систем;
- робити вибір типу і конструкції установок;
- виконувати багатоваріантний аналіз теплоенергетичних установок та оцінювати доцільність їх використання;
- виконувати схеми та креслення;
- виконувати вимірювання показників та дослідження систем і установок;
- виконувати контроль стану обладнання, оцінювати його роботу, виконувати випробування після монтажу обладнання;
- організовувати роботу з дотриманням норм безпеки праці, санітарно-гігієнічних вимог, попереджати та забезпечувати захист під час надзвичайних ситуацій тощо.

Випускник з освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр за спеціальністю "Теплоенергетика" підготовлений для виробничо-технічної, організаційно-керівної, проектно-конструкторської та науково-дослідної діяльності в галузі виробництва та споживання теплової та електричної енергії.

Магістр призначений для роботи у наукових установах, у вищих і середніх спеціальних навчальних закладах відповідного профілю на певних посадах: молодший науковий співробітник, науковий співробітник.

Магістр може працювати на промислових підприємствах в різних галузях, організаціях і фірмах різних форм власності, займаючись експлуатацією систем теплоенергопостачання, виконанням проектних, науково-дослідних і конструкторських робіт, пов'язаних із дослідженням теплоене-

ргетичних процесів та удосконаленням систем теплоенергопостачання виробництва, а також у вищих і середніх спеціальних навчальних закладах відповідного профілю на певних посадах: молодший науковий співробітник, науковий співробітник; інженер-енергетик; інженер з використання вторинних енергоресурсів; начальник цеху; заступник головного інженера; енергетик підприємства; інженер-конструктор; інженер-проектувальник; викладач в середніх спеціальних навчальних закладах; викладач циклу дисциплін спеціального призначення тощо.

В напрямку **організаційно-керівної діяльності** магістр з теплоенергетики:

- проводить передову науково-технічну політику в галузі теплоелектроспоживання;
- виконує аналіз та організацію оптимальної роботи енергетичних установок;
- організовує безпечну експлуатацію, ремонт та монтаж енергогенеруючого та енерговикористовувального обладнання;
- організовує облік енергоносіїв та випробування обладнання.

В рамках **інженерно-проектної діяльності**:

- виконує проектування систем виробництва, транспортування та використання теплової енергії;
- виконує аналіз та обґрунтування вибору схемних та конструктивних параметрів систем;
- впроваджує нові високоефективні системи та обладнання, в тому числі, з альтернативними джерелами енергії.

**Інженерно-дослідницька робота** магістра включає:

- аналіз сучасного стану галузі, виявлення проблем та розроблення пропозицій щодо вдосконалення теплоенергетичних систем;
- розроблення пропозицій щодо впровадження нетрадиційної енергетики, використання вторинних джерел енергії;
- теоретичні та експериментальні дослідження, математичне моделювання тепломасообмінних процесів, теплоенергетичних систем та їх елементів;
- розроблення нормативно-технічної документації, виконання техніко-економічних обґрунтувань розроблених енергетичних та екологічних заходів, прогнозування тенденцій розвитку підприємств з врахуванням економічної, екологічної та енергетичної ситуації регіону.

**Інженерно-педагогічна діяльність** магістра полягає у:

- проведенні професійної орієнтації молоді, популяризації спеціальності;
- викладанні спеціальних дисциплін, навчанні професії, контролі знань, розробленні методичного забезпечення навчання.



## 1.2 Навчальний план спеціальності

Навчальним планом спеціальності регламентується тривалість навчання, обсяг і послідовність вивчення дисциплін, кількість екзаменів, заліків, практик тощо. В початковому плані передбачені дисципліни гуманітарної та соціально-економічної підготовки, математичної та природничо-наукової підготовки, професійної та практичної підготовки, дисципліни робочої професії.

До циклу дисциплін гуманітарної та соціально-економічної підготовки відносяться: історія України; філософія; іноземна мова; політологія; культурологія; правознавство; соціологія; психологія; українська мова; економічна теорія. Загальний обсяг цього циклу дисциплін складає 1300...1400 годин.

До складу дисциплін математичної та природничо-наукової підготовки входять: вища математика; фізика; хімія; нарисна геометрія та комп'ютерна графіка; технічна механіка; екологія, біоетика та біобезпека. Орієнтовний обсяг цього циклу 1900...2000 годин.

Нормативними дисциплінами професійної та практичної підготовки є: гідрогазодинаміка; технічна термодинаміка; тепломасообмін; інформаційні технології; охорона праці та безпека життєдіяльності; теоретична механіка; теплотехнологічні процеси і установки; економіка, організація і планування виробництва.

Дисциплінами вибору ВНЗ та вибору студента в рамках цього ж циклу є: використання нетрадиційних джерел енергії; менеджмент і маркетинг; вступ до фаху; теплотехнічні вимірювання і прилади; метрологія і стандартизація; котельні установки; теплові мережі; нагнітачі та теплові двигуни; джерела теплопостачання; холодильна техніка; кондиціонування повітря; математичні методи і моделі в розрахунках на ЕОМ; сушильні процеси і установки; тепломасообмін і гідродинаміка багатоконпонентних середовищ та ін.

Сумарна тривалість цього циклу складає 4500...4600 годин.

Кожен студент виконує 7...9 курсових проектів і робіт, здає державні екзамени, виконує і захищає бакалаврську дипломну роботу.

Практична частина підготовки включає навчання з робочої професії із подальшим отриманням диплому слюсаря-ремонтника теплоенергетичного устаткування II розряду. Це навчання проходить на першому курсі, а на другому та третьому курсах студент під час робочих триместрів працює на підприємстві. На четвертому курсі студенти проходять науково-дослідну та конструкторсько-технологічну практику, яка є переддипломною практикою і останнім етапом підготовки бакалаврської дипломної роботи.

Склад та обсяг окремих циклів може варіюватися.

### 1.3 Організація навчального процесу

Система навчання у ВНЗ включає цілий комплекс різного виду занять і робіт: лекцій; практичних занять; лабораторних і контрольних робіт; курсового и дипломного проектування; заліків і екзаменів.

Головне для студента – "навчитись вчитись". Студент повинен привчити себе до самостійної щоденної роботи протягом 4...5 годин, окрім обов'язкових аудиторних занять. Розвиток у студентів навиків самостійної роботи спеціаліста – одна з головних задач ВНЗ.

**Лекція** (Lecture) є основним видом аудиторних занять. Під час лекції студент не тільки засвоює матеріал, але й вчиться логічно мислити, систематизувати інформацію. Важливу роль під час роботи на лекції відіграє конспект. Конспект з кожної дисципліни слід вести в окремому зошиті, обов'язково залишаючи поля. Писати треба чітко, коротко, використовувати загальноприйняті скорочення, умовні позначення тощо. Креслення та графіки слід виконувати акуратно, бажано в масштабі.

**Практичні заняття** (Practical employments) проводяться для закріплення лекційного матеріалу шляхом розв'язання задач. Під час підготовки до практичного заняття студент повинен прочитати відповідний розділ конспекту, а також рекомендовану літературу. Спочатку слід визначити порядок розрахунку задачі і тільки потім підставляти числові значення. Для того, аби уникнути помилок і зрозуміти фізичний зміст, корисно застосовувати одиниці фізичних величин.

**Лабораторні роботи** (Laboratory works) призначені для ілюстрації лекційного матеріалу, набуття навиків експериментальних досліджень.

**Самостійна робота студента** (Alone work of students) один з найважливіших різновидів занять студентів. Вона включає підготовку до аудиторних занять, екзаменів, заліків, виконання окремих завдань, роботу над окремими розділами дисципліни тощо.

**Курсові проекти і роботи** (Course projects and works) дозволяють закріпити отримані теоретичні знання. Розроблені студентом курсові проекти і роботи є основою випускної бакалаврської дипломної роботи.

**Екзамени та заліки** є завершенням вивчення дисциплін. Заліки поділяються на диференційовані (з оцінкою) та недиференційовані (зараховано або незараховано). За період навчання студент бакалаврату складає 27...32 екзаменів та 35...45 заліків.

Для підвищення рівня навчання та покращення сприйняття інформації застосовують ділові ігри, комп'ютерні тренажери, розбір виробничих ситуацій, проведення занять на котельнях та ТЕЦ тощо.

Протягом навчання студенти можуть займатись науковою діяльністю. Якщо студентом отримані цікаві результати, вони можуть стати предметом обговорення на наукових конференціях, можуть бути опубліковані у

фахових журналах або запатентовані. Кращі студенти-теплоенергетики мають можливість брати участь у науково-дослідних роботах, які виконуються на кафедрі.

Бакалаврська підготовка у ВНЗ закінчується розробленням *бакалаврської дипломної роботи* (bachelor diploma work). Така робота може бути індивідуальна або комплексна (разом із студентами інших спеціальностей). Найбільше цінуються роботи, виконані на замовлення підприємств.

Дипломна розробка – це найбільш цікава, творча і напружена частина підготовки фахівця. Вона закінчується публічним захистом перед Державною екзаменаційною комісією, яка формується з авторитетних представників теплоенергетики області, провідних викладачів випускової та суміжних кафедр.

Студенти, які отримали диплом бакалавра з теплоенергетики мають можливість подавати заяву на навчання в магістратурі з отриманням кваліфікації магістр теплоенергетики. Рейтинг на вступ до магістратури включає величину середнього бала навчання в бакалавраті, оцінки за результатами складання державних екзаменів та захисту бакалаврської роботи, а також досягнення в науці, спорті, студентському самоврядуванні, творчих конкурсах тощо.

#### **1.4 Гуманітарна складова підготовки теплоенергетика**

Людство оволоділо величезним науково-технічним потенціалом, але ще не навчилось досить обережно і раціонально ним користуватись.

Кафедра теплоенергетики починає формувати світогляд фахівця вже на першому курсі і впродовж всього навчання поряд з технічною інформацією наполегливо розглядаються питання впливу теплоенергетики на навколишній світ, відношення до людей, культури виробництва і загальнолюдської культури. Під час викладання спеціальних дисциплін зазначене підсилюється та ілюструється конкретними прикладами з організації об'єктів, з техніки безпеки, з екологічної безпеки і людських взаємовідносин. Системні знання закріплюються в процесі курсового і дипломного проектування, а також в процесі підготовки магістрів і кандидатів наук.

Розв'язання глобальних проблем, що постали перед сучасним людством вимагає інтенсивного розвитку духовності. Не останнє місце посідає проблема вдосконалення інженерної освіти. Формування гуманного відношення до природи є частиною професійної підготовки студентів технічного навчального закладу. Майбутньому фахівцю необхідно не тільки дати суму професійних знань, але й сформуванню активну громадську екологічну позицію, виховати високу екологічну культуру. Великі можливості у фор-

муванні гуманного відношення до природи мають фундаментальні науки. Для теплоенергетичних спеціальностей це насамперед науки про енергію.

Енергія, як і повітря, вода, їжа, є головною та вічною потребою людини. З давніх часів люди навчилися використовувати енергію вітру, води та деревини. У міру свого розвитку людство навчилось використовувати енергію твердих, рідких і газоподібних палив, геотермальну енергію, енергію сонця і атомну енергію.

На світогляд молодого фахівця значною мірою сьогодні впливають знання з екології. Екологічні знання повинні бути обов'язковим компонентом всіх навчальних програм. Пошуки "нового синтезу", "нових технологій" пов'язуються нині з біологією та екологією. Екологія нині постає як місток, що з'єднує точне природознавство з соціогуманітарними науками.

Екологічна компетентність представників інженерних професій, зокрема теплоенергетичних, значною мірою розширить їх кругозір, підвищить їх фахові кондиції. Коли інженер навчиться органічно вписувати технологічні процеси в природне довкілля, робити власні проекти екологічно вивіреними, то він буде більш сприйнятливим і до соціогуманітарного профілю. Тільки таким шляхом можливе перетворення обмеженого власним фахом технократа в широко освіченого і духовно розвинутого громадянина і патріота.

В наш час виконання будь-якого теплоенергетичного проекту або підготовка інженерів-теплоенергетиків не може бути здійснена без врахування життєвого циклу систем або обладнання. Адже екологічна, енергетична та економічна ефективність систем визначається не тільки на даному етапі, але з врахуванням всього життєвого циклу системи, починаючи з видобування сировини, її оброблення і закінчуючи стадією утилізації.

Використання сучасних високоефективних технологій потребує значних витрат на створення нових систем і високоякісних матеріалів, але здатне суттєво зменшити техногенне навантаження на довкілля. В процесах аналізу енергетичних систем мають фігурувати критерії, які враховують екологічні, надійнісні і гуманітарні характеристики. Для досягнення стовідсоткової безпеки для людини і навколишнього середовища потрібні безмірно великі витрати. На якому рівні безпеки зупинитись на даному етапі залежить від гуманітарної підготовки фахівця.

Загальна культура інженера полягає в єдності професійної, соціальної та загальнолюдської культури. Гуманітарна підготовка науково-технічного фахівця є ефективним засобом подолання технократичного цинізму, маргінального відношення до життя. Недарма гуманізація та гуманітаризація інженерної освіти досить активно застосовується в розвинутих країнах світу. Ступінь освіченості все більш наполегливо займає передові

позиції в соціальному і культурному прогресі. Сучасні умови вимагають підготовки спеціаліста, здатного жити в системі ринкових відносин, технічної конвергенції та глобалізму. Якщо світ, в якому живе сучасна людина, розвивається так, що зростаючими темпами трансформує, “споживає” наукові знання, то і людина, яка є творцем цих знань, повинна мати творчі, спрямовані на активну діяльність, світоглядні установки.

Культура служить основою формування творчого світогляду інженера і цей процес формування має здійснюватись творчо. Засвоєння досягнень світової культури – дієвий засіб гуманітаризації мислення інженера, що особливо суттєво за умов технологізації існування. Це дозволяє бачити суто технічні питання значно ширше, неформально, постійно дистанціюючи горизонти технічної реальності, осмислюючи її в багатоплановості вимірів урізноманітнених відношень людини до світу. Багатогранність інженерної діяльності вимагає розгляду її морального аспекту. Очевидно, ця проблема постає в таких ракурсах: ставлення людини до людини; людини до природи; і, як наслідок, людини до техніки. Зрозуміло, що без істотних змін в суспільстві, вирішити проблему вдосконалення особи неможливо, адже і самі зміни в суспільстві залежать від рівня моральності його членів. Економічне, політичне і соціальне оздоровлення України багато в чому залежить від вирішення енергетичних проблем, вимагає посилення гуманістичної тенденції в процесах розвитку всіх сфер суспільного буття.

### **Контрольні запитання**

1. Дайте означення поняття освітньо-кваліфікаційна характеристика. З яких елементів вона складається?
2. Наведіть перелік завдань, які може виконувати бакалавр з теплоенергетики.
3. Наведіть приклади можливої діяльності магістра з теплоенергетики.
4. Поясніть основні цикли дисциплін, які вивчає студент-теплоенергетик в рамках бакалаврської підготовки.
5. Наведіть дисципліни, які вивчає студент в рамках циклу професійної та практичної підготовки.
6. Наведіть основні види занять у ВНЗ. Охарактеризуйте їх.
7. Дайте характеристику бакалаврської дипломної роботи.
8. Поясніть необхідність гуманітарної підготовки теплоенергетика.
9. Наведіть приклади взаємозв'язку теплоенергетики та екології.

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

**Теплотехніка** (Heating Engineering) – наука, яка вивчає методи отримання, перетворення, передавання і використання теплоти, а також принципи дії і конструктивні особливості теплових машин, апаратів і пристроїв. Теплота використовується у всіх областях діяльності людини.

Розрізняють два принципово різних напрями використання теплоти – енергетичне і технологічне. При енергетичному використанні теплота перетворюється в механічну роботу, за допомогою якої в генераторах створюється електрична енергія, зручна для передавання на відстань. Теплоу при цьому одержують спалюванням палива в котельних установках або безпосередньо в двигунах внутрішнього згорання. При технологічному – теплота використовується для направленої зміни властивостей різних тіл (розплавлення, затвердіння, зміни структури, механічних, фізичних, хімічних властивостей).

Для встановлення найраціональніших способів використання теплоти, аналізу економічності робочих процесів теплових установок і створення нових, найдосконаліших типів теплових агрегатів необхідно розроблення теоретичних основ теплотехніки.

Такими теоретичними розділами є основи технічної термодинаміки, гідрогазодинаміки і основи теорії теплообміну, в яких досліджуються закони перетворення і властивості теплової енергії, процеси руху рідин, газів і розповсюдження теплоти.

### 2.1 Основи технічної термодинаміки

Термодинаміка зародилася в першій чверті XIX століття в процесі вивчення питань, зв'язаних з роботою теплових двигунів.

Формування основних законів термодинаміки дозволило виявити нові закономірності для властивостей речовин під час хімічних і фазових перетворень. Розроблення технічної проблеми перетворення теплоти на роботу обумовила появу нової галузі фізики, яка згодом переросла в науку, здатну досліджувати явища у різних сферах діяльності.

Термодинаміка є фундаментальною наукою. В технічній термодинаміці (Technical thermodynamics) термодинамічний метод досліджень синтезується з теоретичними і експериментальними досягненнями фізики та інших наук для вирішення питань технічного прогресу.

#### 2.1.1 Параметри і рівняння стану

Величини, які характеризують фізичний стан тіла називаються **термодинамічними параметрами стану**. Такими параметрами є питомий об'єм, абсолютний тиск, абсолютна температура, внутрішня енергія, ентальпія, ентропія, концентрація, теплоємність і т. д.

За відсутності зовнішніх силових полів (гравітаційного, електромагнітного і ін.) термодинамічний стан однофазного тіла можна однозначно визначити трьома параметрами – питомим об'ємом ( $v$ ), температурою ( $T$ ), тиском ( $P$ ).

**Питомий об'єм** (Specific volume) – величина, яка визначається як відношення об'єму речовини до його маси,  $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v = V/M. \quad (2.1)$$

**Густина** (Density) **речовини** – величина, яка визначається відношенням маси до об'єму речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$

$$\rho = M/V. \quad (2.2)$$

**Тиск** (Pressure) – величина, яка визначається відношенням сили, яка діє на стінку посудини до площі цієї стінки,  $\text{Па}$

$$P = F/S. \quad (2.3)$$

Окрім прийнятої в системі СІ одиниці вимірювання тиску –  $\text{Па}$  на практиці використовуються такі одиниці вимірювання:

- $1 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Па}$ ;
- $1 \text{ ат (технічна атмосфера)} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 98,1 \text{ кПа}$ ;
- $1 \text{ атм (фізична атмосфера)} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101,325 \text{ кПа}$ ;
- $1 \text{ ат} = 0,968 \text{ атм}$ ;
- $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,32 \text{ Па}$ ;
- $1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа} = 100 \text{ кПа}$ .

Розрізняють надлишковий і абсолютний тиск.

Надлишковий тиск – різниця між абсолютним тиском рідини або газу і тиском навколишнього середовища.

**Температура** (Temperature) – характеризує ступінь нагрітості тіл і є мірою середньої кінетичної енергії поступального руху його молекул. Чим більша середня швидкість руху, тим вища температура тіла. За термодинамічний параметр стану системи приймають термодинамічну температуру ( $T$ ), тобто абсолютну температуру, її вимірюють у  $\text{К}$  (градус Кельвіна).

Основні термодинамічні параметри стану  $P$ ,  $v$  і  $T$  однорідного тіла залежать один від одного і взаємозв'язані між собою певним математичним рівнянням, яке називається **рівнянням стану**:  $f(P, v, T) = 0$ .

**Рівноважним станом** називається стан тіла, при якому у всіх точках його об'єму  $P$ ,  $v$ ,  $T$  і всі інші фізичні властивості однакові.

Сукупність змін стану термодинамічної системи при переході з одного стану в інший називається **термодинамічним процесом**.

Якщо процес проходить через рівноважні стани, то він називається рівноважним. В реальних випадках всі процеси є нерівноважними.

Параметрами стану є: внутрішня енергія, ентальпія, ентропія тощо.

В загальному випадку внутрішньою енергією називається сукупність всіх видів енергій, що присутня в тілі або системі тіл.

В технічній термодинаміці розглядаються тільки такі процеси, в яких змінюються кінетична і потенціальна складові внутрішньої енергії. При цьому знання абсолютних значень внутрішньої енергії не потрібне.

**Внутрішня енергія** ( $U$ ) є функцією двох основних параметрів стану газу, тобто  $U = f(P, T)$ ,  $U = f(v, T)$ ,  $U = f(P, v)$  і визначається

$$dU = C_v dT, \quad (2.4)$$

де  $C_v$  – коефіцієнт пропорційності, який називають ізохорною теплоємністю.

Кожному стану робочого тіла (системи) відповідає цілком певне значення параметрів стану, то для кожного стану тіла буде характерна своя однозначна, цілком визначена величина внутрішньої енергії  $U$ .

**Робота** ( $L$ ) поняття, запозичене з механіки. Для випадків механічної деформації, яка виникає під дією тиску в газах чи рідинах, робота визначається як добуток тиску на приріст об'єму

$$dL = P dv. \quad (2.5)$$

**Ентальпія** ( $h$ ) – функція двох незалежних змінних  $h = f(P, T)$ , яка визначається з рівнянь

$$dh = C_p dT, \quad (2.6)$$

де  $C_p$  – коефіцієнт пропорційності, який називають ізобарною теплоємністю.

Відношення  $c_p / c_v = k$  – називається коефіцієнтом Пуассона і залежить від числа ступенів свободи молекули. Для одноатомних газів  $k = 1,66$ , для двоатомних  $k = 1,4$ , для триатомних –  $k = 1,33$ .

**Теплота** ( $Q$ ) – енергія, яка передана від одного тіла до іншого, шляхом обміну кінетичною енергією між молекулами або променистим перенесенням внутрішньої енергії

$$dQ = C dT, \quad (2.7)$$

де  $C$  – коефіцієнт пропорційності, який називають істинною теплоємністю і характеризує теплоту, необхідну для підвищення температури одиниці тіла на один градус.

**Ентропія** ( $S$ ) – функція стану тіла, яка змінюється в термодинамічних процесах і визначається з рівняння

$$dQ = T dS. \quad (2.8)$$

Із підведенням теплоти до тіла його ентропія збільшується, із відведенням – зменшується. В адіабатних процесах (якщо немає теплообміну з навколишнім середовищем) – зміна ентропії дорівнює нулю. В реальних (необоротних) процесах ентропія зростає.



## 2.1.2 Термодинамічні процеси

До основних термодинамічних процесів ідеальних газів відносять ізохорні ( $v = \text{const}$ ), ізобарні ( $p = \text{const}$ ), ізотермічні ( $T = \text{const}$ ), адіабатні ( $S = \text{const}$ ) та політропні процеси.

Крім того, термодинаміка вивчає процеси в реальних газах, парогазових сумішах, вологому повітрі. Ці процеси використовуються в сушарках, в системах кондиціонування повітря, в контактних тепломасообмінних апаратах тощо.

Процеси течії та дроселювання потоків використовуються при розробленні трубопровідної арматури, сопел парових та газових турбін, струминних апаратів для перекачування рідин та газів.

Окремим розділом є хімічна термодинаміка, де вивчаються теплові ефекти реакцій, закони термохімії, умови хімічної рівноваги тощо.

Термодинамічні процеси стиску та розширення газів використовуються при розробленні поршневих, осьових та відцентрових компресорів, парових та газових турбін.

З використанням термодинамічних зворотних циклів розробляють холодильні машини та теплові насоси.

Прикладом оборотного циклу є відомий **цикл Карно**. Це круговий цикл, що складається з 2-х ізотермічних і 2-х адіабатних процесів. Оборотний цикл Карно в  $p$ - $v$  і  $T$ - $s$  діаграмах показаний на рис.2.1.

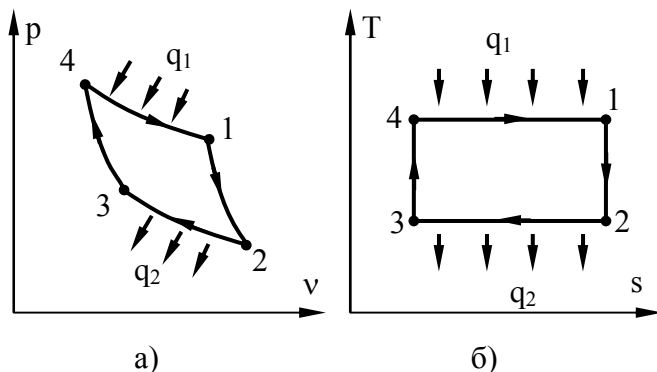


Рисунок 2.1 – Оборотний цикл Карно в  $p$ - $v$  (а) та  $T$ - $s$  (б) діаграмах

В ізотермічних процесах 4-1 і 2-3 підводиться та відводиться теплота від циклу.

В адіабатних (без теплообміну з навколишнім середовищем) процесах 3-4 і 1-2 – стиск і розширення робочого тіла.

Основною характеристикою будь-якого циклу є термічний коефіцієнт корисної дії (ККД)

$$\eta_t = L_{\text{ц}}/Q_{\text{ц}} \text{ або } \eta_t = L_{\text{ц}}/(Q_1 - Q_2). \quad (2.9)$$

Для оборотного циклу Карно ККД визначається за формулою

$$\eta_t = L_{\text{ц}}/Q_{\text{ц}} \text{ або } \eta_{\text{тК}} = (T_1 - T_2)/T_1. \quad (2.10)$$

З останнього витікає:

– термічний ККД циклу Карно не може дорівнювати одиниці, тому що не можна здійснити умову  $T_1 = \infty$  або  $T_2 = 0$ ;

– ефективність циклу Карно залежить від температур гарячого та холодного джерел і не залежить від властивостей робочого тіла.

Цикл Карно є найдосконалішим циклом і має найвищий ККД з усіх можливих оборотних циклів.

### 2.1.3 Закони перетворення енергії

Основу термодинаміки складають універсальні об'єктивні закони природи.

*Перший закон термодинаміки* має різні формулювання.

1. Енергія не зникає і не виникає знову, вона лише переходить з одного виду в інший в різних фізичних процесах.
2. Теплота, підведена до системи, витрачається на зміну енергії системи і виконання роботи.

Рівняння першого закону записується

$$Q = (U_1 - U_2) + L, \quad (2.11)$$

де  $Q$  – підведена до системи теплота;

$(U_1 - U_2)$  – зміна внутрішньої енергії;

$L$  – виконана робота.

*Другий закон термодинаміки* також являє собою об'єктивний закон природи, який вказує на напрямок протікання природних процесів та на одностороннє необоротне перетворення енергії в процесі їх здійснення.

Є кілька формулювань другого закону термодинаміки.

1. Теплота не може самовільно переходити від більш холодного до більш нагрітого тіла.
2. Всі процеси в природі необоротні.
2. Виконання роботи можливе там, де є різниця температур.
3. Для існування теплового двигуна необхідні 2 джерела – гаряче та холодне.

Математичний запис другого закону термодинаміки

$$L = Q_1 - Q_2, \quad (2.12)$$

де  $Q_1$  і  $Q_2$  – підведена до двигуна від гарячого джерела та відведена до холодного.

### 2.1.4 Діаграми

Для зручності розрахунків процесів з використанням водяної пари в 1904 р. Мольє розроблена  $h$ - $s$  діаграма (див. дод. А, рис. А.1).

Для розрахунків процесів у вологому повітрі у 1918 р. Рамзін розробив  $h$ - $d$  діаграму повітря (див. дод. А, рис. А.2).

Для розрахунків циклів холодильних машин та теплових насосів розроблені діаграми для різних холодильних робочих тіл – холодоагентів. На рис. А.3 (додаток А) показана  $p$ - $h$  діаграма аміаку, який використовується в потужних холодильних установках на підприємствах харчової, переробної та інших промисловостей.

## 2.2 Основи гідрогазодинаміки

**Гідрогазодинаміка** (Hydrogasdynamics) – наука про рух рідини. При цьому під рідиною розуміють не тільки воду чи інші крапельні речовини, а також гази, наприклад, повітря. Якщо розглядати газ без врахування його стисливості, застосовується термін "нестислива рідина", в протилежному випадку – "стислива рідина". Якщо за змістом слід розрізняти рідини та гази, рідину називають "крапельною рідиною", зберігаючи в іншому випадку термін "газ". Крапельна рідина (Drop liquid), наприклад, вода, бензин, нафта спроможні утворювати краплі, газ (повітря тощо) – ні.

В залежності від методики викладання матеріалу і області застосування гідрогазодинаміка набуває різних назв, наприклад, гідравліка, аеродинаміка, газодинаміка, але по суті залишається технічною механікою рідини та газу. **Гідравліка** – прикладна наука про закони руху рідини і спокій рідини.

Механіка рідини складніша механіки твердого тіла. Теоретична механіка як допустиму абстракцію використовує поняття матеріальної точки і системи матеріальних точок.

В механіці рідини та газу система матеріальних точок заміняється поняттям безперервного середовища, в якій немає розривів та пустот. Говорячи про безперервне середовище, ми виключаємо із розгляду молекулярну будову речовини, молекулярні рухи, точніше, враховуємо лише середні характеристики молекулярного руху, наприклад, тиск і температуру. Тобто вивчаємо тільки рухи, які спричинюються зовнішніми силами. Отже, гідрогазодинамічні явища носять макроскопічний характер: найменший об'єм середовища (елементарна частинка) вважається більшим в порівнянні з міжмолекулярними відстанями.

Область застосування гідрогазодинаміки сьогодні – теплоенергетичні системи та обладнання, трубопроводи, споруди, машини та апарати в різних галузях промисловості.

Об'єкти, досліджувані наукою "**гідрогазодинаміка**", ми зустрічаємо на кожному кроці. І самі ми, і усе, що нас оточує, рухається або в повітрі (птахи, автомобілі, літаки), або у воді (риби, дельфіни, підводні і надводні судна). Людині приходить вивчати повітряні і морські течії, припливні і вітрові хвилі, рух нафти і газу в тисячокілометрових трубах, плин крові в мікроскопічних кровоносних судинах.

**Гідромеханіка**, як і всяка наука, виникла і розвивається відповідно до потреб практики. Досягнення механіки рідини і газу використовують багато областей техніки. Авіація і кораблебудування, основними проблемами яких є швидкість, стійкість і керованість літака, швидкохідність, стійкість і керованість судна. Важливе значення має гідроаеродинаміка і газодинаміка в турбобудуванні і моторобудуванні, особливо в створенні реактивних і ракетних двигунів. Проточні частини гідротурбін, парової і газової турбін, реактивного двигуна, компресора або насоса являють со-

бою складні конструкції, що складаються з ряду нерухомих (напрямні апарати) і рухливих (робочі колеса) лопатевих систем. При обертанні робочих коліс їх лопаті обтікаються з великими відносними швидкостями водою, газом або паром. Від правильного гідродинамічного розрахунку форми профілів і конструкції лопатей залежить досягнення необхідної потужності машини, її високого коефіцієнта корисної дії. Широко використовує механіку рідини і газу сучасна теплотехніка, що займається інтенсифікацією процесів горіння в топках парових котлів, камерах згорання газових турбін, реактивних і ракетних двигунів, питаннями охолодження поверхонь, що зазнають дії гарячого газу.

### 2.2.1 Фізичні властивості рідин і газів

Основними фізичними властивостями рідин і газів є.

1. *Густина*, кг/м<sup>3</sup>.
2. *Питомий об'єм*, м<sup>3</sup>/кг.
3. *Питома вага* – вага одиниця об'єму, Н/м<sup>3</sup>.
4. *Стисливість* (адіабатична і ізотермічна) – властивість рідини змінювати свою густину при зміні температури і тиску.

Краплинні рідини відрізняються дуже малою стисливістю, що характеризується модулем ізотермічного стиску або коефіцієнтом ізотермічного стиску

$$\beta_p = -\frac{dV}{V} \cdot \frac{1}{dp}, \text{ м}^2/\text{Н або Па}^{-1} \quad (2.13)$$

Коефіцієнт температурного розширення визначає збільшення об'єму при підвищенні температури на 1 градус

$$\beta_t = -\frac{dV}{V} \cdot \frac{1}{dt}, \text{ 1/}^\circ\text{C}. \quad (2.14)$$

Коефіцієнт температурного розширення для води збільшується зі зростанням тиску, а для більшості краплинних рідин – зменшується.

5. *Сили зчеплення* і роль поверхневого натягу. У результаті молекулярного притягання між окремими молекулами рідини діють сили зчеплення. Унаслідок притягання між окремими частинками рідини, розташованими на поверхні, і зрівноважування всіх діючих на ці частинки сил виникає поверхневий натяг. На поверхні рідини утвориться своєрідна плівка. Величина поверхневого натягу залежить від роду рідини і температури: для води при 20 °С – приблизно 0,0725 Н/м; для ртуті – 0,54 Н/м.

6. *В'язкість* (внутрішнє тертя). При русі частинок здійснюється ковзання одного шару по іншому, у результаті чого відбувається процес, аналогічний тертю. Тому сили, що виникають при ковзанні шарів рідини, називають силами внутрішнього тертя. Наявність внутрішнього тертя в рідині зумовлює її властивість чинити опір відносному рухові (зрушенню) частинок рідини, що називається в'язкістю. В'язке тертя супроводжується

втратою енергії потоку. У 1687 р. Ньютон висловив гіпотезу, що сили внутрішнього тертя, які виникають між сусідніми шарами, що рухаються, прямо пропорційні швидкості відносного руху і площі поверхні зіткнення, уздовж якої відбувається рух і залежать від роду рідини

$$F = S\mu \frac{\partial u}{\partial y} . \quad (2.15)$$

У результаті внутрішнього тертя в рідинах виникають дотичні напруження, що можуть бути визначені як відношення сили внутрішнього тертя на площу тертя

$$\tau = \frac{F}{S} = \pm\mu \frac{\partial u}{\partial y} . \quad (2.16)$$

Оскільки величина дотичних напружень завжди позитивна, то знак у формулі варто приймати в залежності від знака градієнта швидкості. Коефіцієнт в'язкості  $\mu$  називають динамічним коефіцієнтом в'язкості і він має розмірність Н·с/м<sup>2</sup>. На практиці часто використовують коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu = \mu/\rho$ , м<sup>2</sup>/с.

**Ідеальною рідиною** називається рідина, що вважається зовсім нестиисловою і що не розширюється, має абсолютну рухливість частинок і в ній відсутні сили внутрішнього тертя (тобто сили в'язкості дорівнюють нулю).

### 2.2.2 Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля

Гідростатика вивчає фізичні характеристики рідини в стані спокою. У такому стані сили в'язкості не виявляються. Отже, реальні рідини, що знаходяться в спокої, будуть характеризуватися властивостями дуже близькими до властивостей ідеальної рідини.

Рідина у стані спокою зазнає дії двох категорій зовнішніх сил: масових і поверхневих. **Масові сили** – це сили, пропорційні масі рідини: сила ваги, а також сила інерції. Останні діють, наприклад, у тому випадку, коли рідина знаходиться у відносному спокої, будучи поміщена в цистерну, яка рухається, центрифугу та ін. **Поверхневі сили** – це сили, що діють на поверхні досліджуваних об'єктів рідини, наприклад, сила тиску поршня на поверхню.

У результаті дії зовнішніх сил усередині рідини виникають напруження, вимірювані в системі СІ в Н/м<sup>2</sup> = Па. Напруження стиску, яке виникає усередині рідини, що знаходиться в спокої, називається гідростатичним тиском або напруженням гідростатичного тиску.

Гідростатичний тиск спрямований завжди по внутрішній нормалі до площадки, на яку цей тиск діє. Гідростатичний тиск у будь-якій точці рідини в усіх напрямках однаковий.

Величина гідростатичного тиску в будь-якій точці рідини підпорядковується основному рівнянню гідростатики

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h . \quad (2.17)$$

Оскільки  $\rho \cdot g \cdot h$  залежить тільки від ваги стовпа рідини висотою  $h$  то, наскільки ми змінимо тиск  $p_0$  в точці А над поршнем, рівно настільки зміниться тиск  $p$  у будь-якій точці усередині рідини. У гідравліці це положення зветься **законом Паскаля**, який має кілька формулювань.

1. Зміна тиску в будь-якій точці в межах розглянутого об'єму викликає таку ж зміну тиску у всіх інших точках цього об'єму.

2. Зовнішній тиск, діючий на обмежену поверхню рідини, що знаходиться в рівновазі в замкнутій посудині, передається всередину рідини однаково всім її частинкам.

На цьому законі основана робота гідравлічних пресів, гідравлічних підйомників, гідравлічних гальм і т. д.

Для вимірювання тиску застосовують барометри, манометри і вакуумметри. **Барометрами** вимірюють атмосферний тиск, **манометри** служать для вимірювання тиску вище атмосферного. Якщо барометри безпосередньо вимірюють абсолютний тиск у середовищі, то манометри і вакуумметри – на скільки тиск у середовищі відрізняється від атмосферного. Манометри показують на скільки тиск у середовищі вищий атмосферного, тобто показують надлишковий тиск  $P_m = P_{абс} - P_{атм}$ .

Таким чином, якщо ми застосовуємо манометр, то для визначення тиску в середовищі до його показання слід додати атмосферний тиск  $P_{абс} = P_{атм} + P_m$ .

**Вакуумметри** служать для вимірювання тиску нижчого за атмосферний. За їх показниками судять на скільки тиск у середовищі нижчий атмосферного  $P_{вак} = P_{атм} - P_{абс}$ .

Тому, щоб одержати значення абсолютного (дійсного) тиску в середовищі, потрібно від атмосферного тиску відняти показання вакуумметра  $P_{абс} = P_{атм} - P_{вак}$ .

П'єзометри можуть замінити як манометри, так і вакуумметри.

**П'єзометри** зазвичай являють собою скляні трубки діаметром не меншим 0,5 см. При менших діаметрах трубки буде утворюватися помітний меніск, що вимагає внесення уточнень у розрахунки. П'єзометр показує надлишковий тиск (у середовищах з тиском вищим за атмосферний):  $P_{надл} = \rho \cdot g \cdot h$ .

### 2.2.3 Динаміка і кінематика рідини

#### Класифікація рухів

Часто зустрічаються процеси, при яких рідина або газ швидко рухаються. У цих процесах головну роль відіграють сили динамічного походження.

Розрізняють два види руху: сталий і несталий.

**Сталим** називається такий вид руху, при якому швидкості  $u$ , тиск  $P$ , глибини  $h$  не змінюються з часом  $\tau$ , а залежать лише від положення розглядуваної точки в потоці рідини

$$u = f(x, y, z); \quad v = f(x, y, z); \quad w = f(x, y, z). \quad (2.18)$$

Сталий рух поділяють на рух *рівномірний*, при якому швидкості, тиски, глибини не змінюються по довжині потоку, і *нерівномірний*. Наприклад, в конічній трубі по довжині змінюються поперечний переріз потоку і відповідно усі його характеристики. Отже, маємо нерівномірний рух.

*Несталим* називається вид руху, при якому всі перераховані вище параметри є функцією не тільки координат, але і часу

$$u = f(x, y, z, \tau); \quad w = f(x, y, z, \tau); \quad w = f(x, y, z, \tau). \quad (2.19)$$

*Напірним* називають рух рідини в потоці без вільної поверхні, він звичайно спостерігається в закритих трубопроводах. При напірному русі рідина цілком заповнює поперечний переріз, який утворений твердими стінками. Напірний рух відбувається в умовах різниці тисків по довжині потоку, створеної, наприклад, насосом, водонапірною баштою та ін.

*Безнапірним* називається рух з вільною поверхнею, який здійснюється під дією ваги.

*Живим перерізом* називають поверхню в межах потоку рідини, що нормальна в кожній своїй точці до відповідної усередненої швидкості в цій точці.

Витрата повного потоку рідини дорівнює площі живого перерізу потоку  $\omega$ ,  $\text{м}^2$ , помноженій на середню швидкість  $v$ ,  $\text{м/с}$  і визначається у  $\text{м}^3/\text{с}$

$$Q = v \cdot \omega. \quad (2.20)$$

Рівняння нерозривності для цілого потоку рідини показує, що добуток площі живого перерізу  $\omega_i$  на швидкість  $v_i$  у тім же перерізі є величина стала. Тобто, витрата рідини у всіх перерізах потоку однакова

$$Q = v_i \cdot \omega_i = \text{const} \quad \text{або} \quad Q = v_1 \cdot \omega_1 = v_2 \cdot \omega_2 = v_i \cdot \omega_i = \dots = v_n \cdot \omega_n. \quad (2.21)$$

### Режими руху в'язкої рідини

У 1883 р. англійський фізик Осборн Рейнольдс опублікував результати своїх досліджень, що наочно ілюстрували існування в природі ламінарного і турбулентного режимів руху рідини. При ламінарному режимі спостерігається струминний рух, частинки рідини рухаються паралельно. Ламінарний режим реалізується переважно при русі в'язких рідин: нафти, бітуму, мастил, мазуту тощо. При турбулентному режимі спостерігається перемішування частинок. Наприклад, у водопровідних трубах.

На практиці широке застосування для характеристики режимів руху рідини отримало число Рейнольдса

$$Re = v \cdot d / \nu, \quad (2.22)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Наприклад, в круглій трубі при  $Re \leq 2300$  має місце ламінарний режим, при  $Re > 4000 \dots 13600$  – турбулентний, при  $2300 < Re \leq 4000 \dots 13600$  – перехідний.

## 2.2.4 Рівняння Бернуллі для цілого потоку в'язкої рідини

Рівняння було виведено для плавно змінного потоку в'язкої рідини, що поданий у вигляді сукупності елементарних струмків. Просумувавши енергії всіх елементарних струмків, що складають потік, і втрат енергії, була отримана така формула

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_{\text{втр}}^{1-2} . \quad (2.23)$$

Сума його членів  $\left( Z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \right)$  і  $\left( Z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \right)$  є сума

трьох питомих енергій цілого потоку в'язкої рідини в перерізах 1-1 і 2-2:

- $z_1$  і  $z_2$  являють собою питому енергію положення;
- $P_1/(\rho \cdot g)$  і  $P_2/(\rho \cdot g)$  – питому потенціальну енергію тиску потоку;
- $\alpha_1 \cdot v_1^2/(2 \cdot g)$  і  $\alpha_2 \cdot v_2^2/(2 \cdot g)$  – питому кінетичну енергію потоку.

Слово "питому" означає, що всі елементи рівняння віднесені до одиниці ваги рідини.

Коефіцієнти  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  враховують вплив нерівномірності розподілу швидкостей по живому перерізу потоку. У наближених розрахунках приймається: для ламінарного режиму течії  $\alpha = 2$ , для турбулентного –  $\alpha = 1$ .

Розв'язування задачі з застосуванням рівняння Бернуллі слід починаати з наведення розрахункової схеми, на якій обов'язково треба показати площину порівняння 0-0 (горизонтальна площина) (Horizontal plane), два перерізи 1-1 і 2-2, геометричні висоти  $z_1$  і  $z_2$  – тобто відповідні відстані від площини порівняння до центрів 1-го і 2-го перерізів.

## 2.2.5 Гідравлічні опори

При русі в'язкої рідини у результаті опору рухові сума трьох питомих енергій цілого потоку зменшується. Це в рівнянні Бернуллі враховується членом  $h_w$ , який визначає частину механічної енергії, яка переходить в теплову і розсіюється. Ця частина безповоротно втрачається.

Опори (Resistances) бувають двох видів.

1. Опори, що виявляються рівномірно по довжині потоку. Втрати називаються втратами по довжині –  $h_\ell$ .

2. Опори, що виявляються на короткій відстані в місцях різкої зміни конфігурації потоку. Втрати називаються місцевими –  $h_m$ .

Причиною опорів в обох випадках є в'язкість. Питома втрата енергії між двома перерізами  $h_w$  складається із питомих втрат енергії по довжині  $h_\ell$  і в місцевих опорах  $\Sigma h_m$

$$h_w = h_\ell + \Sigma h_m . \quad (2.24)$$

Розмірність питомих втрат енергії в даному випадку – в метрах рідинного стовпа. Це слід розуміти так. Енергія виражається в джоулях  $\text{Дж} = \text{Н} \cdot \text{м}$ . Віднесемо енергію до одиниці ваги, маємо  $\text{Дж}/\text{Н} = \text{м}$ .



### Втрати напору по довжині потоку

Втрати напору (питомої енергії) по довжині визначаються за формулою Дарсі

$$h_\ell = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (2.25)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт опору тертя, що у загальному випадку залежить від режиму руху рідини (число Рейнольдса  $Re$ ) і відносної шорсткості стінок каналу  $\Delta/d$ , тобто  $\lambda = f(Re, \Delta/d)$ ;

$\ell$ ,  $d$  – відповідно довжина каналу, характерний розмір живого перерізу каналу, наприклад, для круглої труби це геометричний діаметр, м;

$v$  – середня швидкість по перерізу каналу, м/с;

$g$  – прискорення земного тяжіння, м/с<sup>2</sup>.

При виборі залежності для розрахунку  $\lambda$  варто визначити режим течії з використанням числа  $Re$ , а також геометричні особливості каналів і матеріал, із якого вони виготовлені (метал, поліетилен, скло тощо).

При ламінарному режимі руху фіксується істотна нерівномірність розподілу швидкостей по живому перерізу. Біля стінки рідина прилипає до неї, при цьому швидкість руху в більшості випадків дорівнює нулю.

Перший примежовий шар, що рухається, буде ковзати по стінці, покритій прилиплими частинками, другий – по першому і т. д. При достатньому віддаленні від стінки швидкість руху збільшується і досягає максимуму на осі труби. При такій схемі руху тертя характеризується зчепленням частинок рідини, що знаходяться в двох сусідніх шарах і рухаються з різними швидкостями. При ламінарному русі коефіцієнт тертя залежить від числа  $Re$  і визначається за формулою Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2.26)$$

Отже, коефіцієнт  $\lambda$  прямо пропорційний в'язкості і не залежить від шорсткості стінок труби.

Наведені залежності можна застосовувати на стабілізованих ділянках потоку. Коефіцієнт тертя на початковій ділянці буде більший, ніж на іншій зі стабілізованою течією частині труби. Якщо довжина труби  $l > 0,05 \cdot Re \cdot d$ , розрахунок втрат напору можна вести за формулою Пуазейля і не враховувати початкову ділянку.

Механізм турбулентного руху набагато складніший, ніж ламінарного. При турбулентному русі частинки рідини безупинно перемішуються, а швидкість у будь-якій точці весь час змінюється за величиною і за напрямком біля деякого середнього значення.

Коефіцієнт опору знаходять за емпіричними формулами в залежності від міри гідравлічної шорсткості труб.

Розрізняють три області.

1. Область гідравлічно гладких труб: виступи і шорсткості покриті ламінарним підшаром і не порушується його цілісність. У цьому випадку шорсткість не впливає на гідравлічні втрати і коефіцієнт тертя залежить тільки від числа Рейнольдса  $\lambda = f(\text{Re})$ .

2. Область гідравлічно шорстких (Hydraulic roughness) труб: виступи і шорсткості набагато вищі товщини ламінарного підшару. Відривне обтікання виступів приводить до втрат тертя при обтіканні тіл і коефіцієнт тертя від числа Рейнольдса не залежить  $\lambda = f(\Delta/d)$ .

3. Перехідна область: висота виступів шорсткості того ж порядку, що і товщина ламінарного підшару. У цьому випадку на гідравлічні втрати впливає як число Рейнольдса, так і величина виступів. Для розрахунків можна використати формулу Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}, \quad (2.27)$$

тобто універсальною формулою Альтшуля можна користуватись як в області гладких так і в області шорстких труб. При малих значення  $\text{Re}$ , коли

$68/\text{Re} \gg \Delta/d$ , вона перетворюється у формулу  $\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}$ , а при вели-

ких значення  $\text{Re}$ , коли  $68/\text{Re} \ll \Delta/d$ , вона має вигляд формули Шифринсо-

на  $\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$ .

### Місцеві втрати напору

Місцеві втрати напору в трубах і каналах обумовлені різними факторами: різка зміна конфігурації потоку, рух зі зміною швидкостей, злиття потоків. Втрати енергії обумовлені появою вихрових зон, переформуванням кінетичної структури потоку.

У 1840 р. Вейсбах запропонував визначати місцеві втрати напору за формулою

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}. \quad (2.28)$$

Коефіцієнт місцевих втрат напору  $\zeta$  визначають за експериментальними даними. Наводимо деякі значення коефіцієнтів опору для квадратичної області: пробковий кран  $\zeta = 0,4 \dots 1,5$ ; вентиль –  $\zeta = 2,5 \dots 6,0$ ; засувка, що повністю відкрита, –  $\zeta = 0,17$ ; вхід з резервуара в трубу –  $\zeta = 0,5$ ; вихід із труби в резервуар –  $\zeta = 1$ .

## 2.3 Основи тепломасообміну

*Теплопередача або теплообмін (Heat exchange)* – вчення про самовільні необоротні процеси розповсюдження теплоти в просторі. Під проце-

сом розповсюдження теплоти розуміється обмін внутрішньою енергією між окремими елементами, областями середовища, що розглядається.

Перенесення теплоти здійснюється трьома основними способами: теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням.

**Теплопровідність** (Heat Conductivity) є молекулярним перенесенням теплоти в тілах (або між ними), обумовленим змінністю температури в даному просторі.

**Конвекція** (Convection) можлива тільки в рухомому середовищі. Під конвекцією теплоти розуміють процес її перенесення при переміщенні об'ємів рідини або газу (рухомого середовища) в просторі з області з однією температурою в область з іншою. При цьому перенесення теплоти нерозривно пов'язано з перенесенням самого середовища.

**Теплове випромінювання** (Thermal radiation) – процес розповсюдження теплоти за допомогою електромагнітних хвиль, обумовлений тільки температурою і оптичними властивостями випромінюючого тіла. При цьому внутрішня енергія тіла (середовища) переходить в енергію випромінювання. Процес перетворення внутрішньої енергії речовини в енергію випромінювання, перенесення випромінювання і його поглинання речовиною називається теплообміном випромінюванням.

В природі і техніці елементарні процеси розповсюдження теплоти – теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання дуже часто відбуваються сумісно. Теплопровідність в чистому вигляді переважно має місце лише в твердих тілах. Конвекція теплоти завжди супроводжується теплопровідністю. Сумісний процес перенесення теплоти конвекцією і теплопровідністю називається **конвективним теплообміном**.

Процеси теплопровідності і конвективного теплообміну можуть супроводжуватися теплообміном випромінюванням. Теплообмін, обумовлений сумісним перенесенням теплоти випромінюванням і теплопровідністю, називають **радіаційно-кондуктивним теплообміном**.

Якщо перенесення теплоти здійснюється додатково і конвекцією, то такий процес називають **радіаційно-конвективним теплообміном**.

Іноді радіаційно-кондуктивне і радіаційно-конвективне перенесення теплоти називають **складним теплообміном**.

В техніці і в побуті часто відбуваються процеси теплообміну між різними рідинами, розділеними твердою стінкою. Процес передавання теплоти від гарячої рідини до холодної через стінку, що їх розділяє, називається **теплопередачею** (Heat transfer).

Теплопередача здійснюється різними елементарними процесами теплоперенесення. Парогенерувальні труби котельного агрегату, наприклад, одержують теплоту від продуктів згорання палива в результаті радіаційно-конвективного теплообміну. Через шар зовнішнього забруднення, металеву стінку і шар накипу теплота передається теплопровідністю. Від внутрішньої поверхні труби до рідини, що її омиває, теплота переноситься конвективним теплообміном (тепловіддачею).

Тепловий потік може бути визначений за основним рівнянням теплопередачі, Вт

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta \bar{t}, \quad (2.29)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;

$\Delta \bar{t}$  – середньотемпературний напір, °С.

Процеси теплообміну можуть відбуватися в різних середовищах: чистих речовинах і сумішах, при зміні і без зміни агрегатного стану робочих середовищ і т. д. Залежно від цього теплообмін протікає по різному і описується різними рівняннями. Багато процесів перенесення теплоти супроводжуються перенесенням речовини. Наприклад, при випаровуванні води в повітря, крім теплообміну, має місце і перенесення пари, що утворилася, в пароповітряну суміш. В загальному випадку перенесення пари здійснюється як молекулярним, так і конвективним шляхом.

Сумісний молекулярний і конвективний перенос маси називають **конвективним масообміном**.

При наявності масообміну процес теплообміну ускладнюється. Теплота додатково може переноситися разом з масою дифундуючих речовин.

В загальному випадку перенесення теплоти в суміші різних речовин може викликатися неоднорідним розподілом інших фізичних величин, крім температури. Наприклад, різниця концентрації компонентів суміші приводить до додаткового молекулярного перенесення теплоти (дифузійний термоэффект). Звичайно перенесення теплоти, обумовлене подібними ефектами, порівняно невелике і, як правило, ним можна нехтувати.

### 2.3.1 Теплопровідність

Необхідною умовою розповсюдження теплоти є нерівномірність розподілу температури в середовищі. Таким чином для передавання теплоти необхідний ненульовий градієнт температури в різних точках тіла.

Відповідно до закону Фур'є теплота  $dQ_\tau$ , Дж, що проходить через елемент ізотермічної поверхні  $dF$ , м<sup>2</sup>, за проміжок часу  $d\tau$ , с, пропорційна температурному градієнту  $\partial t / \partial n$

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau. \quad (2.30)$$

Теплота, що проходить за одиницю часу через одиницю площі ізотермічної поверхні називається **густиною теплового потоку**, яка в скалярному вигляді записується так

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (2.31)$$

Залежність (2.31) – математичний запис **основного закону теплопровідності** – густина теплового потоку пропорційна градієнту температури.

Коефіцієнт пропорційності  $\lambda$  в рівняннях (2.30) і (2.31) характеризує здатність речовини проводити теплоту і називається **коефіцієнтом теплопровідності**.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти теплопровідності речовин  $\lambda$ , Вт/(м·К)

| Речовина                   | Значення $\lambda$           | Речовина              | Значення $\lambda$       |
|----------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Азбестовий картон          | $0,03 + 0,85 \cdot 10^{-4}t$ | Скло (0..100 °С)      | 0,7...0,88               |
| Бетон з щебенем            | 1,28                         | Повітря (0..100 °С)   | 0,0244...0,0321          |
| Залізобетон                | 1,55                         | Вода (0..100 °С)      | 0,55...0,683             |
| Папір (20 °С)              | 0,14                         | Сталь (100 °С)        | 50...54                  |
| Деревина (дуб) (0...50 °С) | 0,2...0,43                   | Мідь (0...100 °С)     | 393...384                |
| Цегляна кладка (0 °С)      | 0,81...0,87                  | Алюміній (0...100 °С) | 202...206                |
| Лід (0 °С)                 | 2,2                          | Пінополістирол        | $0,03 + 0,00015 \cdot t$ |

Густина теплового потоку для теплопровідності через одношарову плоску стінку (див. рис. 2.2 а) визначається за формулою, Вт/м<sup>2</sup>

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}), \quad (2.32)$$

де  $\delta$  – товщина стінки, м;

$t_{c1}$ ,  $t_{c2}$  – температура з обох боків стінки, °С.

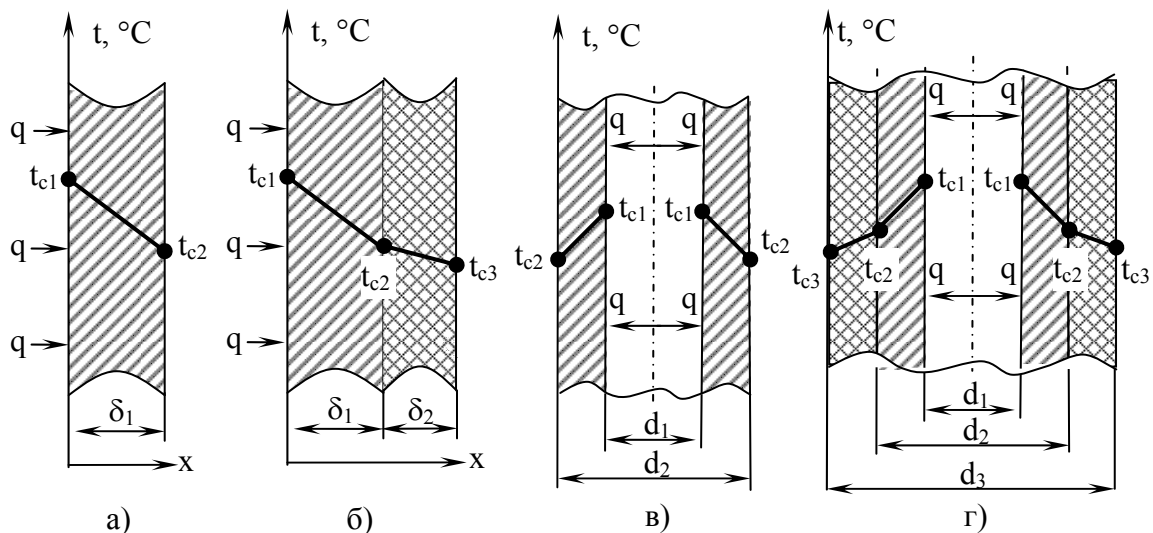


Рисунок 2.2 – Теплопровідність через плоску (а, б), циліндричну (б, в), одношарову (а, в) та багатшарову (б, г) стінку

Відношення  $\lambda/\delta$  називають тепловою провідністю стінки, а обернену величину  $\delta/\lambda$  – термічним опором стінки.

Для одношарової циліндричної стінки (див. рис. 2.2 в) визначають лінійну густина теплового потоку, Вт/м

$$q_\ell = \frac{(t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (2.33)$$

Густина теплового потоку для багатошарової плоскої (рис. 2.2,б) та циліндричної (рис. 2.2,г) стінки, відповідно, Вт/м<sup>2</sup> і Вт/м

$$q = \frac{(t_{c1} - t_{c3})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}, \quad (2.34)$$

$$q_\ell = \frac{(t_{c1} - t_{c3})}{\frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}}. \quad (2.35)$$

### 2.3.2 Конвективний теплообмін

Конвективний теплообмін пов'язаний із передаванням теплоти за рахунок теплопровідності та конвекції.

В інженерних розрахунках часто визначають конвективний теплообмін між потоками рідини або газу і поверхнею твердого тіла. Цей процес конвективного теплообміну називають **конвективною тепловіддачею або тепловіддачею**.

Для розрахунків тепловіддачі використовують закон Ньютона-Ріхмана, який в загальному вигляді записується так

$$q = \alpha \cdot (t_c - t_p), \quad (2.36)$$

де  $(t_c - t_p)$  – різниця температур між стінкою і рідиною або температурний напір, °С.

Згідно з цим законом тепловий потік прямо пропорційний площі поверхні  $F$  і температурному напору  $(t_c - t_p)$ . Коефіцієнт пропорційності  $\alpha$  називається **коефіцієнтом тепловіддачі**.

Цей коефіцієнт залежить від умов протікання процесу, форми тіла, режиму руху, температури та інших властивостей потоку, що омиває стінку тощо.

Між коефіцієнтом теплопередачі через плоску стінку, теплопровідністю і коефіцієнтами тепловіддачі з обох боків стінки є зв'язок, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.37)$$

Для циліндричної стінки лінійний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·К)

$$k_\ell = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}. \quad (2.38)$$

Конвекцію поділяють на вільну (коли рух відбувається за рахунок нерівномірності масових сил, пов'язаних, наприклад, з нерівномірністю

температурного поля) та примусову (коли рух відбувається за рахунок підведення енергії ззовні, наприклад, під дією насоса).

Орієнтовні значення коефіцієнта інтенсивності конвективної тепловіддачі  $\alpha$  складають:

- за умов вільної конвекції повітря  $3 \dots 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- за умов вільної конвекції води  $300 \dots 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- за умов примусової конвекції газів  $10 \dots 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- за умов примусової конвекції води  $10^3 \dots 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- за умов кипіння або конденсації водяної пари  $10^3 \dots 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

### 2.3.3 Теплове випромінювання

Процеси променистого теплообміну широко використовуються в теплоенергетиці, ракетній техніці, металургії, хімічній промисловості тощо.

Промениста енергія виникає за рахунок енергії інших видів в результаті складних молекулярних і внутріатомних процесів. Природа всього випромінювання однакова. Воно розповсюджується в просторі електромагнітними хвилями. Джерелом теплового випромінювання є внутрішня енергія нагрітого тіла. Кількість променистої енергії в основному залежить від фізичних властивостей і температури випромінюючого тіла.

Випромінювання властиво всім тілам, і кожне з них випромінює і поглинає енергію безперервно, якщо температура його не рівна 0 К. При однакових або різних температурах між тілами, розташованими в просторі, існує безперервний променистий теплообмін. При температурній рівновазі тіл кількість променистої енергії, що віддається, буде рівна кількості променистої енергії, що поглинається.

Інтегральний потік, що відпускається з одиниці поверхні називається густиною потоку випромінювання

$$E = \frac{dQ}{dF}, \quad (2.39)$$

де  $Q$  – променистий тепловий потік, Вт, що відпускається з площі поверхні  $dF$ ,  $\text{м}^2$ .

Кожне тіло здатне не тільки випромінювати, але і відбивати, поглинати і пропускати через себе падаюче випромінювання від іншого тіла.

Для тіла, що бере участь у променевому теплообміні з іншими тілами, на основі закону збереження енергії можна скласти рівняння теплового балансу

$$E_{\text{пад}} = E_{\text{погл}} + E_{\text{відб}} + E_{\text{проп}}, \quad (2.40)$$

де  $E_{\text{пад}}$ ,  $E_{\text{погл}}$ ,  $E_{\text{відб}}$ ,  $E_{\text{проп}}$  – теплові потоки, що падають на поверхню тіла, поглинуті, відбиті і пропущені ним, Вт.

Для переважної більшості твердих тіл  $E_{\text{проп}} = 0$ . Якщо  $E_{\text{пад}} = E_{\text{погл}}$ , то це абсолютно чорне тіло, якщо  $E_{\text{пад}} = E_{\text{відб}}$  – то це абсолютно біле тіло.

В природі не існує абсолютно чорних і білих тіл, але такі поняття є важливими для порівняння властивостей тіл.

Густина теплового потоку випромінювання визначається за законом Стефана-Больцмана, який для практичних розрахунків подається у вигляді, Вт/м<sup>2</sup>

$$E = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \left( \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right), \quad (2.41)$$

де  $\varepsilon$  – міра чорноти тіла, значення якої для різних матеріалів наведено в табл. 2.2;

$c_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла,  $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;

$T, T_{ст}$  – абсолютна температура тіла, що випромінює, та стінки, на яку випромінюється теплота, К.

Таблиця 2.2 – Міра чорноти матеріалів  $\varepsilon$

| <i>Матеріал</i>                    | <i>Значення <math>\varepsilon</math></i> | <i>Матеріал</i>         | <i>Значення <math>\varepsilon</math></i> |
|------------------------------------|--|-------------------------|--|
| Алюміній полірований (50...150 °С) | 0,04...0,06                              | Цегла шамотна (1000 °С) | 0,75                                     |
| Жерсть (20 °С)                     | 0,28                                     | Цегла червона (20 °С)   | 0,88...0,93                              |
| Мідь полірована (50...100 °С)      | 0,02                                     | Деревина (20 °С)        | 0,8...0,9                                |
| Сталь (50 °С)                      | 0,56                                     | Скло (20...100 °С)      | 0,91...0,94                              |
| Чавун (50 °С)                      | 0,81                                     | Сажа                    | 0,95                                     |

### 2.3.4 Масообмін

Аналогічно теплообміну масообмін (Mass exchange) може відбуватись як молекулярним, так і молярним шляхом.

**Дифузія** (Diffusion) характеризується потоком маси компонента, тобто кількістю руху, що проходить за одиницю часу через дану поверхню в напрямку нормалі до неї. Густина потоку маси, кг/(м<sup>2</sup>·с)

$$j = \frac{dJ}{dF}, \quad (2.42)$$

де  $J$  – потік маси, кг/с.

В однорідній за температурою і тиском суміші густина потоку маси визначається за законом Фіка

$$j = -D \frac{\partial \rho_i}{\partial n}, \quad (2.43)$$

де  $\rho_i$  – місцева концентрація даного компонента, кг/м<sup>3</sup>;

$D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії або **коефіцієнт дифузії**, м<sup>2</sup>/с;

Градiєнт концентрації є рушійною силою масообміну. Таку дифузію називають **концентраційною дифузією**.



Існує також **термічна дифузія**, яка виникає, якщо температура суміші нерівномірна. Тоді найбільш важкі або найбільш крупні молекули намагаються перейти в більш холодну зону. Така дифузія може бути значною лише при великих температурних нерівномірностях суміші.

**Бародифузія** пов'язана із нерівномірністю тиску суміші. В такому випадку більш важкі молекули переходять зону підвищеного тиску, а легкі – в зону пониженого. Така дифузія виникає при значних перепадах тиску і різних молекулярних масах компонентів.

Таким чином, перенесення маси компонента в суміші шляхом молекулярної дифузії є наслідком концентраційної, термічної та бародифузії.

В рухомому середовищі речовина переноситься не тільки молекулярною дифузією, але й конвекцією.

Практичний інтерес викликають процеси сушки, випаровування, сублімації, конденсації, сорбції, десорбції тощо. В таких гетерогенних системах межа тверде тіло-газ і рідина-газ відіграє таку ж роль, як стінка в конвективному теплообміні. Масообмін між рідкою або твердою поверхнею і газом називають **масовіддачею**.

В розрахунках масовіддачі використовують формулу

$$j_{ic} = \beta(\rho_{ic} - \rho_{i0}), \quad (2.44)$$

де  $j_{ic}$  – середня густина потоку маси  $i$ -го компонента,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$\beta$  – коефіцієнт масовіддачі,  $\text{м}/\text{с}$ ;

індекси  $c$  і  $0$  відповідають концентрації на межі поділу фаз і вдалині від неї.

### Контрольні запитання

1. Дайте означення поняття теплотехніка. Наведіть основні напрями використання теплоти.
2. Наведіть основні термодинамічні параметри стану.
3. В яких одиницях вимірюється тиск і які співвідношення між цими одиницями?
4. Поясніть поняття внутрішня енергія, ентальпія, робота. Як вони визначаються?
5. Термічний ККД циклу Карно і висновки, отримані на його основі.
6. Наведіть перший закон термодинаміки.
7. Поясніть другий закон термодинаміки.
8. Які діаграми використовуються в термодинамічних розрахунках?
9. Які процеси вивчає гідрогазодинаміка? Наведіть приклади.
10. Наведіть основні фізичні властивості рідин і газів.
11. Основне рівняння гідростатики. Закон Паскаля.
12. Дайте означення сталого, рівномірного, напірного руху рідини.
13. Живий переріз та витрата потоку.

14. Поясніть число Рейнольдса і режими руху потоку.
15. Наведіть рівняння Бернуллі. Поясніть його складові.
16. Втрати тиску потоку по довжині труби і в місцевих опорах.
17. Поясніть методи визначення коефіцієнтів гідравлічного опору в залежності від режиму течії потоку.
18. Дайте означення понять теплопередача, теплообмін. Способи передавання теплоти.
19. Поясніть основне рівняння теплопередачі. Яким чином визначається коефіцієнт теплопередачі?
20. Закон Фур'є. Тепловий потік через плоску стінку.
21. Теплопровідність різних матеріалів. Тепловий потік через циліндричну стінку.
22. Закон Ньютона-Ріхмана. Діапазони коефіцієнтів тепловіддачі для різних умов теплообміну.
23. Дайте пояснення процесу теплового випромінювання. Закон Стефана-Больцмана.
24. Закон Фіка. Різновиди дифузії.

### Приклади розв'язання задач

**Приклад 2.1.** Визначити питомий об'єм і густину повітря, якщо його маса 88 кг займає об'єм 73 м<sup>3</sup>.

#### *Розв'язання*

Визначимо питомий об'єм повітря за (2.1), м<sup>3</sup>/кг

$$v = V / M = 73 / 88 = 0,830.$$

Визначимо густину повітря, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho = M / V = 88 / 73 = 1,205.$$

**Приклад 2.2.** В бачок з електронагрівником залито 15 кг води з температурою 10 °С. Визначити кінцеву температуру води в разі 12-хвилинної роботи підігрівника, якщо сила струму 5 А, а напруга 220 В. Середню теплоємність води прийняти 4,19 кДж/(кг·К).

#### *Розв'язання*

Теплота, що виділилась під час роботи підігрівника, кДж

$$Q = I \cdot U \cdot \tau = 5 \cdot 220 \cdot (12 \cdot 60) \cdot 10^{-3} = 792.$$

Кінцева температура води, °С

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{G \cdot c} = 10 + \frac{792}{15 \cdot 4,19} = 22,6.$$

**Приклад 2.3.** В балоні ємністю 50 л перебуває повітря з тиском 7,5 м рт. ст. і температурою 40 °С. Температура повітря зменшується на 20 °С. Визначити відведену теплоту і кінцевий тиск повітря в балоні.

**Розв'язання**

Газова стала повітря, кДж/(кг·К)

$$R = 8,314 / \mu = 8,314 / 29 = 0,287 .$$

Ізохорна теплоємність повітря, кДж/(кг·К)

$$C_v = R / k - 1 = 0,287 / (1,33 - 1) = 0,869 .$$

З рівняння Менделєєва визначаємо масу повітря в балоні, кг

$$PV = mRT \Rightarrow m = \frac{P_1 V}{RT_1} = \frac{(7,5 \cdot 10^3 \cdot 133,32) \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{287 \cdot (273 + 40)} = 0,557 .$$

Кінцевий тиск повітря, Па

$$P_2 = m \frac{RT_2}{V} = 0,557 \cdot \frac{287 \cdot (273 + 40)}{50 \cdot 10^{-3}} = 935760 \text{ або } 7,02 \text{ м рт. ст.}$$

Процес ізохорний, тому зміна внутрішньої енергії дорівнює відведеній теплоті, кДж

$$Q = \Delta U = m \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1) = 0,557 \cdot 0,869 \cdot (40 - 20) = 9,68 .$$

**Приклад 2.4.** Посудина I заповнена водою (рис.2.3). Диференційний манометр II підключений до посудини I і залитий ртуттю,  $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$ . З боку посудини в дифманометрі над ртуттю знаходиться вода густиною  $1000 \text{ кг/м}^3$ . В трубці, що контактує з атмосферою, над ртуттю – повітря. Дано:  $h_{p1} = 1,0 \text{ м}$ ;  $h_{p2} = 0,9 \text{ м}$ ;  $h_{рт2} = 680 \text{ мм рт. ст}$ ; барометричний тиск  $B = 743 \text{ мм рт. ст}$ .

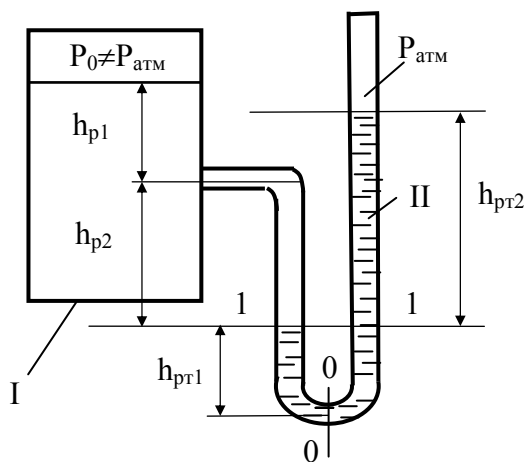


Рисунок 2.3

Знайти абсолютний тиск  $P_0$  над вільною поверхнею води в посудині I.

**Розв'язання**

Атмосферний тиск складає, Па

$$P_{атм} = B \cdot 133,32 = 743 \cdot 133,32 = 99057 .$$

В перерізі 0-0 абсолютний тиск зліва за (2.17) дорівнює

$$P_{0-0} = P_0 + \rho_v \cdot g \cdot (h_{p1} + h_{p2}) + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2} ,$$

а справа

$$P_{0-0} = P_{атм} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт1} .$$

Рідина знаходиться в спокої. Тиски  $P_{0-0}$  зліва і справа рівні між собою, отже

$$P_0 + \rho_v \cdot g \cdot (h_{p1} + h_{p2}) + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт1} = P_{атм} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт1} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2}$$

або 
$$P_0 + \rho_v \cdot g \cdot (h_{p1} + h_{p2}) = P_{атм} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2} .$$

З останнього виразу тиск в посудині, Па

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{атм} + \rho_{рт} \cdot g \cdot h_{рт2} - \rho_v \cdot g \cdot (h_{p1} + h_{p2}) = \\ &= 99057 + 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,68 - 1000 \cdot 9,81 \cdot (1,0 + 0,9) = 171141. \end{aligned}$$

**Приклад 2.5.** Визначити масову витрату гарячої води в трубопроводі з внутрішнім діаметром  $d_{вн} = 412$  мм, якщо відомо, що середня швидкість води  $v = 3$  м/с, а густина  $\rho_v = 917$  кг/м<sup>3</sup>.

**Розв'язання**

Об'ємна витрата води, що протікає через переріз трубопроводу визначається за (2.20), м<sup>3</sup>/с

$$Q = \omega \cdot v = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \cdot v = \left( \frac{3,14 \cdot 0,412^2}{4} \right) \cdot 3 = 0,4.$$

Тоді масова витрата води, кг/с

$$M = Q \cdot \rho_v = 0,4 \cdot 917 = 336,8.$$

**Приклад 2.6.** В круглій трубі довжиною 50 м і внутрішнім діаметром 51 мм тече вода з витратою 0,6 кг/с. Густина води 998 кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт кінематичної в'язкості  $1,01 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Труба сталева з шорсткістю 0,1 мм. На трубі встановлено дві засувки з опором  $\zeta = 1$  кожна. Визначити загальні втрати тиску потоку.

**Розв'язання**

Швидкість води в трубі, м/с

$$v_v = \frac{4 \cdot G}{\rho_v \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,6}{998 \cdot 3,14 \cdot 0,051^2} = 0,294.$$

Число Рейнольдса за (2.22)

$$Re_v = \frac{(v_v \cdot d)}{\nu_v} = \frac{(0,294 \cdot 0,051)}{1,01 \cdot 10^{-6}} = 14846,$$

тобто режим руху – турбулентний.

Коефіцієнт тертя по довжині труби за (2.27)

$$\lambda_1 = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{Re} + \frac{k_e}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{68}{14846} + \frac{0,0001}{0,051} \right)^{0,25} = 0,0312.$$

Втрати тиску на тертя по довжині труби, Па

$$\Delta P_d = \lambda_1 \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho_v \cdot v_v^2}{2} = 0,0312 \cdot \frac{50}{0,051} \cdot \frac{998 \cdot 0,294^2}{2} = 1319.$$

Втрати тиску в місцевих опорах, Па

$$\Delta P_M = \sum \zeta \cdot \frac{\rho_B \cdot v_B^2}{2} = (1 + 1) \cdot \frac{998 \cdot 0,294^2}{2} = 86,26.$$

Загальні втрати тиску в трубопроводі, Па

$$\Delta P = \Delta P_D + \Delta P_M = 1319 + 86,3 = 1405,3.$$

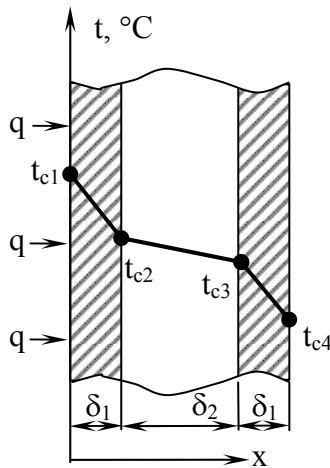


Рисунок 2.4

**Приклад 2.7.** Віконна рама (рис. 2.4) складається з двох листів скла товщиною  $\delta_1 = 4,0$  мм і прошарку повітря товщиною  $\delta_2 = 40$  мм. Температура скла всередині приміщення  $t_{c1} = 15$  °С, а ззовні  $t_{c4} = -30$  °С. Коефіцієнт теплопровідності скла і повітря 0,74 і 0,026 Вт/(м·К), відповідно. Конвекцією в повітряному прошарку знехтувати. Визначити густину потоку тепловтрат через вікно і температури на всіх поверхнях.

**Розв'язання**

Густина теплового потоку багатопарового вікна за (2.34), Вт/м<sup>2</sup>

$$q = \frac{(t_{c1} - t_{c4})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}} = \frac{(15 - (-30))}{\frac{0,004}{0,74} + \frac{0,04}{0,026} + \frac{0,004}{0,74}} = 29,05.$$

Температуру на зовнішній поверхні внутрішнього скла  $t_{c2}$  визначимо з густини теплового потоку за (2.32), °С

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{c1} - t_{c2}) \Rightarrow t_{c2} = t_{c1} - \frac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1} = 15 - \frac{29,05 \cdot 0,004}{0,74} = 14,84.$$

Температура на внутрішній поверхні зовнішнього скла  $t_{c3}$ , °С

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_{c2} - t_{c3}) \Rightarrow t_{c3} = t_{c2} - \frac{q \cdot \delta_2}{\lambda_2} = 14,84 - \frac{29,05 \cdot 0,04}{0,026} = -29,85.$$

**Приклад 2.8.** Плоска стінка омивається з одного боку димовими газами з температурою 500 °С, а з іншого – водою з температурою 50 °С. Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки 40 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а від стінки до води 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Визначити коефіцієнт теплопередачі, густину теплового потоку і температуру стінки з обох боків, якщо товщина стінки 5 мм, а коефіцієнт теплопровідності 40 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### Розв'язання

Визначимо коефіцієнт теплопередачі за (2.37), Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cr}}{\lambda_{cr}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{40} + \frac{0,005}{40} + \frac{1}{1000}} = 38,28.$$

Густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>

$$q = k \cdot (t_r - t_b) = 38,28 \cdot (500 - 50) = 17225.$$

Температура стінки з боку газів за (2.36), °С

$$t_{cr1} = t_r - \frac{q}{\alpha_1} = 500 - \frac{17225}{40} = 69,4.$$

Температура стінки з боку води, °С

$$t_{cr2} = t_b + \frac{q}{\alpha_2} = 50 + \frac{17225}{1000} = 67,2.$$

**Приклад 2.9.** Обмурівка топкової камери виконана з шамотної цегли, а зовнішня обшивка з листової сталі. Зазор між цеглою і обшивкою 30 мм. Температура на поверхні цегляної кладки 150 °С. Температура сталевий обшивки 40 °С. Міра чорноти шамоту 0,8, а сталі 0,6.

### Розв'язання

Зведена міра чорноти системи шамот – сталь

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ш}} + \frac{1}{\varepsilon_{ст}} - 1\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,6} - 1\right)} = 0,522.$$

Випромінювання від кладки до обшивки, Вт/м<sup>2</sup> за (2.41)

$$E = \varepsilon_{np} \cdot c_0 \cdot \left( \left( \frac{T_{ш}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right) = 0,522 \cdot 5,67 \cdot \left( \left( \frac{150 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{40 + 273}{100} \right)^4 \right) = 663.$$

### Задачі для самостійної роботи

**Приклад 2.10.** Визначити питомий об'єм і густину повітря, якщо його маса  $m$  займає об'єм  $V$ .

|                               |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Передостання цифра шифру      | 0     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| Маса повітря, м, кг           | 77,58 | 75,9 | 76,2 | 78,9 | 78,4 | 78,0 | 76,5 | 76,9 | 76,8 | 77,1 |
| Остання цифра шифру           | 0     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| Об'єм повітря, м <sup>3</sup> | 59,5  | 60,5 | 59,8 | 60   | 60,2 | 59,6 | 60,4 | 59,9 | 60,6 | 60,1 |

**Приклад 2.11.** Визначити абсолютний тиск газу в посудині, якщо показання ртутного манометра рівно  $P_m$ , а показання барометра  $P_b$ . Обидва прилади знаходяться при температурі  $0^\circ\text{C}$ . Тиск виразити в барах.

|                          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Передостання цифра шифру | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| Тиск $P_m$ , мм рт. ст.  | 350 | 365 | 360 | 355 | 375 | 370 | 368 | 373 | 358 | 363 |
| Остання цифра шифру      | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| Тиск $P_b$ , мм рт. ст.  | 759 | 750 | 745 | 758 | 753 | 760 | 747 | 751 | 748 | 752 |

**Приклад 2.12.**  $1\text{ м}^3$  азоту з параметрами  $P_1$  і  $\rho_1$  виконує  $L_v$  роботи зміни об'єму, внаслідок чого його ентальпія зменшується на  $\Delta H$ . Визначити теплоємність і теплоту процесу, зміну внутрішньої енергії та ентропії.

|                                       |      |      |      |     |     |       |       |      |      |      |
|---------------------------------------|------|------|------|-----|-----|-------|-------|------|------|------|
| Передостання цифра шифру              | 0    | 1    | 2    | 3   | 4   | 5     | 6     | 7    | 8    | 9    |
| Робота $L_v$ , кДж                    | 120  | 110  | 140  | 130 | 125 | 150   | 145   | 135  | 128  | 142  |
| Зміна ентальпії, кДж                  | 60   | 65   | 80   | 75  | 70  | 82    | 62    | 68   | 71   | 78   |
| Остання цифра шифру                   | 0    | 1    | 2    | 3   | 4   | 5     | 6     | 7    | 8    | 9    |
| Тиск $P_1$ , МПа                      | 1,25 | 1,15 | 1,05 | 1,1 | 1,2 | 1,125 | 1,115 | 1,11 | 1,18 | 1,22 |
| Густина, $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup> | 4,5  | 4,1  | 4,3  | 4,4 | 4,2 | 4,15  | 4,25  | 4,28 | 4,45 | 4,56 |

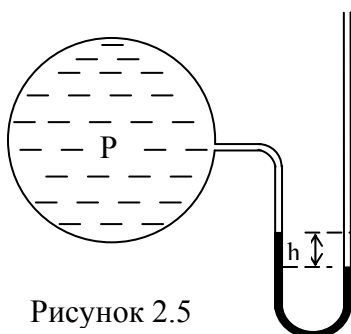


Рисунок 2.5

**Приклад 2.13.** Для вимірювання тиску у посудині, що заповнена газом, застосовується вакуумметр, заповнений рідиною з густиною  $\rho$ . Визначити величину вакууму  $P$  у місці встановлення вакуумметра, якщо висота підняття рідини в його трубці  $h$  (рис.2.5).

|  |     |     |     |      |     |     |     |     |      |      |
|--|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Передостання цифра шифру                   | 0   | 1   | 2   | 3    | 4   | 5   | 6   | 7   | 8    | 9    |
| Густина рідини, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | 900 | 850 | 930 | 1010 | 990 | 995 | 820 | 810 | 1030 | 1200 |
| Остання цифра шифру                        | 0   | 1   | 2   | 3    | 4   | 5   | 6   | 7   | 8    | 9    |
| Висота підняття, $h$ , мм                  | 300 | 350 | 400 | 450  | 500 | 550 | 600 | 650 | 700  | 750  |

**Приклад 2.14.** По горизонтальному сталевому трубопроводу подається вода витратою  $Q$ . Густина води  $985\text{ кг/м}^3$ . Визначити швидкість потоку, якщо діаметр труби  $d$ .

|                          |       |      |       |       |      |      |       |      |      |      |
|--------------------------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| Передостання цифра шифру | 0     | 1    | 2     | 3     | 4    | 5    | 6     | 7    | 8    | 9    |
| Витрата $Q$ , кг/с       | 0,1   | 0,15 | 0,2   | 0,25  | 0,3  | 0,4  | 0,45  | 0,5  | 0,55 | 0,6  |
| Остання цифра шифру      | 0     | 1    | 2     | 3     | 4    | 5    | 6     | 7    | 8    | 9    |
| Діаметр, $d$             | 0,015 | 0,02 | 0,025 | 0,032 | 0,04 | 0,05 | 0,065 | 0,08 | 0,1  | 0,04 |

**Приклад 2.15.** По трубі діаметром  $d$  зі швидкістю  $w$  тече вода. Коефіцієнт кінематичної в'язкості води  $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , густина води  $950 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Шорсткість труби  $0,001 \text{ мм}$ . Трубопровід довжиною  $1 \text{ км}$  має  $4$  повороти з коефіцієнтом опору  $\zeta = 0,5$  кожний. Визначити втрати тиску потоку.

|                          |       |      |       |       |      |      |       |      |     |       |
|--------------------------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-----|-------|
| Передостання цифра шифру | 0     | 1    | 2     | 3     | 4    | 5    | 6     | 7    | 8   | 9     |
| Швидкість $w$ , м/с      | 0,5   | 0,75 | 1     | 1,25  | 1,5  | 1,75 | 2     | 2,25 | 2,5 | 2,75  |
| Остання цифра шифру      | 0     | 1    | 2     | 3     | 4    | 5    | 6     | 7    | 8   | 9     |
| Діаметр, $d$             | 0,015 | 0,02 | 0,025 | 0,032 | 0,04 | 0,05 | 0,065 | 0,08 | 0,1 | 0,125 |

**Приклад 2.16.** Електропровід діаметром  $d$  необхідно ізолювати ізоляцією з каучуку. Визначити товщину ізоляції, якщо теплопровідність каучуку  $0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , сила струму  $5,5 \text{ А}$ , електричний опір  $R$ , температура на межах ізоляції  $60$  і  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

|                          |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |
|--------------------------|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
| Передостання цифра шифру | 0  | 1   | 2  | 3   | 4  | 5   | 6  | 7   | 8  | 9   |
| Діаметр $d$ , мм         | 2  | 2,5 | 3  | 3,5 | 4  | 4,5 | 5  | 5,5 | 6  | 6,5 |
| Остання цифра шифру      | 0  | 1   | 2  | 3   | 4  | 5   | 6  | 7   | 8  | 9   |
| Опір $R$ , Вт/м          | 10 | 15  | 20 | 25  | 30 | 35  | 40 | 45  | 50 | 55  |

**Приклад 2.17.** Для віконної рами (рис. 2.4), яка складається з двох листів скла товщиною  $\delta_1 = 4,0 \text{ мм}$  і прошарку повітря товщиною  $\delta_2 = 40 \text{ мм}$  визначити температури всіх поверхонь скла, якщо температура зовнішнього повітря  $t_{\text{зов}}$ , а всередині приміщення  $t_{\text{вн}}$ . Коефіцієнт теплопровідності скла і повітря  $0,74$  і  $0,026 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , відповідно. Конвекцією в повітряному прошарку знехтувати. Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішнього повітря до скла  $13 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , і від скла до внутрішнього повітря  $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

|  |     |     |     |     |     |     |    |    |    |    |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|
| Передостання цифра шифру                                 | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7  | 8  | 9  |
| Зовнішня температура $t_{\text{зов}}$ , $^\circ\text{C}$ | -35 | -30 | -25 | -20 | -15 | -10 | -5 | 0  | 5  | 10 |
| Остання цифра шифру                                      | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7  | 8  | 9  |
| Внутрішня температура $t_{\text{вн}}$ , $^\circ\text{C}$ | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21 | 22 | 23 | 24 |



### 3 ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

На промислових підприємствах як джерела енергії переважно використовують первинні енергоносії – електроенергію та викопні непоновлювальні вуглеводневі палива – кам'яне та буре вугілля, природний, коксовий, попутний газ, мазут, газовий конденсат, дизельне паливо тощо.

Все більше впроваджуються нетрадиційні джерела енергії – поновлювальні джерела (сонячна, вітрова, геотермальна та інші види енергії), а також використання органічних відходів.

#### 3.1 Склад палива, теплота згорання

**Паливо** (Fuel) – речовина, яку доцільно використовувати для отримання теплоти у великих кількостях.

Основним джерелом теплоти на промислових підприємствах є органічне паливо.

Для отримання теплоти використовується хімічна реакція швидкого окиснення – **горіння** (Burning).

Теплота згорання палива коливається в межах 3800...46000 кДж/кг або кДж/м<sup>3</sup>. Для порівняння показників котлоагрегатів, що працюють на різних видах палива використовується поняття "**умовне паливо**", теплота згорання якого прийнята 29300 кДж/кг.

Вугілля (Coal) використовується в основному для виробництва електроенергії на теплових електростанціях та теплоелектроцентралях великих підприємств, мазут (Fuel Oil) і природний газ (Natural gas) використовується в комунальній теплоенергетиці і в котельнях промислових підприємств.

Органічне паливо містить: горючі речовини, внутрішній баласт, негорючі мінеральні домішки і вологу.

До горючої частини палива відносяться вуглець С, водень Н, сірка S та їх сполуки. Основне виділення теплоти відбувається за рахунок окиснення вуглецю С. Вміст водню Н коливається в межах 2...10 %, але при його згоранні виділяється в 4,4 раза більше теплоти, ніж при згоранні вуглецю. Вміст сірки S у твердому паливі сягає 7...8 %, в рідкому – 3...3,5 %, а в природному газі – майже відсутній. Сірка є найшкідливішою складовою палива, оскільки при її згоранні утворюються ангідриди SO<sub>2</sub> і SO<sub>3</sub>, які агресивно впливають на навколишнє середовище і на поверхні агрегатів.

Кисень О і азот N є внутрішнім баластом.

Вологість палива W коливається в діапазоні 5...70 %. Надлишкова вологість погано впливає на роботу котла.

Зольність палива А складається з  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , оксидів заліза, карбонатів та сульфатів магнію, кальцію, заліза. Збільшення зольності погіршує вміст горючих речовин, збільшує забруднення поверхонь, стираються труби тощо.

Склад палива, в такому вигляді як воно поступає до споживача, називається *робочим складом палива*

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \% . \quad (3.1)$$

Від хімічного складу палива залежать його властивості. Найважливішими характеристиками палива є: теплота згорання; вихід летких речовин; склад мінеральних домішок; вологість; сірчистість.

Розрізняють вищу на нижчу теплоту згорання палива.

**Вища теплота згорання палива**  $Q_B^p$  – теплота, що виділяється при повному окисненні горючих складових палива, і теплота, що виділяється при конденсації водяної пари, яка міститься в продуктах згорання палива.

**Нижча теплота згорання палива**  $Q_H^p$  – теплота, що виділяється при повному окисненні всіх горючих складових палива.

В СРСР прийнято було рахувати теплові баланси за нижчою тепловою згорання палива, а в Англії, США та інших – за вищою.

Теплоту згорання визначають експериментально за допомогою калориметра. В розрахунках нижчої робочої теплоти згорання палива використовують такі емпіричні формули:

– для твердого та рідкого палива, кДж/кг

$$Q_H^p = 338 \cdot C^p + 1025 \cdot H^p - 108,5 \cdot (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p ; \quad (3.2)$$

– для газового палива, кДж/м<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} Q_H^p = & 108 \cdot H^p + 126 \cdot CO^p + 234 \cdot H_2S^p + 358 \cdot CH_4^p + 591 \cdot C_2H_4^p + \\ & + 638 \cdot C_2H_6^p + 860 \cdot C_3H_6^p + 913 \cdot C_3H_8^p + 1135 \cdot C_4H_8^p + \\ & + 1187 \cdot C_4H_{10}^p + 1461 \cdot C_5H_{12}^p + 1403 \cdot C_6H_6^p . \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для розрахунку вищої робочої теплоти згорання можна скористатись формулою

$$Q_B^p = Q_H^p + 25,1 \cdot (W^p + 9 \cdot H^p) . \quad (3.4)$$

Виходячи з рівнянь хімічних реакцій отримані емпіричні залежності для визначення теоретичної витрати повітря для спалювання палива:

– для твердого та рідкого палива, м<sup>3</sup>/кг

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,033 \cdot O^p ; \quad (3.5)$$

– для газового палива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$

$$V^0 = 0,0476 \cdot \left[ 0,5 \cdot \text{CO}^p + 0,5 \cdot \text{H}^p + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S}^p + \sum \left[ \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n \right] - \text{O}^p \right]. \quad (3.6)$$

### 3.2 Горіння палива. Газогенерація та піроліз

Спалювання кожного виду палива відбувається за певною ланцюговою реакцією. Найпростіший випадок горіння газового палива, коли проходить окиснення горючих складових у вуглекислий газ і воду.

Для здійснення процесу горіння разом з горючим газом подається необхідна кількість окисника. Якщо окисника не вистачатиме – будуть утворюватись продукти неповного згорання CO, SO, сажа C, вуглеводні  $\text{C}_n\text{H}_m$  тощо.

Якщо окисник подавати з надлишком, то температура в зоні горіння буде знижуватись і пірометричний ефект знижуватиметься.

Горіння палива можливе при дотриманні двох основних умов:

- температура в зоні горіння вища температури спалаху (табл. 3.1);
- концентрація палива в паливо-повітряній суміші (для газових палив) повинна відповідати певному діапазону концентрацій (табл.3.2).

**Температура спалаху** – температура, за якої утворення ланцюгів реакцій горіння і обривання таких ланцюгів знаходяться у рівновазі.

Таблиця 3.1 – Температури спалаху деяких палив у повітрі при атмосферному тиску

| Паливо                           | Температура, °C | Паливо       | Температура, °C |
|----------------------------------|-----------------|--------------|-----------------|
| Водень $\text{H}_2$              | 530...590       | Бензин       | 410...560       |
| Окис вуглецю CO                  | 610...658       | Деревина     | 295             |
| Метан $\text{CH}_4$              | 645...850       | Буре вугілля | 450             |
| Сірководень $\text{H}_2\text{S}$ | 290             | Кокс         | 600...700       |

Для того, аби газова паливо-повітряна суміш спалахнула, концентрація палива повинна бути між **верхньою та нижньою концентраційними межами спалаху**.

Таблиця 3.2 – Верхня та нижня концентраційні межі спалаху деяких газових палив

| Паливо                           | Концентрація палива у суміші, % |             |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------|
|                                  | нижня межа                      | верхня межа |
| Метан $\text{CH}_4$              | 5,0                             | 15,0        |
| Водень $\text{H}_2$              | 4,1                             | 24,0        |
| Окис вуглецю CO                  | 12,5                            | 24,0        |
| Сірководень $\text{H}_2\text{S}$ | 4,5                             | 45,0        |
| Природний газ                    | 4,5                             | 13,5        |
| Генераторний газ                 | 20,7                            | 73,7        |
| Коксовий газ                     | 7,0                             | 21,0        |

Наявність верхньої та нижньої концентраційних меж пов'язана із автотермічністю процесу. Якщо замало повітря (концентрація палива вища верхньої межі), то для проведення процесу недостатньо окисника і реакція припиняється. Якщо повітря забагато (концентрація палива нижча нижньої межі), то виділення теплоти при горінні недостатньо для нагріву суміші до температури спалаху і реакція також припиняється.

Якщо температура суміші підтримується вище температури спалаху, то суміш горить при будь-якій концентрації палива.

Важливим показником горіння палива є **нормальна швидкість горіння**. Це така швидкість, з якою фронт полум'я насувається на нерухому газоповітряну суміш.

Якщо по трубі подавати суміш із нормальною швидкістю горіння, то фронт полум'я буде нерухомим. Якщо подавати із більшою швидкістю – полум'я буде відриватись, якщо із меншою – буде проскакування полум'я в трубу, рух полум'я назустріч суміші.

Проскакування полум'я неможливе через отвір розміром 1 мм і менше, тому в промисловості і побуті використовують пальники із малими отворами.

Найпростіше спалювати природний газ, його підготовка – тільки зниження та підтримання певного тиску перед пальником.

Для спалювання рідкого палива (мазуту, дизельного пального) необхідно використовувати форсунки (Sprayers). Ці пристрої розпилюють паливо, після цього воно випаровується і вже потім спалахує.

Тверде паливо подрібнюють, підсушують і потім спалюють кусками розміром 20...30 мм, або у вигляді пилу 1...100 мкм.

**Газогенерація** (Gasgeneration) – термічна деструкція вуглеводневої сировини або палива у присутності поданого ззовні окислювача. Термін "газифікація" також застосовується відносно реакцій окиснення вугілля з утворенням, наприклад, CO або CO<sub>2</sub>. Процес газогенерації оптимізують за максимальним виходом газу. Температура газогенерації складає 600...1100 °C. Газ, що виділяється, містить в основному CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> і інші вуглеводні. Газогенерація може здійснюватися такими окисниками, як повітря, кисень, пара, CO<sub>2</sub>.

**Піроліз** (Pyrolysis) – термічна деструкція вуглеводневої сировини чи палива у відсутності поданого ззовні окисника. Піроліз проходить при відносно низьких температурах (500...800 °C). Продуктами піролізу є в основному смола, вугілля і гази з низькою молекулярною вагою. Також можуть виділятися значні кількості CO і CO<sub>2</sub>.

При термічному переробленні біомаси процеси піролізу, газогенерації та повного спалювання можуть відбуватися одночасно (див. рис. 3.1).

Швидкість кожного з цих процесів визначається, в тому числі, концентрацією окисника.

Однією з основних задач сучасної теплоенергетики є зменшення використання викопних палив – природного газу, мазуту, вугілля за рахунок використання нетрадиційних джерел енергії та альтернативних палив, наприклад, органічних відходів.

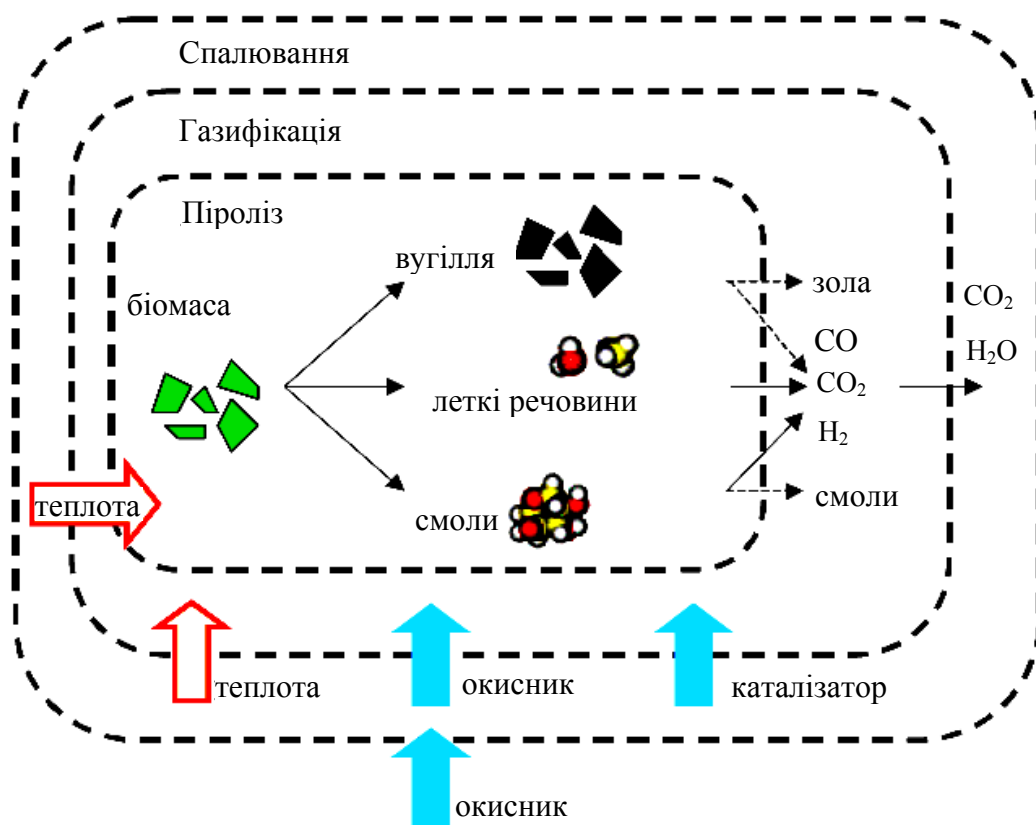


Рисунок 3.1 – Процес термічного перероблення біомаси

### 3.3 Поновлювані джерела енергії

Поновлювані джерела енергії (Renewable energy sources) є альтернативною первинним вичерпним енергоресурсам – природному газу, нафті, вугіллю.

До поновлюваних джерел енергії відносять: енергію Сонця; енергію вітру; енергію ґрунту і ґрунтових вод; енергію припливів та хвиль; енергію біомаси. Ресурсна база основних джерел енергії наведена в таблиці 3.3.

#### 3.3.1 Енергія вітру

Вітровий потенціал виникає в зв'язку із нерівномірним нагрівом поверхні Землі. Основними характеристиками вітрового потенціалу є швидкість вітру і повторюваність вітру.

Таблиця 3.3 – Енергетичний потенціал основних джерел енергії

| Джерело енергії  | Потенціал                            |
|--|--------------------------------------|
| Вугілля  | $2,96 \cdot 10^{22}$ Дж              |
| Нафта  | $8,3 \cdot 10^{18}$ Дж               |
| Природний газ  | $7 \cdot 10^{18}$ Дж                 |
| Ядерна енергія (уран)  | $4,2 \cdot 10^{25}$ Дж               |
| Енергія річок  | $1,01 \cdot 10^{17}$ Дж/рік          |
| Енергія хвиль  | $(1,8...18) \cdot 10^{16}$ Дж/рік    |
| Енергія припливів  | $3,24 \cdot 10^{17}$ Дж/рік          |
| Енергія вітру  | $(1,8...18,7) \cdot 10^{18}$ Дж/рік  |
| Температурний градієнт: морів і океанів<br>повітря<br>надр Землі | $(3,6...36) \cdot 10^{18}$ Дж/рік    |
|  | $(3,6...36) \cdot 10^{15}$ Дж/рік    |
|  | $(1,8...7,2) \cdot 10^{18}$ Дж/рік   |
| Сонячне випромінювання на поверхню Землі                         | $(7,2...10,08) \cdot 10^{20}$ Дж/рік |
| Енергія біомаси і торфу  | $3,6 \cdot 10^{19}$ Дж/рік           |



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд одного з видів вітроустановок

Найбільш ефективно використовувати вітроустановки (див. рис. 3.2) в районах із швидкістю вітру більше 5 м/с.

Значний потенціал вітроенергетики має в Азово-Чорноморському регіоні.

Недоліками вітроенергетики є шум і вібрація, які спричиняються вітроагрегатами, і нестабільність вітрів, що вимагає дублювання джерел енергії, і, відповідно, здорожує установку.

### 3.3.2 Енергія Сонця

Сонячне випромінювання вкрай нерівномірне по земній поверхні та протягом року. Сонячна енергетика є найбільш екологічно чистою, але її недоліком є мала густина падаючого потоку. Це призводить до високої вартості сонячних енергоустановок. Сонячна енергія використовується за допомогою двох видів установок:

– з отриманням електричного струму (фотоелектричні перетворювачі) (рис. 3.3, а), капітальні вкладення в такі системи складають зараз 300...1000 у.о. на 1 м<sup>2</sup> поверхні;

– з отриманням теплової енергії (сонячні колектори) (рис. 3.3, б), капіталовкладення складають до 300 у.о. на 1 м<sup>2</sup> поверхні.

В напівпровідникових фотоелектричних перетворювачах при падінні сонячного світла виникає електричний струм. В трубах сонячного колектора циркулює вода або інший теплоносій, який нагрівається від сонячних променів.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Установки для використання енергії Сонця – фотоелектричні перетворювачі (а) та сонячні колектори (б)

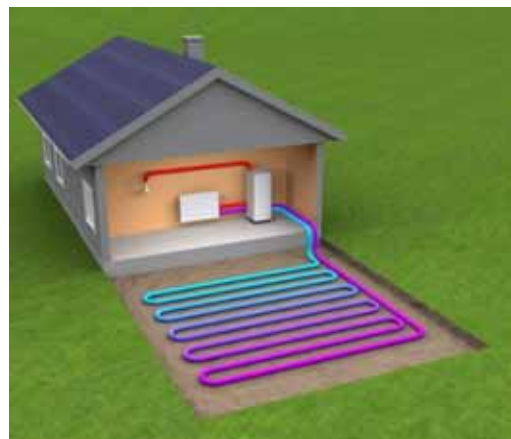
Часто використовують пасивні системи сонячного опалення (стіни Тромба-Мішеля, заklenі веранди тощо). Такі системи включені в конструкцію будівлі, їх термін окупності не перевищує 3...5 років.

### 3.3.3 Енергія Землі

Геотермальна енергетика включає як теплоту гарячих джерел (рис. 3.4, а), яку можна використовувати безпосередньо для енергетичних потреб, так і теплоту ґрунту (рис. 3.4, б), яку використовують як холодне джерело в теплових насосах.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Геотермальні енергоресурси – гарячі джерела (а), теплота ґрунту (б)

Геотермальна енергетика є потужним і екологічно чистим джерелом енергії, але гарячі геотермальні джерела зустрічаються рідко, вода в них має велику кількість солей. Такі джерела використовуються для теплопостачання та виробництва електроенергії на геотермальних електростанціях.

Використання теплоти ґрунту вимагає великих витрат і значних територій. Теплота ґрунту використовується переважно для теплопостачан-

ня, причому потенціал цієї теплоти необхідно підвищувати за допомогою теплових насосів.

Холод ґрунту влітку використовують для кондиціонування повітря. Для цього повітря прокачується через закопані в землю труби.

### 3.3.4 Енергія біомаси

Біомаса (Biomass) відіграє домінуючу роль серед інших поновлюваних джерел енергії в Україні. Існують різні біоенергетичні технології, які дозволяють отримувати корисні продукти – електричну і теплову енергію, паливо, високоякісні добрива, будівельні матеріали тощо.

З біомаси можна отримувати біогаз, синтез-газ, біоетанол, біодизель, тверде паливо тощо. Технології перероблення біомаси дозволяють також вирішувати проблему утилізації шкідливих побутових та промислових відходів.

Лідерами з використання біогазових технологій є такі країни, як Німеччина, Велика Британія, США, Канада, Бразилія, Данія, Китай, Індія та ін.

В біогазових установках (рис. 3.5, а) утилізують органічні відходи, виробляючи біогаз з теплотою згорання 20...24 МДж/м<sup>3</sup> та якісні добрива.

Для виробництва біогазу можна використати будь-які органічні відходи, в тому числі, відходи харчової і переробної промисловості, комунальні стічні води і тверді побутові відходи, відходи тваринництва і рослинництва. На сміттєзвалищах за допомогою спеціальних свердловин можна отримувати звалищний газ (dumpgas), який використовується для виробництва теплової та електричної енергії.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Біоенергетичні установки: біогазова установка перероблення сільськогосподарських відходів (а) і установка для отримання біодизелю (б)

З багатьох сільськогосподарських культур (наприклад рапс, кукурудза, соняшник) можна отримувати моторне паливо – біодизель (рис. 3.5, б).

Для високоефективного спалювання біомаси її підсушують і пресують у вигляді брикетів або пелетів (гранул) (рис. 3.6).





а)



б)

Рисунок 3.6 – Продукти підготовки біомаси до спалювання: пелети (а) і брикети (б)

### Контрольні запитання

1. Які палива відносяться до первинних та нетрадиційних?
2. Охарактеризуйте елементарний склад палива.
3. Поясніть різницю між вищою та нижчою теплотою згорання палива.
4. За яких умов можливе горіння палива? Температура спалаху.
5. Поясніть поняття "газогенерація", "піроліз".
6. Проаналізуйте співвідношення потенціалів первинних та нетрадиційних джерел енергії.
7. Наведіть переваги і недоліки енергії вітру і Сонця.
8. Проаналізуйте можливості використання теплоти ґрунту та енергії біомаси.

### Приклади розв'язання задач

**Приклад 3.1.** Визначити нижчу та вищу теплоту згорання мазуту, якщо він має такий елементарний склад на робочу масу, %:  $C^p = 84,25$ ;  $H^p = 11,7$ ;  $O^p = 0,7$ ;  $S^p = 0,3$ ;  $W^p = 3$ ;  $A^p = 0,05$ .

#### Розв'язання

Перевіримо суму складових на робочу масу палива

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + W^p + A^p = 84,25 + 11,7 + 0,7 + 0,3 + 3 + 0,05 = 100 \%$$

Нижча робоча теплота згорання палива, кДж/кг, за формулою (3.2)

$$Q_H^p = 338 \cdot 84,25 + 1025 \cdot 11,7 - 108,5 \cdot (0,7 - 0,3) - 25 \cdot 3 = 40351.$$

Вища робоча теплота згорання палива, кДж/кг

$$Q_B^p = Q_H^p + 25,1 \cdot (W^p + 9 \cdot H^p) = 40351 + 25,1 \cdot (3 + 9 \cdot 11,7) = 43069.$$

**Приклад 3.2.** Визначити теоретичний об'єм повітря при спалюванні природного газу з елементарним складом, %:  $CH_4^p = 85,8$ ;  $C_2H_6^p = 0,2$ ;  $C_3H_8^p = 0,1$ ;  $C_4H_{10}^p = 0,1$ ;  $CO_2^p = 0,1$ ;  $N_2^p = 13,7$ .

### **Розв'язання**

Перевіримо суму складових на робочу масу палива

$$85,8 + 0,2 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 13,7 = 100 \% .$$

Теоретична витрата повітря за (3.6),  $\text{м}^3/\text{м}^3$

$$V^0 = 0,0476 \cdot \left[ \left( 1 + \frac{4}{4} \right) \cdot 85,8 + \left( 2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 0,2 + \left( 3 + \frac{8}{4} \right) \cdot 0,1 + \left( 4 + \frac{10}{4} \right) \cdot 0,1 \right] = 8,26.$$

### **Завдання для самостійної роботи**

**Завдання 3.3.** Визначити вид, теплоту згорання палива і теоретичний об'єм повітря, якщо склад палива, % :  $W^p = 13,0$ ;  $A^p = 21,8$ ;  $S^p_{\text{к+ор}} = 3,0$ ;  $C^p = 49,3$ ;  $H^p = 3,6$ ;  $N^p = 1,0$ ;  $O^p = 8,3$ .

**Завдання 3.4.** Визначити вид, теплоту згорання палива і теоретичний об'єм повітря, якщо склад палива, % :  $\text{CH}_4 = 85,8$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,2$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,1$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,1$ ;  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0$ ;  $\text{N}_2 = 13,7$ ;  $\text{CO}_2 = 0,1$ ;  $\text{H}_2\text{S} = 0$ .

**Завдання 3.5.** Користуючись літературною та іншою інформацією підготуйте звіт за одною з тем.

1. Натуральні та штучні палива. Технології їх отримання та використання.
2. Газогенераторні котли малої потужності. Переваги і недоліки.
3. Піролізні технології для отримання рідких палив з відходів. Досвід та перспективи.
4. Сучасний стан розвитку фотоелектричних установок для використання енергії Сонця. Технічні та економічні аспекти.
5. Сучасний стан розвитку сонячних колекторів. Технічні та економічні аспекти.
6. Енергетичний комплекс України. Баланс використання енергоносіїв. Перспективи розвитку нетрадиційної енергетики в Україні.
7. Потенціал, сучасний стан та перспективи розвитку вітрових енергоустановок.
8. Технології тепло- і холодопостачання з використанням енергії ґрунту.
9. Технології спалювання відходів. Перспективи, переваги і недоліки.
10. Сучасний стан розвитку біогазових технологій. Технологічні, економічні, екологічні аспекти.
11. Виробництва моторних палив з сільськогосподарських культур. Технології, досвід, перспективи.
12. Технології виробництва продукції з органічних відходів.

## 4 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

### 4.1 Котельні установки

**Котельна установка** – пристрій, призначений для виробництва теплоти у вигляді пари або гарячої води заданих параметрів для енергетичних, технологічних або опалювальних цілей. Котельна установка складається з котлоагрегату і допоміжного обладнання.

**Котельний агрегат** (котлоагрегат, котел) (Boiling aggregate) включає топкові пристрої, теплообмінні поверхні для використання теплоти димових газів, каркас, обмурівку, сходи, арматуру та ін.

**Допоміжне обладнання** – димососи, вентилятори, живильні насоси, водопідготовка, паливopідготовка, системи паливopодавання, золо- і шлаковидалення.

Котельні установки поділяють на три класи: *парові* (з виробництвом водяної пари); *водогрійні* (відпуск гарячої води); *комбіновані* (відпуск і пари, і гарячої води).

Схема парогенератора (Steam boiler) наведена на рис. 4.1.

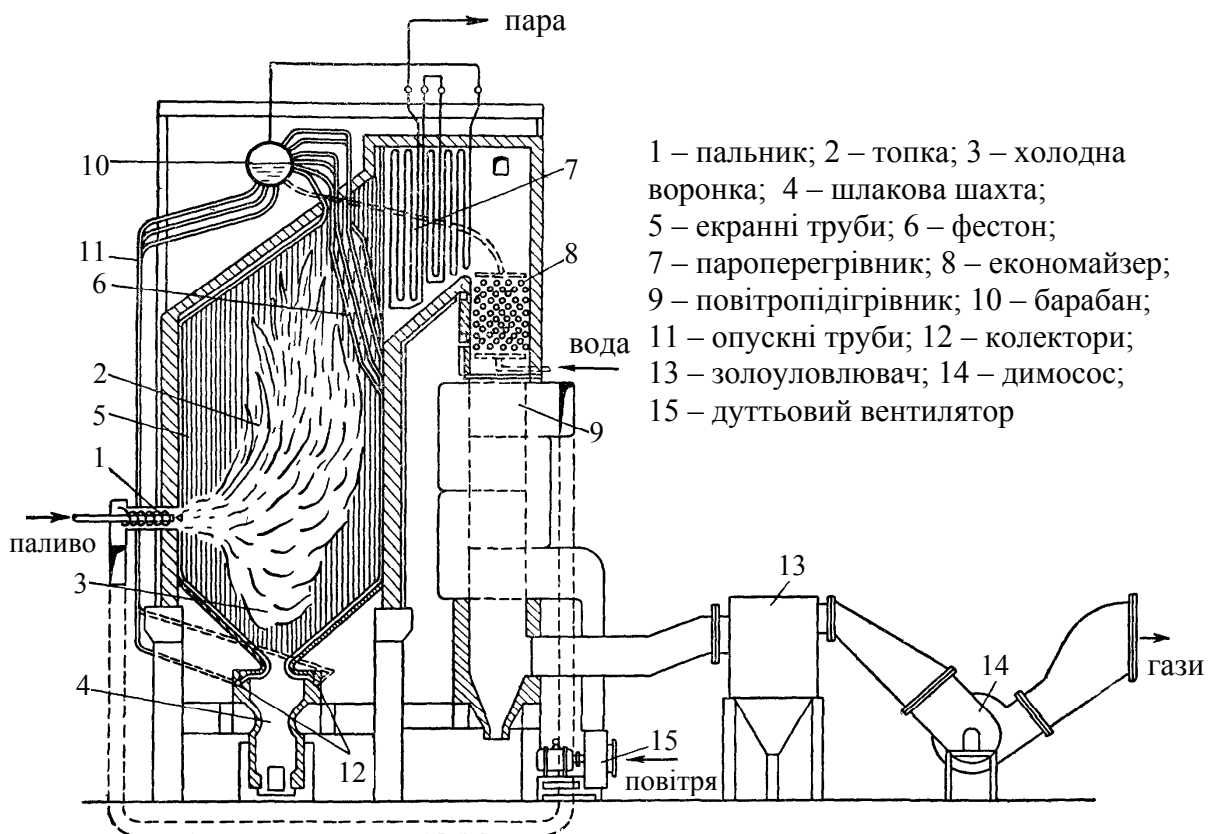


Рисунок 4.1 – Принципова схема котельної установки

Під час роботи котельної установки виробляється теплова енергія у вигляді гарячої води або водяної пари. Це корисна теплота. Крім того, будь-який реальний процес супроводжується втратами.

Під час роботи котла відбуваються такі теплові втрати: втрати з відхідними газами; втрати від хімічної неповноти згорання палива; втрати від механічної неповноти згорання палива; втрати теплоти через стіни котла; втрати теплоти зі шлаком.

Коефіцієнт корисної дії котлоагрегатів залежить від виду палива, потужності котла, режиму його роботи тощо. В середньому значення ККД коливається в межах  $\eta_k = 86 \dots 94 \%$ . В конденсаційних газових котлах значення ККД, розраховане за нижчою теплотою згорання, може сягати 109 %, а за вищою – 97 % і вище.

Витрата палива для котла визначається за формулою, кг/с, м<sup>3</sup>/с

$$V_p = \frac{Q_k}{Q_n \cdot \eta_k}, \quad (4.1)$$

де  $Q_k$  – теплова потужність котла або корисна теплота, кВт;

$Q_n$  – теплота, що виділяється при спалюванні палива, кДж/кг або кДж/м<sup>3</sup>.

Пристрої, в яких відбувається спалювання палива називаються **топками**.

Топки поділяють на **шарові** для спалювання кускового палива і **камерні** – для спалювання газоподібного і рідкого палива, твердого палива в пилоподібному (подрібненому) стані, а також для спалювання суміші палив.

Останнім часом все більше розповсюдження отримують топки з киплячим шаром (див. рис. 4.2). Їх перевагою є можливість спалювання низькосортних палив, відходів тощо.



Рисунок 4.2 – Вигляд котла із топкою із циркуляційним киплячим шаром

"Кипіння" шару палива відбувається за рахунок підведення повітря в нижню частину топки із підвищеним напором. Цього напору достатньо аби підняти частинку палива в об'ємі топки. Таким чином, постійно відбувається рух частинок. При цьому паливо краще контактує із повітрям, рівномірніше розподіляється в об'ємі топки і відповідно більш якісно згорає.

Вздовж стін топки встановлені труби, які слугують захистом стін від високих теплових наванта-

жень. Тому такі труби називають екранними трубами. В них відбувається утворення насиченої пари. Пара відділяється в барабані – великій циліндричній посудині, наполовину заповненій водою в стані насичення.

Пристрій в якому відбувається підготовка паливо-повітряної суміші називається **пальником**. Конструкції пальників залежать від теплової потужності і виду палива. На рис. 4.3 показані різновиди пальників.

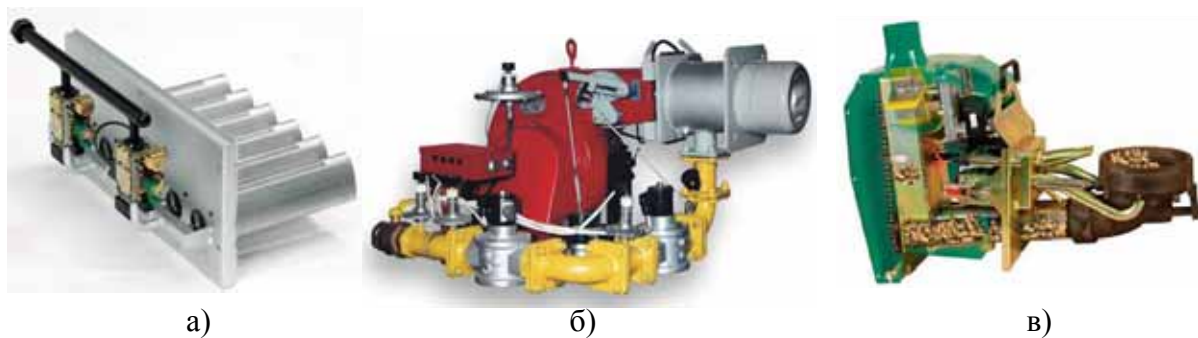


Рисунок 4.3 – Конструкції пальників: а – інжекційний пальник газового котла малої потужності; б – вентиляторний пальник для газового або рідкого палива; в – пальник для спалювання пелет в котлі малої потужності

Для підготовки пари певної температури в парогенераторах встановлюють пароперегрівники. Використання пари з більш високою температурою дозволяє виробляти більше електроенергії в парових турбінах.

Димові гази після пароперегрівника мають високу температуру і для охолодження їх перед викиданням через димову трубу встановлені так звані "хвостові поверхні" – економайзер і повітропідігрівник.

В економайзері підігрівається вода, а в повітропідігрівнику – повітря перед подачею на пальник.

Для подавання в котел води використовують живильний насос, для подачі повітря – дуттьовий вентилятор, для видалення продуктів згорання – димосос.

Водогрійні котли мають більш просту конструкцію і складаються з топки і конвективних пучків, де димові гази, охолоджуючись, нагрівають мережеву воду.

Побутові водогрійні котли можуть встановлюватись на підлозі або підвішуватись на стіну. Теплообмінники котлів виконують сталевими, чавунними або мідними. Такі котли можуть працювати на природному газі або на твердому паливі – вугіллі, деревині, пелетах, брикетах тощо.

Конструктивні схеми побутових котлів потужністю до 100 кВт наведені на рис. 4.4 і 4.5.

Котельні установки в системах енергопостачання є найбільшим споживачем викопних енергоресурсів – природного газу, нафти і вугілля. Підвищення ефективності роботи такого обладнання є першочерговою задачею, оскільки дозволить зменшити використання первинних вичерпних джерел енергії і скоротити обсяги техногенного навантаження на навколишнє середовище.

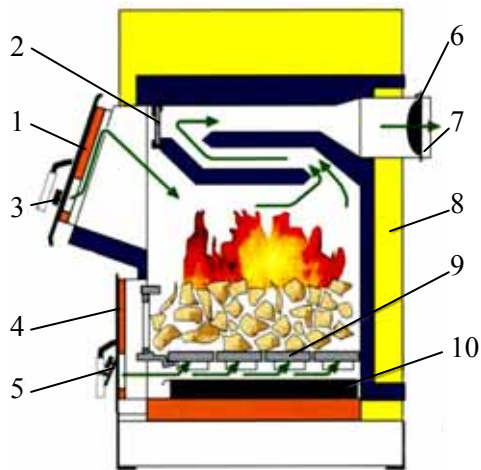


Рисунок 4.4 – Газогенераторний твердопаливний котел:

- 1 – люк для завантаження;
- 2 – засувка;
- 3 – клапан вторинного повітря;
- 4 – люк золовидалення;
- 5 – клапан первинного повітря;
- 6 – шибер;
- 7 – газохід;
- 8 – теплоізоляція;
- 9 – решітка;
- 10 – піддон; 11 – основа

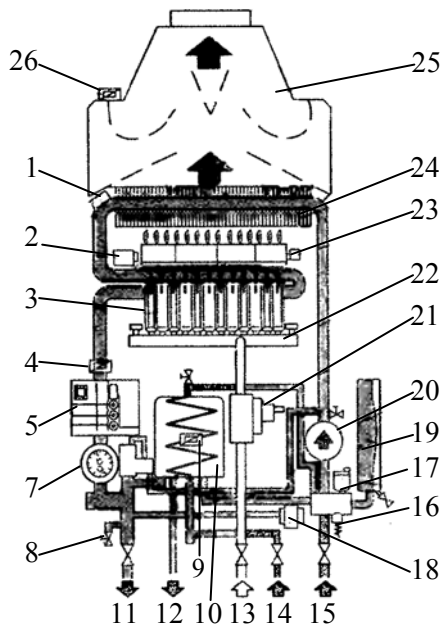


Рисунок 4.5 – Схема настінного двоконтурного котла:

- 1 – запобіжник для обмеження температури води;
- 2 – запальвальний електрод; 3 – газовий пальник;
- 4 – температурний датчик; 5 – регулятор котла;
- 7 – датчик температури і тиску; 8 – кран;
- 9 – датчик температури гарячої води;
- 10 – теплообмінник гарячої води;
- 11 – подавальний трубопровід; 12 – гаряча вода;
- 13 – газопровід; 14 – холодна вода;
- 15 – зворотний трубопровід; 16 – запобіжний клапан;
- 17 – повітровідвідник; 18 – перепускний вентиль;
- 19 – розширювальний бак; 20 – насос;
- 21 – газовий клапан; 22 – блок пальників;
- 23 – іонізаційний електрод; 24 – теплообмінник;
- 25 – газохід; 26 – датчик тяги

## 4.2 Нагнітачі та теплові двигуни

### 4.2.1 Класифікація нагнітачів

**Нагнітачами** називають пристрої, які призначені для стиску та переміщення рідин і газів. Нагнітачі (НГ) для рідин називаються **насосами** (pumps), а для газів – **вентиляторам** (ventilators) (із напором 2...12 кПа), **газодувками** (15...30 кПа), **компресорами** (compressors) (30 кПа і більше).

За принципом дії НГ поділяються на лопатеві, об'ємні і струминні.

**Об'ємні** НГ поділяються на поршневі, зубчасті та пластинчасті.

**Поршковий** об'ємний НГ у найпростішому випадку (рис. 4.6) являє собою розташований в циліндричному корпусі поршень, при русі якого в один бік потік всмоктується через всмоктувальний клапан і надходить в робочу камеру. В разі зворотного руху поршня робоче потік стискається і виштовхується із камери через нагнітальний клапан.

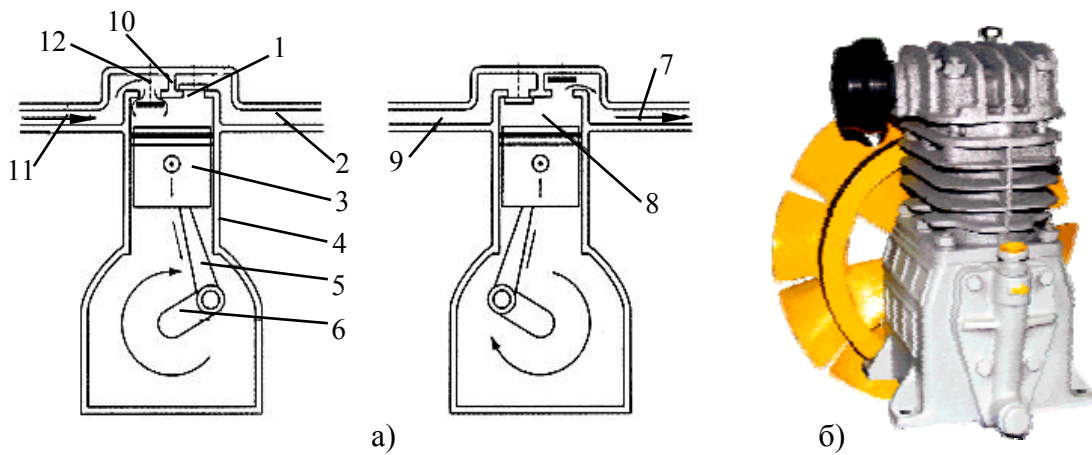


Рисунок 4.6 – Принцип дії (а) та зовнішній вигляд (б) поршневого компресора: 1, 12 – нагнітальний та всмоктувальний клапани; 2, 7 – нагнітальна лінія; 3 – поршень; 4 – корпус; 5 – шток; 6 – вал; 8 – робоча камера; 9, 11 – всмоктувальна лінія; 10 – перегородка

Позитивними якостями такого НГ є високе значення ККД, можливість стиску до високих тисків, незалежність подачі від створеного тиску.

Недоліками є: громіздкість, труднощі з'єднання з електродвигуном, необхідність управління клапанами, нерівномірність подачі, складність регулювання.

**Зубчасті (шестеренні)** нагнітачі складаються з пари зчеплених між собою шестерень (рис. 4.7), які розташовані в корпусі з мінімальним зазором між зубцями і корпусом.

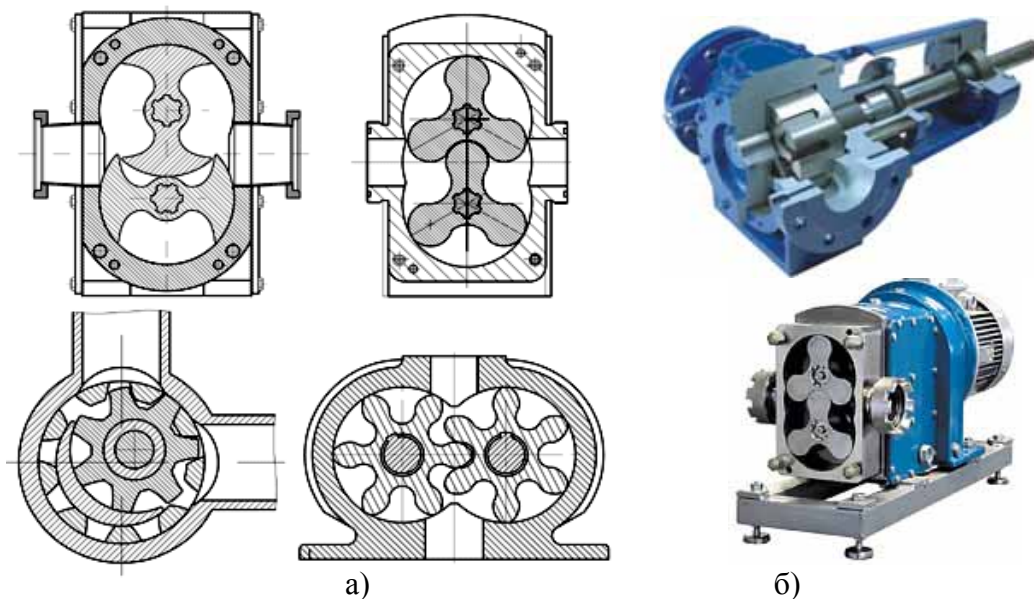


Рисунок 4.7 – Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б) шестеренних насосів

Зубці під час обертання захоплюють рідину і без стиску переносять її зі сторони всмоктування в сторону нагнітання. Стиск здійснюється в зазорі між зубцями. Такі НГ конструктивно дуже прості та компактні. Їх можна безпосередньо з'єднувати із електродвигуном. Вони призначені для в'язких рідин, мають малу подачу і більш низький ККД, що пов'язано із втратами в торцевих зазорах і тертям від зчеплення шестерень.

**Пластинчасті** НГ (рис. 4.8) являють собою циліндричний корпус 2, в якому ексцентрично розташований ротор 1, в пазах якого перебувають пересувні пластини 3.

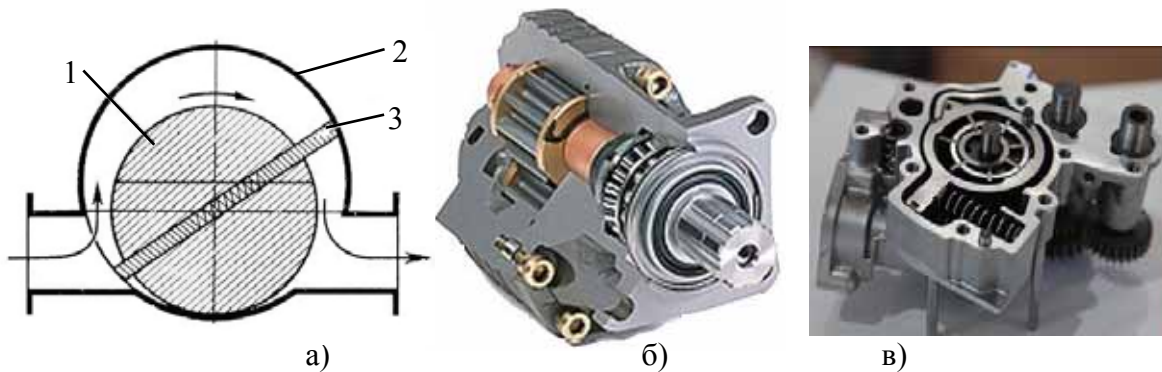


Рисунок 4.8 – Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б, в) пластинчастих насосів: 1 – ротор; 2 – корпус; 3 – пластини

Під обертання ротора пластини пересуваються в пазах. Внаслідок зменшення простору між пластиною і стінкою при обертанні робоча рідина, яка надходить через всмоктувальний патрубок, стискається і виштовхується через нагнітальний патрубок. На відміну від поршневих НГ ротаційні нагнітачі простіше з'єднати з електродвигуном.

В **струминних** НГ (ежекторах) використовується енергія струмини рідини або газу. Схема струминного НГ показана на рис. 4.9.

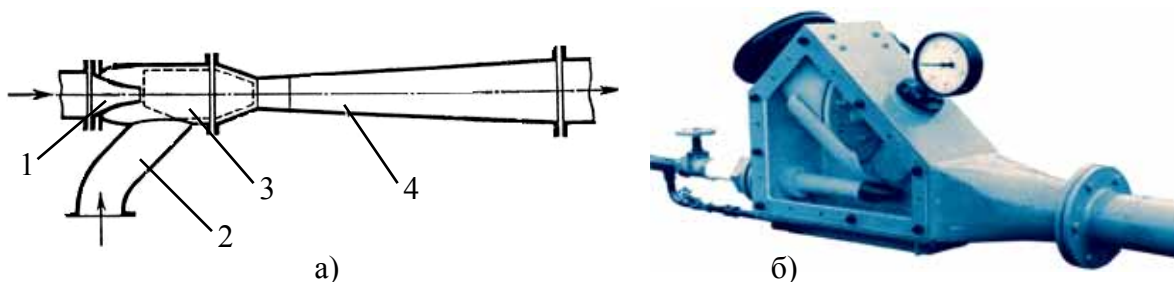


Рисунок 4.9 – Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б) струминних насосів: 1 – сопло; 2 – всмоктувальна лінія; 3 – робоча камера; 4 – дифузор

Він складається з корпуса, сопла 1, всмоктувального патрубка 2, камери змішування 3, дифузора 4. Рідина з великим тиском надходить в сопло, де швидкість її зростає, а тиск значно зменшується.

Це дозволяє підсмоктувати через патрубок 2 іншу рідину чи газ. В процесі перемішування струмин відбувається обмін кількості руху між частинками середовищ. В дифузорі тиск суміші збільшується.

Перевагою таких НГ є простота конструкції, але низький ККД.

**Лопатеві** нагнітачі поділяють на відцентрові, осьові, вихрові.

**Відцентрові** НГ (рис. 4.10) являють собою лопатеве колесо 2, яке розташоване у спіральній камері 3. Під час обертання колеса потік надходить в осьовому напрямку через всмоктувальну трубу 1, відхиляється на  $90^\circ$  і над-



ходить в міжлопатеві канали. Під дією відцентрових сил здійснюється закручування і виштовхування потоку через нагнітальний патрубок 4.

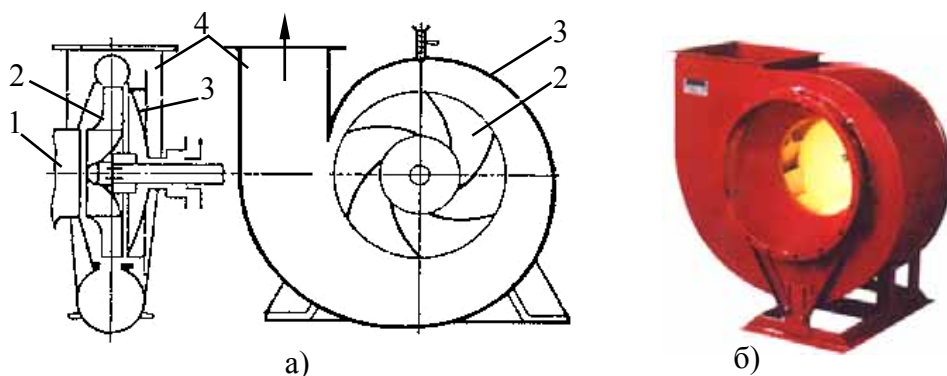


Рисунок 4.10 – Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б) відцентрового нагнітальника: 1 – всмоктувальний патрубок; 2 – робоче колесо; 3 – камера; 4 – нагнітальний патрубок

Відцентрові НГ мають порівняно високий ККД, достатньо прості за конструкцією, мають плавну подачу. Але їх подача залежить від опору системи. Відцентрові НГ використовують як насоси, вентилятори, а також як багатоступеневі компресори.

**Осьові** НГ (рис. 4.11) мають вигляд лопатевого колеса, яке розташоване в циліндричному корпусі.

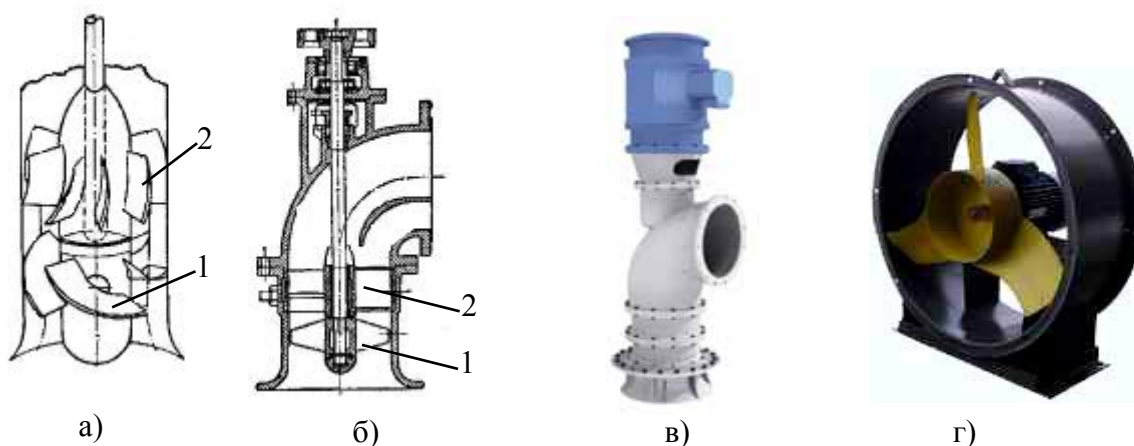


Рисунок 4.11 – Конструкція (а, б) та зовнішній вигляд осьового насоса (v) та вентилятора (г): 1 – робоче колесо; 2 – напрямний апарат

Під час обертання колеса здійснюється рух потоку вздовж осі НГ. Осьові НГ бувають реверсні, мають вищий ККД і більш компактні, ніж відцентрові. Але осьові НГ створюють менші напори.

**Вихрові** нагнітачі мають лопатеве колесо (рис. 4.12), яке нагадує відцентрове, але з прямими лопатями.



Рисунок 4.12 – Конструкція лопатей (а) та зовнішній вигляд вихрового насоса

Через відсутність радіального переміщення потоку їх не можна відносити до відцентрових, а через відсутність осьового переміщення – до осьових. Вони прості за конструкцією, можуть працювати у реверсному режимі, але мають низький ККД.

#### 4.2.2 Характеристики та робоча точка нагнітача

*Характеристиками* (рис. 4.13) лопатевого нагнітача називають графіки залежності напору  $H$  або  $P$  (м в. ст. або Па), ККД  $\eta$  та потужності  $N$  (кВт) від об'ємної подачі  $V$  (м<sup>3</sup>/год).

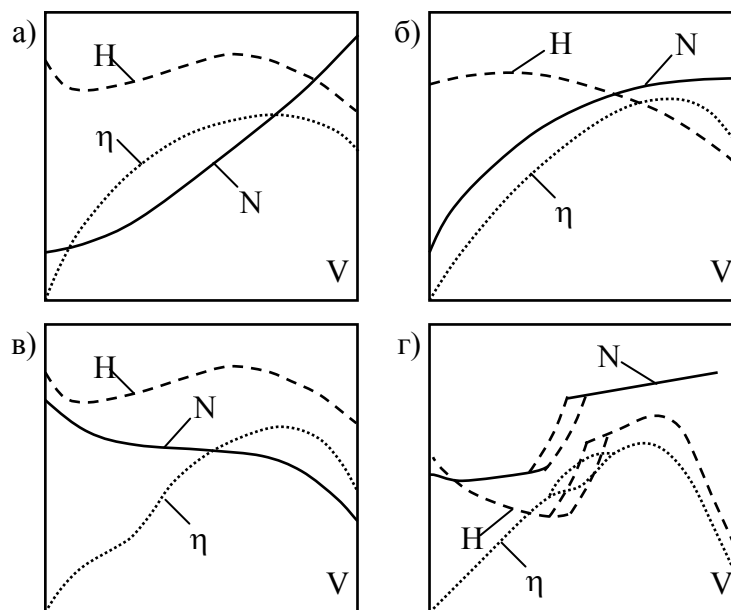


Рисунок 4.13 – Типові характеристики насосів і вентиляторів: а – вентилятор із загнутими вперед лопатями; б – вентилятори і насоси із загнутими назад лопатями; в – низьконапірні осьові насоси; г – високонапірні осьові вентилятори

Значення цих характеристик залежать від швидкохідності НГ та конструкції робочого колеса. Потужність  $N$ , кВт, подача  $V$ , м<sup>3</sup>/с, напір  $H$ , кПа, та ККД  $\eta$  пов'язані залежністю

$$N = \frac{V \cdot H}{\eta}. \quad (4.2)$$

*Характеристика мережі* – це залежність опору мережі від витрати середовища. Для визначення робочої точки нагнітача в осях  $H = f(V)$  відкладаються характеристика нагнітача і мережі (рис. 4.14).

Характеристика мережі  $H = f(V)$  має переважно параболічний характер. Для виявлення характеристик робочої точки нагнітача, що працює на мережу, знаходять точку перетину характеристик нагнітача та характеристик мережі.

Якщо опір системи при розрахунковій подачі  $V_p$  нижчий, ніж розрахунковий опір  $H_c < H_{c_p}$ , то замість розрахункової подачі  $V_p$ , що відповідає

точці В, нагнітач матиме більшу подачу  $V > V_p$ , яка відповідає робочій точці А (див. рис. 4.14, а).

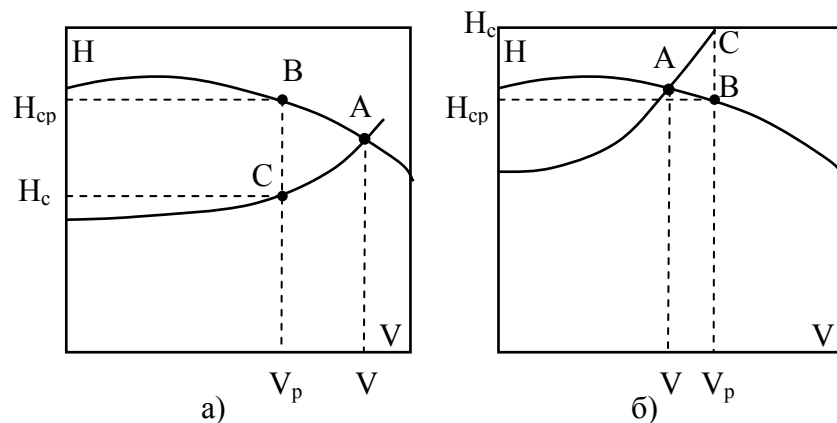


Рисунок 4.14 – Характерні випадки сумісної роботи нагнітача та мережі

Якщо опір системи більше розрахункового  $H_c > H_{cp}$  для подачі  $V_p$ , то замість розрахункової подачі  $V_p$ , що відповідає точці В, нагнітач матиме нижчу подачу  $V < V_p$ , що відповідає робочій точці А (див. рис. 4.14, б).

### 4.2.3 Теплові двигуни

Сучасними тепловими двигунами в теплоенергетиці є парові та газові турбіни, двигуни внутрішнього згорання. **Турбіна** (Turbine) являє собою ротаційний двигун лопатевого типу. Струмина пари (газу) за допомогою напрямних (соплових) апаратів надходить на криволінійні лопаті, які закріплені на робочому колесі (диску) двигуна. Соплові апарати призначені для перетворення потенціальної енергії тиску та теплової енергії робочого тіла на кінетичну енергію потоку. Крім того, вони забезпечують необхідний кут входу потоку на робочі лопаті. Робоче тіло безударно обтікаючи профілі лопатей змінює вектор швидкості як за модулем, так і за напрямком. Внаслідок цього виникає колова швидкість, яка створює крутний момент на валу і ротор турбіни обертається.

Схема та зовнішній вигляд турбіни показані на рис. 4.15.

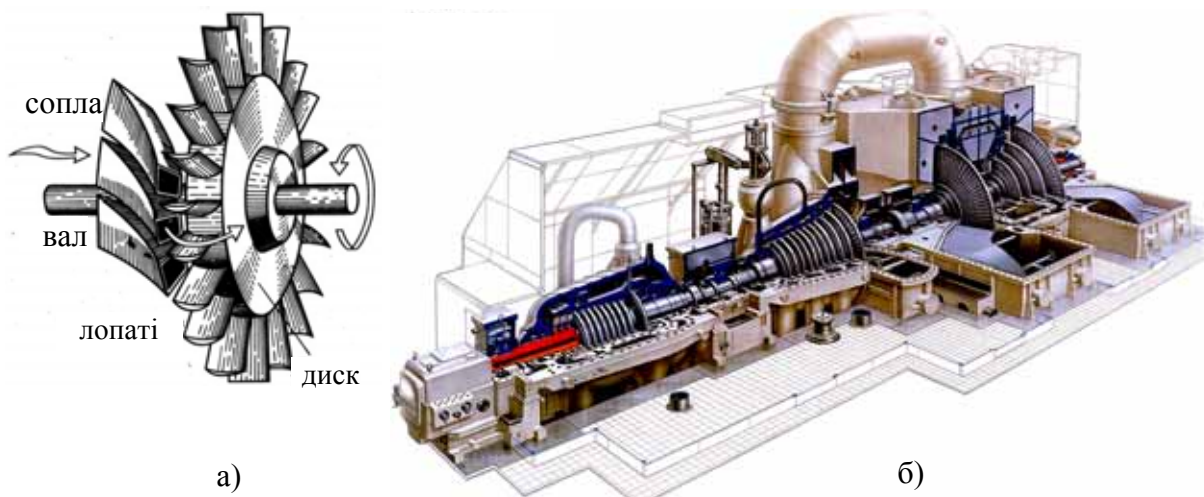


Рисунок 4.15 – Схема ступеня (а) та зовнішній вигляд (б) турбіни

### 4.3 Тепломасообмінні установки

Теплообмінні установки – пристрої для передавання теплоти від нагрітого середовища до нагріваного. В тепломасообмінних установках крім теплоти переноситься і маса робочих тіл. До тепломасообмінних установок можна віднести теплообмінні апарати (теплообмінники) та технологічне обладнання, де використовуються теплоносії – теплотехнологічні установки: сушильні; ректифікаційні; випарні та інші.

#### 4.3.1 Теплообмінники

Теплообмінники (Heat exchangers) поділяють на такі види: *рекуперативні*, *регенеративні* та *змішувальні* (контактні).

В рекуперативних теплообмінниках теплота передається від одного середовища до іншого через стінку, яку ці середовища омивають з різних боків. В регенеративних теплообмінниках середовища по чергово омивають ту саму сторону поверхні відповідно нагріваючи її, а потім – охолоджуючи.

Найбільш поширеними конструкціями рекуперативних теплообмінників є пластинчасті і кожухотрубчасті апарати (рис. 4.16).



Рисунок 4.16 – Рекуперативні теплообмінники: пластинчастий (а) та кожухотрубчастий (б)

В хімічній технології широко використовуються оболонкові та змішувальні теплообмінники.

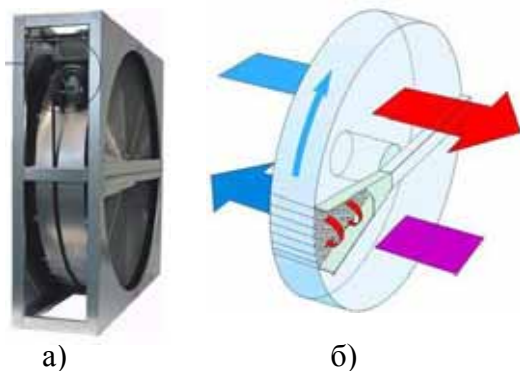


Рисунок 4.17 – Вигляд (а) та схема руху теплоносіїв (б) роторного регенеративного теплообмінника

**Регенеративні теплообмінники** в теплоенергетиці зустрічаються рідше. Наприклад, обертові повітропідігрівники в котлах великої потужності або теплоутилізатори в вентиляційних установках (рис. 4.17).

Недоліком регенеративних теплообмінників є можливість підмішування одного теплоносія в інший.

**Змішувальні (контактні) теплообмінники** використовуються для

охолодження димових газів, охолодження оборотної води тощо.

Теплова потужність теплообмінника, в якому охолоджуються або нагріваються теплоносії визначається з рівняння теплового балансу, кВт

$$Q_{\text{то}} = G \cdot c_p \cdot (t' - t''), \quad (4.3)$$

де  $G$  – витрата теплоносія, кг/с;

$c_p$  – середня теплоємність теплоносія, кДж/(кг·К);

$t'$ ,  $t''$  – температури теплоносія на вході і виході з теплообмінника, °С.

Для теплообмінників із фазовим переходом потужність визначається за формулою, кВт

$$Q_{\text{то}} = G \cdot (h_{\text{парі}} - h_{\text{конденсату}}). \quad (4.4)$$

### 4.3.2 Теплотехнологічні установки

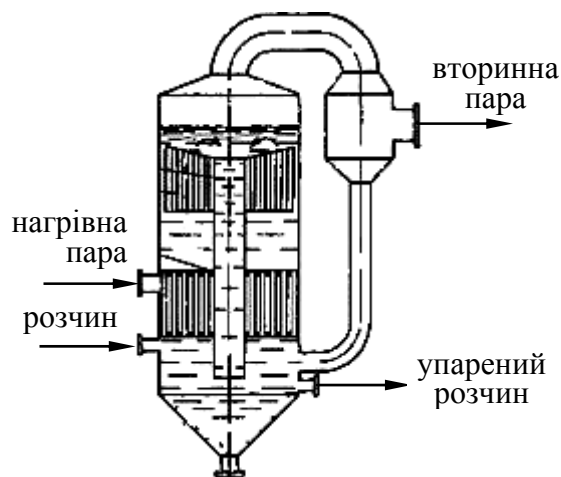
В переважній більшості технологічних процесів використовуються теплові процеси. Обладнання для проведення таких процесів називається теплотехнологічними установками.

**Випарні установки** (Evaporate units) призначені для згущення розчинів. Випарні установки використовуються в харчовій, переробній і хімічній промисловості.

В трубний простір такого апарату подається розчин з низькою концентрацією, а в міжтрубний – нагрівний теплоносій, наприклад, водяна пара. За рахунок википання частини води з розчину його концентрація підвищується. Упарений розчин відводиться з апарату. Зовнішній вигляд та принцип роботи показані на рис. 4.18.



а)



б)

Рисунок 4.18 – Зовнішній вигляд випарних апаратів (а) та принцип їх роботи (б)

Випарювання може відбуватись під надлишковим тиском або під розрідженням. Це впливатиме на температуру кипіння.

**Ректифікаційні установки** (Rectification units) призначені для розділення рідких сумішей на практично чисті компоненти. Ректифікація широко використовується в харчовій і переробній промисловості, в хімічній галузі, нафтопереробці, металургії та ін.

Під час розділення відбувається багатократний масо- і теплообмін між компонентами із різними температурами кипіння – висококиплячими і низькокиплячими. Через необхідність багаторазового контакту компонентів ректифікаційні колони виконують вертикальними з висотою до 50 м. Для рівномірного розподілу компонентів встановлюють сітчасті тарілки або ковпачки.

Принципова схема ректифікаційної колони показана на рис. 4.19.

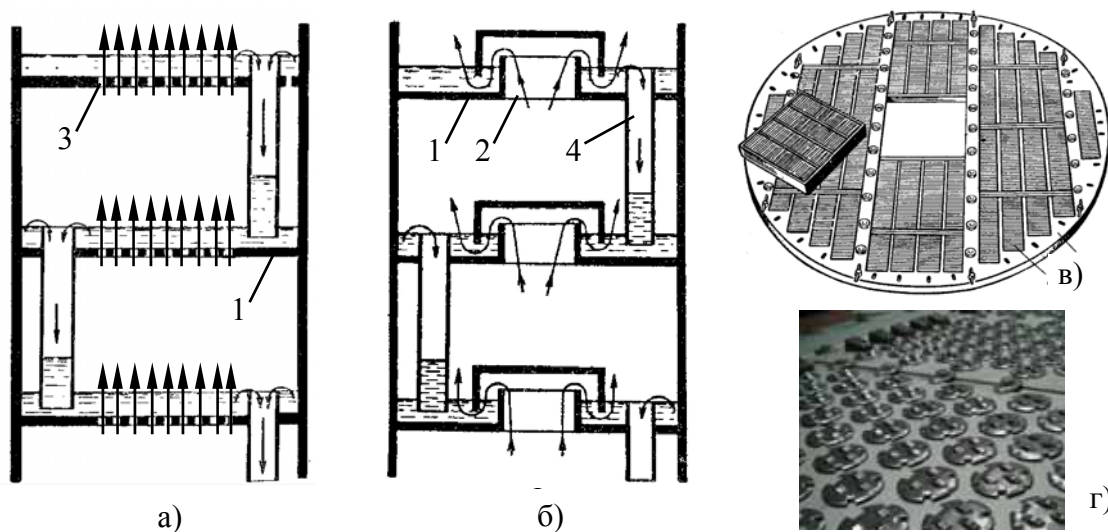


Рисунок 4.19 – Конструктивна схема сітчастої (а) та ковпачкової ректифікаційної колони, вигляд сітчастої (в) та ковпачкової тарілки (г): 1 – тарілка; 2 – ковпачок; 3 – отвори тарілки; 4 – переливна труба

В нижній частині колони відбувається кипіння суміші компонентів. Пара піднімається крізь сітки або ковпачки і шар рідини (флегми), яка стікає з верхніх тарілок на нижні. При цьому пара частково конденсується, віддаючи теплоту на закипання низькокиплячого компонента. Так з кожною наступною тарілкою пара збагачується низькокиплячим компонентом, а рідина – висококиплячим. У верхній частині колони отримуємо пару із високою концентрацією низькокиплячого компонента, а в нижній – кубовий залишок з високою концентрацією низькокиплячого компонента.

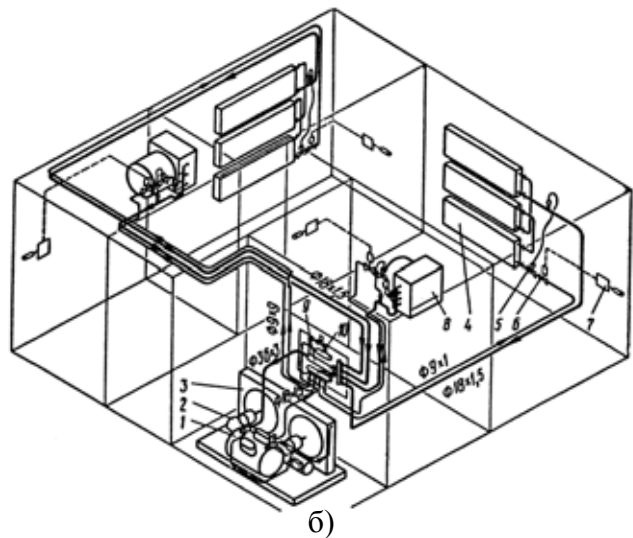
**Холодильні установки** (Refrigeration units) призначені для виробництва холоду (відведення теплоти).

Холодильні установки використовуються надзвичайно широко і є одним з найбільших споживачів електроенергії. Найчастіше вони комплектуються парокомпресійними холодильними машинами, які складаються з компресора, конденсатора, дросельного пристрою і випарника. Зовнішній

вигляд холодильної машини та схема холодильної установки малої потужності показані на рис. 4.20.



а)



б)

Рисунок 4.20 – Вигляд холодильної машини (а) та схема холодильної установки (б)

Температура в холодильній камері підтримується за рахунок постійного підведення робочого тіла в охолоджувальні поверхні. Всередині цих поверхонь відбувається кипіння робочого тіла за умов низького тиску і температури. Таким чином, проводиться підведення холоду (відведення теплоти) з камери. Потім в компресорі пара стискається і її температура зростає. Після цього вся отримана в камері і компресорі теплота викидається через конденсатор в навколишнє середовище. В дросельному пристрої тиск і температура робочого тіла знову знижується і цикл повторюється.

Робочими агентами в холодильних машинах можуть бути аміак або фреони. Їх вибирають так, щоб тиск у випарнику був близьким до атмосферного, а тиск в конденсаторі не занадто високим. Аміак є небезпечним для людини, а фреони шкідливі для навколишнього середовища. Останнім часом розробляються фреони, які мають мінімальний потенціал глобального потепління і вплив на озоновий шар.

Діапазон робочих температур холодильних установок 120...293 К. Для більш низьких температур використовують криогенні установки.

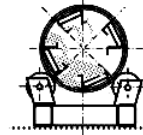
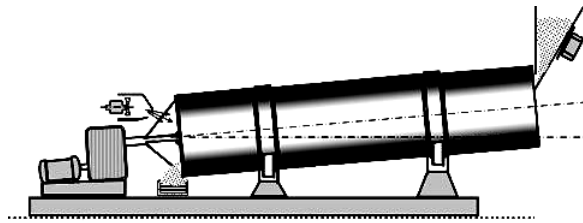
**Сушильні установки** (Drying units) використовують для зменшення вологості продукції. Сушіння можна поділити на природне (сонячне випромінювання, вітер) та штучне.

Штучне сушіння є одним з найенергоємніших процесів оброблення продукції. Виділяють кондуктивне і конвективне сушіння. Кондуктивне – коли теплота для випарювання вологи з продукції передається теплопровідністю від нагрітої поверхні, а конвективне – коли теплота передається з потоком гарячого теплоносія – повітря, димових газів, перегрітої пари.

На рис. 4.21 показана схема конвективної барабанної сушарки.



а)



б)

Рисунок 4.21 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) конвективної барабанної сушильної установки

З одного боку сушарки подається волога продукція, а з іншого – сушильний агент – частіше підігріте повітря або димові гази. Барабан сушарки обертається, продукція пересипаючись рухається проти течії сушильного агента. Це забезпечує якісний тепломасообмін і відведення вологи.

**Високотемпературні установки** (High temperature units) призначені для термічного оброблення продукції. Основою таких установок є печі, конвертери, реактори.

Це обладнання має паливоспалювальні і тягодуттьові пристрої, обмурівку, газоходи та повітропроводи тощо.

Обмурівку робочих камер високотемпературних установок виконують з вогнетривких матеріалів – вогнетривів. Це конструкційні матеріали, які мають високу температуру початку деформації і низьку теплопровідність. Найбільше використовують шамот, високоглиноземні, магнезитові, хромомagneзитові, доломітові матеріали. Для таких матеріалів допустимі температури в камерах складають 1350...1750 °С, теплопровідність матеріалу 0,1...0,5 Вт/(м·К). Для нижчих робочих температур можна використовувати волокнисті вогнетриви із теплопровідністю 0,03...0,02 Вт/(м·К).

### Контрольні запитання

1. Наведіть схему та основні елементи парогенератора.
2. Поясніть конструкцію та принцип дії водогрійного котла.
3. Наведіть класифікацію та конструкцію основних типів нагнітачів.
4. Що називається характеристикою нагнітача, характеристикою мережі? Як знайти робочу точку нагнітача?
5. Призначення, конструкція та принцип дії турбіни.
6. Поясніть призначення та класифікацію теплообмінних апаратів.
7. Наведіть призначення та особливості конструкції випарних апаратів та ректифікаційних колон.
8. Поясніть призначення та принцип дії холодильних, сушильних та високотемпературних установок.



## Приклади розв'язання задач

**Приклад 4.1.** Побутовий газовий водогрійний котел за добу спалює  $125 \text{ м}^3$  природного газу. Визначити його середню теплову потужність, якщо теплота згорання газу  $33 \text{ МДж/м}^3$ , а ККД котла  $90 \%$ .

### *Розв'язання*

Секундна витрата природного газу,  $\text{м}^3/\text{с}$

$$V_p = \frac{125}{24 \cdot 3600} = 0,00145.$$

Теплова потужність котла за (4.1), кВт

$$Q_k = V_p \cdot Q_n = 0,00145 \cdot 33000 = 47,74.$$

**Приклад 4.2.** Визначити коефіцієнт корисної дії вентилятора, який перекачує  $10000 \text{ м}^3/\text{год}$  повітря. Напір вентилятора  $500 \text{ Па}$ , а його електрична потужність  $2,2 \text{ кВт}$ .

### *Розв'язання*

Визначимо секундну витрату повітря,  $\text{м}^3/\text{с}$

$$V = \frac{10000}{3600} = 2,778.$$

ККД вентилятора за (4.2)

$$\eta = \frac{V \cdot H}{N} = \frac{2,778 \cdot 500}{2,2 \cdot 10^3} = 0,631.$$

**Приклад 4.3.** Визначити потужність теплообмінника, в якому нагрівається водопровідна вода від температури  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Нагрівна вода має температуру на вході  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , а на виході  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Витрата нагріваної води  $5 \text{ кг/с}$ . Теплоємність води прийняти  $4,19 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

### *Розв'язання*

Теплова потужність теплообмінника з боку нагріваної води, кВт

$$Q_{\text{то}} = G_2 \cdot c_p \cdot (t_2' - t_2'') = 5 \cdot 4,19 \cdot (60 - 5) = 1152,3.$$

Витрата нагрівної води з (4.3),  $\text{кг/с}$

$$G_1 = \frac{Q_{\text{то}}}{c_p \cdot (t_2'' - t_2')} = \frac{1152,3}{4,19 \cdot (95 - 70)} = 11,0.$$

### Задачі для самостійної роботи

**Приклад 4.4.** Визначити витрату нагрівної та нагріваної води через теплообмінник потужністю 1 МВт, якщо температурний графік нагрівної води  $t_1'/t_1''$ , а нагріваної 5/30 °С. Середню теплоємність води прийняти 4,19 кДж/(кг·К).

|                          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Передостання цифра шифру | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| Температура $t_1'$ , °С  | 150 | 145 | 140 | 135 | 130 | 125 | 120 | 115 | 110 | 105 |
| Остання цифра шифру      | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| Температура $t_1''$ , °С | 40  | 45  | 50  | 55  | 60  | 65  | 70  | 75  | 80  | 85  |

**Приклад 4.5.** Визначити потужність насоса, який перекачує воду з витратою  $G$  і напором 0,05 МПа. Густина води прийняти 990 кг/м<sup>3</sup>, ККД насоса  $\eta$ .

|                          |     |      |      |      |     |      |      |      |     |      |
|--------------------------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|
| Передостання цифра шифру | 0   | 1    | 2    | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8   | 9    |
| Витрата $G$ , кг/с       | 5   | 10   | 15   | 20   | 25  | 30   | 35   | 40   | 45  | 50   |
| Остання цифра шифру      | 0   | 1    | 2    | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8   | 9    |
| ККД насоса $\eta$        | 0,6 | 0,62 | 0,65 | 0,68 | 0,7 | 0,72 | 0,75 | 0,78 | 0,8 | 0,82 |

**Приклад 4.6.** Визначити ККД водогрійного котла, який за 3 год спалює  $V$ , м<sup>3</sup>, природного газу з теплотою згорання 34 МДж/м<sup>3</sup>. При цьому в котлі нагрівається  $G$  кг/с води на 20 °С. Теплоємність води прийняти 4,19 кДж/(кг·К).

|                              |      |      |     |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| Передостання цифра шифру     | 0    | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| Витрата $G$ , кг/с           | 0,22 | 0,21 | 0,2 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 |
| Остання цифра шифру          | 0    | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| Витрата $V$ , м <sup>3</sup> | 5,8  | 5,9  | 6,0 | 6,1  | 6,2  | 6,3  | 6,4  | 6,5  | 6,6  | 6,7  |

## 5 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ

Теплоенергетичні системи призначені для виробництва теплової енергії, її перетворення в інші види енергії (наприклад, електричну енергію), транспортування та розподіл енергії по споживачах.

### 5.1 Джерела тепlopостачання

До джерел тепlopостачання (Sources of thermal supply) відносять парові і водогрійні котельні, теплоелектроцентралі ТЕЦ та електростанції: теплові ТЕС, атомні АЕС та ін.

#### 5.1.1 Парові та водогрійні котельні

Парові та водогрійні котельні (Boiler room) призначені для виробництва теплової енергії у вигляді гарячої води, насиченої або перегрітої пари.

Котельні складаються з кількох котельних установок. Вони включають котли, вентилятори, димососи, станцію хімоводоочищення, конденсатне господарство, систему паливопідготовки, теплообмінники, насоси тощо.

Парові котельні на відміну від водогрійних не тільки постачають теплоту на опалення, вентиляцію, гаряче водопостачання та кондиціонування, а й забезпечують технологічні потреби підприємства.

Приклади компонування котельень показані на рис. 5.1.



а)



б)

Рисунок 5.1 – Компонування парової (а) та водогрійної (б) котельні

Компонування обладнання котельень виконують згідно з вказівками СНіП II-35-76 – "Котельні установки". Вибір і компонування обладнання котельень повинні задовольняти вимоги щодо надійності та довговічності системи, якості тепlopостачання, економічності під час спорудження та експлуатації, концентрацій шкідливих викидів, безпеки обслуговування.

### 5.1.2 ТЕЦ та ТЕС

Теплоелектроцентраль ТЕЦ призначена для одночасного виробництва теплової та електричної енергії. Для цього на ТЕЦ крім котельних установок встановлені теплові двигуни – турбіни.

Приклади компоновання обладнання ТЕЦ показані на рис. 5.2.



а)



б)

Рисунок 5.2 – Зовнішній вигляд обладнання ТЕЦ: а – паровий котел ТЕЦ без обмурівки; б – компоновання обладнання турбінного цеху

Останнім часом широко впроваджувалися міні-ТЕЦ обладнані двигунами внутрішнього згорання (рис. 5.3).



Рисунок 5.3 – Зовнішній вигляд обладнання міні-ТЕЦ з газопоршневими двигунами

Такі газопоршнєві або дизельні двигуни, з'єднані з електрогенераторами, спалюючи газове або інше паливо, виробляють електричну енергію.

Крім того, відпускається теплова енергія, відібрана від системи охолодження двигуна та гарячих димових газів.

Теплова електрична станція ТЕС призначена для виробництва електричної енергії. Вона відпускає також теплову енергію для теплопостачання, але частка теплової енергії незначна.

## 5.2 Теплові мережі

Теплові мережі (Thermal networks) – це комплекс обладнання, призначений для транспортування теплової енергії від джерела теплопостачання і забезпечення споживачів теплотою із певними параметрами.

Теплові мережі включають систему теплопроводів (Hot-water pipes) та теплові пункти для розподілу та регулювання параметрів теплоносія.

Теплопроводи призначені для транспортування теплоти з парою або гарячою водою. Теплопроводи прокладаються підземним та надземним способом. Схеми прокладання теплопроводів показані на рис. 5.4.

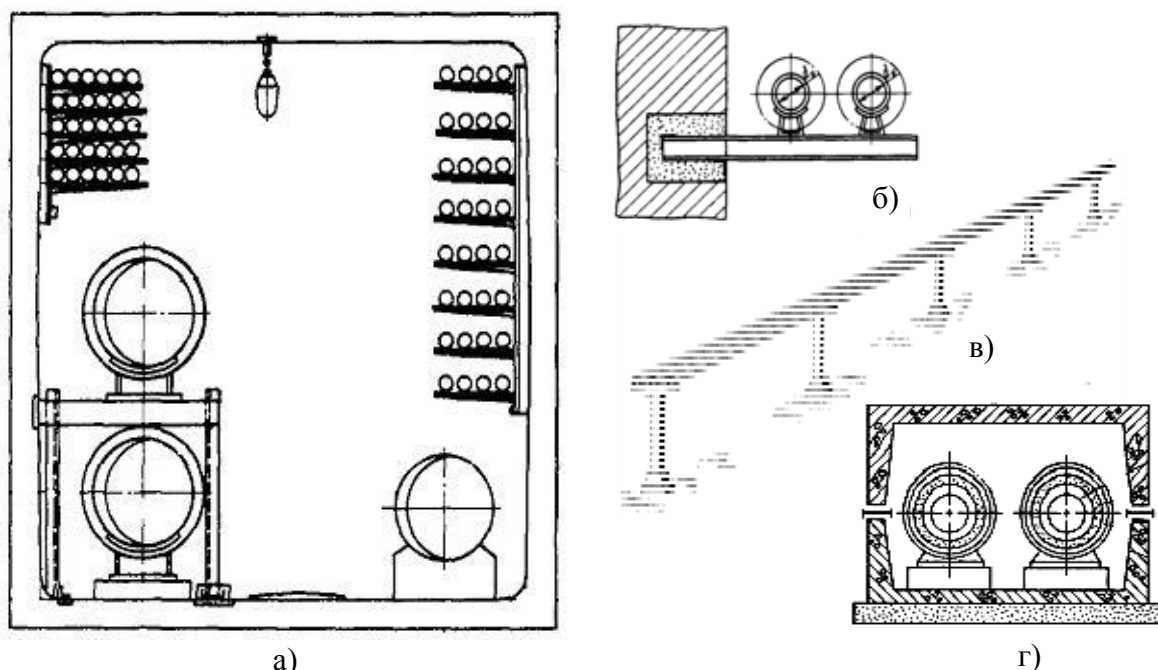


Рисунок 5.4 – Способи прокладання теплопроводів: а), г) – підземна в прохідному та непрохідному каналі; б), в) – надземна на кронштейнах та на щоглах

Для регулювання параметрів теплоносія використовують теплові пункти. Останнім часом поширення набувають модульні теплові пункти повної заводської готовності (див. рис. 5.5).

Вони спроектовані для заданої потужності та характеристик споживача, обладнання та арматура пункту скомпоновані на каркасі із максимальною компактністю.



Рисунок 5.5 – Зовнішній вигляд блочного теплового пункту

### 5.3 Системи виробництва і розподілу енергоносіїв

До таких систем відносять системи водопостачання, паливопостачання, системи постачання повітря.

**Система водопостачання** є складною інженерною системою, яка включає пристрої для приймання води, її перекачування, очищення, регулювання та підтримання тиску води, трубопровідну систему.

Розрізняють господарсько-питний водопровід та виробниче водопостачання.

В залежності від кількості "свіжої" води розрізняють прямотечійні, каскадні та оборотні схеми водопостачання промислових підприємств. Прямотечійна схема характеризується використанням виключно "свіжої" води. Оборотна система споживає "свіжу" воду тільки для поповнення втрат (1...3 %). Каскадна схема передбачає використання води після частини споживачів для інших споживачів, наприклад, після охолодження обладнання вода може використовуватись для миття продукції.

**Система повітропостачання** призначена для забезпечення споживачів стисненим повітрям. Розрізняють технологічне та силове повітря. Силове призначене для привода машин та механізмів, технологічне безпосередньо використовується для виготовлення продукції.

Стиснене повітря отримують на компресорних станціях, які складаються з компресорів, повітрозбірників (ресиверів), охолодників, осушувальних установок тощо.

**Система паливопостачання** є однією із основних складових теплоенергетичної системи. Як паливо в теплоенергетиці в основному використовується природний газ, мазут, вугілля.

В залежності від виду палива вибирається склад елементів системи.

Для природного газу достатньо регулювати тиск перед пальниками.

Мазутне господарство включає ємності з обігрівом для зберігання мазуту, мазутопроводи з обігрівальними паропроводами-супутниками, підігрівники, насоси, що забезпечують постійну циркуляцію мазуту.

Система постачання твердого палива складається з бункерів, дробарок, млинів, сушильних установок, конвеєрних ліній тощо.

### **Контрольні запитання**

1. Які об'єкти відносяться до джерел тепlopостачання? Поясніть відмінність котелень, ТЕЦ та ТЕС.
2. Поясніть призначення та способи прокладання теплових мереж. Наведіть приклади.
3. Поясніть призначення та склад обладнання теплових пунктів.
4. Які системи відносяться до систем виробництва та розподілу енергоносіїв? Які енергоносії виробляють такі системи?
5. Дайте класифікацію систем водопостачання.
6. Поясніть відмінність систем підготовки різних палив.

### **Завдання для самостійної роботи**

**Завдання 5.1.** Користуючись літературною та іншою інформацією підготуйте звіт за однією з тем.

1. Енергетичний баланс України. Співвідношення виробництва електроенергії з різних джерел.
2. Характеристика теплових електростанцій України. Технічні, екологічні та економічні показники.
3. Характеристика атомних електростанцій України. Технічні, екологічні та економічні показники.
4. Сучасний стан та перспективи розвитку міні-ТЕЦ з газопоршневими двигунами.
5. Сучасні конструкції теплопроводів. Теплоізоляція і тепловтрати.
6. Модульні теплові пункти. Переваги і недоліки.
7. Ефективні системи водопостачання промислових підприємств. Втрати води і джерела підживлення.
8. Сучасні системи підготовки твердого палива до спалювання.
9. Сучасні системи підготовки рідкого палива до спалювання.

## **6 ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ, ЕКОНОМІКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ**

Україна є однією з найбільших країн Європи і має потужний промисловий комплекс. В наш час, на жаль, енергоємність виробництва продукції в Україні перевищує показники країн ЄС в 2...4 рази. Тому питання підвищення енергоефективності і впровадження енергозберіжних технологій стає першочерговою задачею.

Підвищити енерго-екологічну та економічну ефективність теплоенергетичних об'єктів можна за рахунок:

- використання природоохоронних заходів та застосування заходів щодо енергозбереження;
- застосування екологічного моніторингу;
- стимулювання розвитку наукових досліджень і практичного використання новітніх наукових досягнень і науково-технічних розробок.

Найбільш капіталоємними є природоохоронні заходи. Капіталовкладення в ці заходи становлять 2 % від внутрішнього продукту в США і Японії, 1,2–1,8 % – у країнах Західної Європи. При цьому природоохоронні заходи не дають 100 % ефекту очищення шкідливих викидів. Уловлювання викидів не вирішує проблему відходів і лише переводить їх у безпечнішу для навколишнього середовища форму. Тому останнім часом в усьому світі переважає стратегія використання відходів виробництва, ресурсо- і енергозбереження.

Одним із напрямів підвищення ефективності енергетики є енергозбереження. Цей напрям дозволяє зменшити енергоємність одиниці продукції за рахунок модернізації та вдосконалення виробничих процесів. У багатьох країнах використовують різні стимули та способи для економії енергії на виробництві і в побуті, зокрема: упровадження норм і обмежень споживання енергії та палива з відповідними системами штрафів за перевитрату, уведення літнього часу, поліпшення теплоізоляції житлових будинків і виробничих приміщень тощо.

### **6.1 Консалтингові схеми в енергетиці**

Паливно-енергетичні кризи змусили переглянути ставлення суспільства до взаємодії процесів виробництва та використання енергії і навколишнього середовища. Відбулася кардинальна зміна у свідомості населення, передусім технічно розвинених країн. Цьому сприяла також цілеспрямована діяльність урядів у галузі енергетики, яка включала як роз'яснювальну роботу, так і жорсткі обмеження. Розроблення і реалізація комплексу заходів, метою яких є раціональніше використання енергії, є суттю державної



політики багатьох країн світу. Один з важливих державних заходів – створення консалтингових схем. **Консалтингова схема** – це система планомірних заходів, здійснюваних у якійсь спеціально обраній галузі.

До таких заходів належать:

- створення консалтингових фірм, які надають споживачам енергії, розробникам, працівникам планово-економічного сектору, експлуатаційному персоналу і керівникам підприємств послуги у сфері економії енергії;
- розроблення відповідних навчальних програм та ілюстративного матеріалу для підвищення рівня підготовки працівників з раціонального енерговикористання ;
- проведення широкої інформаційної компанії через засоби масової інформації, випуск друкованої продукції, що рекламує і пояснює саму ідею енергозбереження;
- висвітлення в пресі вдалих прикладів економії енергії, підготовка і публікація статей для фахівців у технічних журналах.

Створення і впровадження консалтингових схем зумовили зміни на краще у сфері економії енергії країн Західної Європи. Так, загальне споживання енергії в Данії 1990 р. залишалося на рівні 1973 р., тоді як валовий національний продукт виріс за цей же час на 40 %.

Такий самий підхід застосовують до побудови системи раціонального поєднання заходів щодо економії енергії та захисту навколишнього середовища. За основу беруть раціональне планування енергоспоживання за рахунок удосконалення технології. Це стосується як способу і культури експлуатації всякого устаткування, так і загального психологічного підходу до споживання енергії.

Удосконалення енерготехнологій та енергозбереження залежить від ефективності енергетичного устаткування та систем: ТЕС, ТЕЦ, опалювально-виробничі котельні, котлоагрегати різного призначення, печі; системи розподілу теплоти: теплові пункти, теплові мережі; системи вентиляційного устаткування будинків різного призначення; устаткування для виробництва, постачання та споживання електричної енергії.

## **6.2 Енергетичний аудит**

**Енергетичний аудит** – це технічне інспектування підприємств (виробництва) щодо їх енергоспоживання з метою визначення можливої економії енергії і допомоги підприємству (виробництву) в економії енергії на практиці завдяки механізмам енергетичної ефективності, а також з метою впровадження на підприємстві енергетичного менеджменту. Проведення

енергетичного аудиту – початкова фаза впровадження на підприємстві системи енергетичного менеджменту.

Аудитор повинен брати до уваги всі споживані види енергії з тим, щоб виробити пропозиції не тільки щодо їх скорочення, але й щодо оптимізації структури енергоспоживання.

Загальні вимоги до генеральної стратегії енергетичного аудиту такі:

- можливість її застосування для всіх типів виробництв і компаній;
- облік усіх видів енергії;
- сприяння зменшенню витрат часу на проведення аудиту завдяки максимальній стандартизації;
- можливість ідентифікації етапів для продовження роботи або її припинення;
- можливість використання енергетичного аудиту як бази для співпраці між аудиторами різних напрямів діяльності підприємства.

Структура генеральної стратегії проведення енергетичного аудиту включає чотири етапи.

**Етап 1.** Попередній контакт аудитора з керівництвом підприємства, ознайомлення з підприємством, основними виробничими процесами і технологічними лініями, укладання угоди з керівництвом підприємства про подальшу діяльність.

**Етап 2.** Упорядкування карти споживання енергії на підприємстві, ідентифікація можливості значної економії енергії.

На цьому етапі загальне енергоспоживання різних енергоносіїв розбивають на окремі процеси і установки, групи технологічних процесів, окремі об'єкти (будинки). Це і є створення карти споживання енергії, основане на проведенні спеціальних вимірювань і розрахунків. Усі виявлені можливості економії енергії вносять у перелік місць можливої економії, враховуючи пріоритетність.

**Етап 3.** Оцінювання економії енергії та економічних переваг від впровадження різних можливих заходів, вибір конкретної програми енергозбереження для першочергового впровадження, підготовка ключових технічних і економічних даних, надання керівництву підприємства звіту про енергетичний аудит, ухвалення рішення про проведення подальшої роботи з енергозбереження і укладання угоди про подальшу діяльність.

**Етап 4.** Впровадження програми енергозбереження, запуск системи енергетичного менеджменту, продовження діяльності щодо підвищення ефективності енергозбереження.

Успішна реалізація схеми енергетичного аудиту залежить від високої кваліфікації аудитора.

Він має знати:

- принципи роботи енергогенерувальних установок;
- процеси енергоспоживання (сушка, термооброблення, теплопостачання промислових підприємств і технологічних процесів, опалення, вентиляція і кондиціонування будівель, системи водопостачання, різання, плавлення, лиття тощо);
- основні енергетичні установки і системи (холодильні установки, компресорні станції, вентиляційні системи, системи освітлення, насоси, інші системи з електроприводами).

Він має вміти аналізувати доцільність використання того чи іншого енергоресурсу для забезпечення технологічних процесів на підприємстві.

### 6.3 Енергетичний менеджмент

*Енергетичний менеджмент* (ЕМ) дозволяє одержати докладну картину споживання енергії на підприємстві і порівняти ефективність існуючого споживання зі споживанням енергії на інших підприємствах.

Мета ЕМ – оцінювання проектів економії енергії та планованих заходів щодо енергозбереження на певному підприємстві.

Енергетичний менеджмент – це система керування енергоспоживанням на підприємстві, яка опирається на проведення типових вимірювань і перевірок та забезпечує таку роботу підприємства, коли споживається тільки необхідна (теоретично) для виробництва кількість енергії. Це основний інструмент скорочення споживання енергії і відповідно підвищення ефективності її використання, а також зниження негативного впливу енергетики на навколишнє середовище. За впровадження нового для підприємства виду діяльності і загалом за енергетичну ефективність підприємства відповідає енергетичний менеджер.

Основні обов'язки енергоменеджера такі:

- участь у впорядкуванні карти споживання енергії на підприємстві, збирання даних про споживання ПЕР з використанням лічильників і контрольно-вимірювальної апаратури;
- упорядкування плану установлення додаткових лічильників і контрольно-вимірювальної апаратури;
- збирання даних про потоки сировини, первинних енергоресурсів і готової продукції;
- розроблення пропозицій щодо підвищення ефективності використання енергії загалом і на окремих виробництвах;
- локалізація і впровадження заходів для економії енергії, що не потребують інвестицій або які можна реалізувати за рахунок мінімальних інвестицій;

- локалізація, оцінювання і визначення пріоритетності заходів для економії енергії, що потребують великих інвестицій;
- впорядкування схеми аварійного зупинення устаткування і варіантів енергопостачання для випадків аварійного припинення зовнішньої подачі енергії тощо;
- інформування персоналу підприємства про діяльність щодо енергетичного менеджменту та інформування про заходи, вжиті для економії енергії;
- упровадження нових технологій на існуючих і нових енергосистемах для підвищення енергоефективності виробництва;
- участь у розробленні виробничого плану і стратегії енергоспоживання на підприємстві.

Енергетичний менеджер зобов'язаний підтримувати власну інформованість у галузі енергетики, а також знати законодавство, систему оподаткування, питання захисту навколишнього середовища тощо. Перелік обов'язків енергетичного менеджера дуже широкий і потребує від нього різнобічних і глибоких знань.

Систему енергетичного менеджменту можна розглядати як сукупність таких етапів.

**Перший етап** – це запуск системи. Початок впровадженню системи енергетичного менеджменту може покласти енергетичний аудит, який дасть уявлення про ситуацію в енергоспоживанні підприємства.

**Другий етап** – аналіз і порівняння реальних рівнів споживання з ключовими цифрами з літератури, інших підприємств тощо.

**Третій етап** – визначення стану і обрання пріоритетів у виконанні проектів заощадження енергії.

На **четвертому етапі** проробляють бюджет виконання обраних проектів. Цей бюджет будують на вже відомих цифрах питомого споживання енергії на підприємстві.

**П'ятий етап** – це контроль за споживанням енергоносіїв, рівень якого має не перевищувати того, який зазначено в бюджеті. На цьому етапі іноді вдається виявити додаткових несподіваних споживачів енергії і провести аналіз причин, через які вони виникають.

На цьому перший цикл замикається. Наступний починається з тієї самої процедури. Такі системи енергетичного аудиту та енергетичного менеджменту працюють на більшості підприємств, які випускають конкурентоспроможну продукцію в країнах Європейського союзу.

Найефективніше використання енергії пов'язано з такими основними показниками:

- високим рівнем використання загального обсягу виробництва (якщо обсяг виробництва 50 % від максимального (проектного) рівня, то досить складно домогтися високої ефективності використання енергії);

- раціональним підбором типу енергоносіїв для основних енергоємних виробництв;
- вихідною якістю сировини;
- ефективністю роботи окремих установок і систем загалом (котлів, агрегатів і т. ін.);
- низьким рівнем втрат у системах розподілу енергії (пари, стисненого повітря, електроенергії).

Основну увагу треба приділяти найбільш енергоємним виробничим системам як ТЕС, котельні установки, сушильне устаткування, устаткування подачі тепла для виробничих потреб, системи опалення і водопостачання, системи вентиляції і кондиціонування повітря, холодильні установки, системи освітлення, системи подачі стисненого повітря, насоси та ін.

Втрати енергії відбуваються у всіх компонентах системи, але вартість їх усунення різна. Тому, аналізуючи в процесі енергетичного менеджменту можливості енергозбереження, треба підходити до таких систем комплексно. Зазвичай розгляд доцільно починати з кінця системи: саме тут (у навантаженні) найчастіше криються найдешевші і швидко реалізовані можливості енергозбереження.

#### **6.4 Енергозбереження**

Розглянуті вище заходи – енергетичний аудит і менеджмент, спрямовані на підвищення ефективності виробництва і споживання енергії, тісно пов'язані із загальними організаційними заходами щодо енергозбереження (Energy saving).

До них перш за все належать такі:

- розроблення законодавства і стандартів стосовно енергозбереження;
- впровадження обліку і контролю споживання енергоресурсів на всіх рівнях (від індивідуального споживача до регіону, галузі, держави загалом);
- перегляд цін і тарифів на енергоресурси, застосування державного нагляду за їх споживанням, скасування дотацій на споживання енергії та палива;
- визначення і підтримка оптимальних параметрів технологічних процесів;
- податки і штрафи за викиди в навколишнє середовище шкідливих речовин (Harmful matters);
- пільги на податки і кредити за впровадження енерго- і ресурсозбежних технологій, техніки, матеріалів;
- дотації населенню і підприємствам, які застосовують енергозбежну техніку, технології, матеріали та екологічно чисті енергоустановки і пристрої.

Проблема енергозбереження тісно переплітається з проблемами енергетики, екології, технічного переозброєння та структурної перебудови всієї економіки. Енергозбереженням на Україні керує Кабінет Міністрів через Держкоменергозбереження згідно із Законом «Про енергозбереження». Енергозбережна політика – орієнтований на довгострокову перспективу комплекс заходів для підвищення ефективності використання енергоресурсів в економіці держави за допомогою скорочення витрат кінцевої енергії на задоволення відповідних обсягів суспільних потреб, підвищення коефіцієнта корисного використання енергії завдяки вдосконаленню всього циклу видобування, виробництва, перетворення, розподілу і використання ПЕР, заміщення дорогих та обмежених за ресурсними можливостями джерел енергії дешевшими та необмеженими, проведення дієвої структурної перебудови господарських комплексів із якнайширшим урахуванням екологічних аспектів.

Основний потенціал енергозбереження зосереджено в галузях промисловості, що споживають найбільше енергоресурсів – енергетиці, металургії, хімічній і нафтохімічній промисловості, виробництв і будівельних матеріалів, машинобудуванні, житлово-комунальному секторі. На підставі комплексного аналізу напрямів і заходів енергозбереження можна визначити такі його пріоритети:

- впровадження нових енергозбережних технологій та обладнання, зокрема збільшення частки вже освоєних енергозбережних технологій;
  - зменшення матеріалоємності продукції (сировина, ефективніші матеріали, зменшення втрати матеріалів тощо);
  - підвищення ступеня використання вторинних енергоресурсів;
  - підвищення якості продукції;
  - удосконалення обліку та контролю за витратами енергоресурсів;
  - впровадження засобів силової електроніки (регульований електропривод, технологічні перетворювачі тощо);
  - вдосконалення систем теплопостачання (джерела тепла, мережі теплопостачання, технологічні системи тощо);
  - використання сучасних екологічно безпечних технологій спалювання низькоякісного вугілля;
  - виробництво енергії за рахунок використання вторинних енергоресурсів без додаткового залучення палива;
  - використання економічних систем і приладів електроосвітлення.
- До першочергових енергозбережних заходів належать:
- впровадження сучасних енергоефективних технологій (інтенсифікація процесу спалювання газу і твердого палива);
  - впровадження економічних паливних пристроїв та пальників, установок для утилізації теплових відходів з метою підвищення рівня використання вторинних енергоресурсів;

- впровадження тиристорних приводів частотного регулювання споживання електроенергії;
- встановлення сучасних приладів та систем обліку виробництва, транспортування та споживання енергоресурсів (природний газ, електрична і теплова енергія, вода тощо);
- автоматизація енерготехнологічних процесів;
- створення енергоефективних демонстраційних зон у галузях суспільного виробництва та об'єктах бюджетної сфери;
- розроблення та впровадження енергоефективних люмінесцентних та інших ламп освітлення та електронної пускорегулювальної апаратури до них;
- залучення в паливно-енергетичний баланс регіонів місцевих палив;
- впровадження маловитратних організаційно-технічних заходів;
- використання нетрадиційних палив та відновлюваних джерел енергії.

Найбільше палива в Україні витрачають для виробництва теплової енергії. Тому підвищення енергоефективності в цьому секторі навіть на декілька відсотків знижує загальну потребу країни в ПЕР на сотні тисяч тонн умовного палива. При цьому провідну роль у складі великих систем відіграє потужне, найекономічніше устаткування для комбінованого виробництва теплоти та електроенергії.

Енергетики Західної Європи дотримуються думки, що частка електричної енергії, виробленої ТЕЦ, у загальному балансі має становити близько 50 %. В Україні вона поки ще не перевищує 7 %, тоді як у Фінляндії в 1997 р. становила 34 % від загальної встановленої потужності. У муніципальній енергетиці Фінляндії пропорція комбінованого виробництва теплоти та електроенергії майже найвища у світі – 76 %.

На Україні історично переважає система централізованого теплопостачання, що до недавнього часу була характерна лише для країн колишнього СРСР і деяких інших країн (Фінляндії, Данії, Норвегії, Швеції). Останнім часом централізовані системи (перш за все на базі технологій теплофікації та когенерації) набули подальшого розвитку в багатьох розвинутих країнах світу, наприклад у США, Великій Британії, Німеччині. Порівняння техніко-економічної ефективності роздільної та комбінованої схеми виробництва теплової енергії свідчить, що економія палива в умовах комбінованого виробництва сягає 18...22 % на рік, щорічні витрати зменшуються на 20...25 %, а шкідливі викиди CO<sub>2</sub> – на 20 %.

Вагомий потенціал енергозбереження має комунально-побутовий і житловий сектор, на частку якого припадає близько 30 % споживання енергії в Україні. Особливої уваги заслуговує питання розміщення об'єктів комунальної та децентралізованої енергетики. Слід зауважити, що найбільші втрати виробленої електроенергії мають регіони, віддалені від ТЕС і АЕС на

значні відстані (Крим, Одеська, Рівненська, Волинська, Житомирська області, південні частини Херсонської, Запорізької і Донецької областей). Сюди належать і села України, до яких прокладено ЛЕП невисокої напруги (6, 10 кВ). Як показують розрахунки фахівців США, передавання електроенергії напругою 11 кВ на відстань більше 5 км, виходячи з діючих тарифів, є збитковим через високі питомі і абсолютні втрати енергії.

Дослідження в галузі ефективного перетворення енергії охоплюють широке коло проблем. Базові теплоенергетичні процеси характеризуються поступовим зменшенням енергетичного потенціалу робочого тіла. Завдання полягає не тільки в підвищенні цього потенціалу збільшенням кількості енергії, яку можна перетворити на роботу, але й у створенні процесів перетворення теплової енергії з мінімальними тепловими втратами, можливістю подальшого корисного використання низькотемпературної теплової енергії в інших процесах і, нарешті, з максимальним зниженням впливу енергетики на навколишнє середовище.

## 6.5 Економіка теплоенергетики

Теплоенергетичний об'єкт для здійснення своєї діяльності повинен мати кваліфікований персонал, засоби виробництва, основні фонди та оборотні засоби.

**Основні фонди** – сукупність матеріально-речовинних цінностей, які тривалий час беруть участь у процесі виробництва продукції, зберігаючи при цьому свою натуральну форму, а їх вартість поступово переноситься на вироблену теплову та електричну енергію. Основні фонди поділяються на активні (машини, обладнання, інструмент, інвентар тощо) та пасивні (будівлі, склади, лабораторії, дороги тощо).

**Оборотні засоби** – сукупність власних та запозичених грошових засобів, яка сприяє грошовому кругообігу і забезпечує безперервність процесу виробництва теплової та електричної енергії. В теплоенергетиці орієнтовна структура оборотних фондів така: паливо – 85 %; запчастини, матеріали – 11 %; інші запаси, включаючи витрати майбутніх періодів 4 %.

Перед розробленням проекту будівництва або реконструкції теплоенергетичного об'єкту виконують **техніко-економічне обґрунтування**. Це передпроектна документація, в якій здійснюються прогностичні розрахунки, доповнюється або конкретизується схема розвитку території, обирається оптимальний варіант з найбільшим економічним, екологічним та енергетичним ефектом.

Кожен проект розробки або реконструкції теплоенергетичного об'єкту закінчується визначенням **техніко-економічних показників**:

- встановлена потужність об'єкту, МВт;
- одинична потужність теплоенергетичного обладнання, МВт;
- параметри виробленого енергоносія (тиск, температура, витрата);



- річні витрати умовного палива, т. у. п./рік;
- річний відпуск теплової (ГДж/рік) та електричної (МВт·год/рік) енергії;
- річні витрати теплової та електричної енергії на власні потреби;
- питомі капіталовкладення (грн/кВт);
- питомі витрати умовного палива (кг у. п./ГДж), (кг у. п./МВт·год);
- собівартість виробленої теплової та електричної енергії (грн/ГДж) або (грн/МВт·год).

Повна **собівартість виробництва енергії** включає виробничу собівартість, адміністративні витрати, витрати на збут. До виробничої собівартості відносять:

- вартість палива, води, енергії, допоміжних матеріалів, запасних частин та інших предметів, послуг виробничого характеру;
- основну та додаткову заробітну плату, матеріальну допомогу та інші виплати, нарахування на соціальні заходи і страхування;
- амортизацію основних засобів та інших активів, орендну плату, втрати від браку;
- витрати, пов'язані із управлінням виробництвом та обслуговуванням виробничого процесу.

**Тарифи** на енергетичну продукцію є важливою техніко-економічною категорією. Такі тарифи встановлюються як франко-споживач, тобто враховують витрати на транспортування енергії до споживача.

Основою для визначення тарифу є повне покриття собівартості виробництва продукції.

Тарифи на енергетичну продукцію повинні визначатись з врахуванням таких принципів:

- кожна працююча система повинна мати можливість відшкодувати витрати на виробництво, транспортування та збут продукції, крім того їй повинно бути гарантовано отримання прибутку, достатнього для розрахунків з держбюджетом, виплати банківських кредитів, утворення фондів економічного стимулювання;
- створення умов стимулювання споживачів до використання енергоефективного обладнання;
- забезпечення правильного співвідношення між ціною палива та теплової і електричної енергії.

**Прибуток** – це частина доходу підприємства, що залишається після відшкодування усіх витрат, пов'язаних із виробництвом і реалізацією енергії. Прибуток є основним фінансовим показником господарської діяльності підприємства, це джерело стимулювання працівників та впровадження інноваційних проектів.

**Рентабельність виробництва** – показник фінансово-господарської діяльності підприємства, визначається як відношення прибутку до суми вартості виробничих фондів і величини оборотних засобів.

**Рентабельність продукції** – відношення прибутку, отриманого від діяльності підприємства, до собівартості виробної енергії.

### **Контрольні запитання**

1. Наведіть заходи для покращення екологічної, енергетичної та економічної ситуації в теплоенергетиці.
2. Поясніть призначення та особливості консалтингових схем.
3. Що таке енергетичний аудит? З яких етапів він складається?
4. Наведіть основні організаційні заходи щодо енергозбереження.
5. Поясніть заходи, що приводять до енергозбереження на підприємствах, в комунальному секторі, в будівництві, транспорті, побуті. Проілюструйте прикладами.
6. Поясніть поняття основні фонди та оборотні засоби. Наведіть приклади з теплоенергетичних об'єктів.
7. Проаналізуйте як формується собівартість та тарифи на теплоенергетичну продукцію.
8. Наведіть основні техніко-економічні показники теплоенергетичного об'єкту.

### **Завдання для самостійної роботи**

**Завдання 6.1.** Користуючись літературною та іншою інформацією підготуйте звіт за однією з тем.

1. Досвід впровадження енергоефективних технологій в світі. Енергетичні, екологічні, економічні аспекти.
2. Досвід використання консалтингових схем в світі для підвищення ефективності енергетики.
3. Сучасний енергетичний аудит. Вимоги, витрати, результати.
4. Енергозбереження в Україні. Законодавча база, нормативні вимоги, стимулюючі чинники, контролюючі організації.
5. Впровадження енергозбережних заходів на промисловому підприємстві. Витрати, ефекти.
6. Напрямки енергозбереження в комунальній теплоенергетиці. Енергетична та економічна складова.
7. Сучасний стан оборотних фондів теплоенергетичних об'єктів.
8. Питомі витрати умовного палива на виробництво енергоносіїв. Сучасні досягнення в Україні та світі.

## 7 ЗАХОДИ ЗМЕНШЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

### 7.1 Техногенне навантаження на навколишнє середовище

Розвиток промисловості, енергетики, транспорту спричиняє забруднення, в першу чергу, атмосферного повітря. Під час виплавляння 1 т сталі в атмосферу викидається 40 кг пилу, 30 кг сірчистого ангідриду, 50 кг оксиду вуглецю, у процесі виробництва 1 т сірчаної кислоти 20 кг оксиду азоту, 10 кг сірчистого ангідриду, вироблення 1 кВт·год електроенергії на електростанції на твердому паливі 10 г золи, 15 г сірчистого ангідриду і 3 г оксидів азоту. Основними джерелами забруднення повітряного басейну є промислові установки (особливо чорної та кольорової металургії, хімії), теплові електростанції, транспорт, побутові та комунальні установки.

Під час спалювання твердого палива атмосфера забруднюється золою та частинками неспаленого палива, сірчанам та сірчистим ангідридом, оксидами азоту та іншими сполуками. Зола є нетоксичною речовиною, але в золі деяких видів міститься миш'як, двоокис кремнію та оксид кальцію.

Під час спалювання рідкого палива атмосфера забруднюється оксидами сірки, азоту, продуктами неповного згорання, сполуками ванадію та іншими речовинами і у разі спалювання газоподібного палива, в основному, оксидами азоту та продуктами неповного згорання.

У продуктах згорання можуть знаходитися речовини, так звані, токсогени, які отруйно діють на людей, тварин і рослинний світ як безпосередньо, так і опосередковано, поглинаючи короткохвильове сонячне випромінювання, яке відіграє важливу роль у життєдіяльності. Шкідливими речовинами, що впливають на людину є: бензопірен, оксиди азоту, оксиди сірки, оксиди вуглецю, сірководень, формальдегід та інші сполуки, які вражають перш за все органи дихання, викликаючи або посилюючи такі хвороби, як ангіна, катар верхніх дихальних шляхів, фарингіт, бронхіт, пневмонія, астма, тонзиліт, туберкульоз і рак легенів.

Природний та інші паливні гази є вибухонебезпечними та отруйними. Метан  $\text{CH}_4$  у 21 раз агресивніший, ніж продукти його згорання.

Забруднення повітря завдає серйозних збитків сільському і лісовому господарству, знижуючи їх продуктивність і врожайність, негативно впливає на тваринництво, прискорює корозію металів.

За ступенем впливу на організм людини викиди поділяють на 5 класів: 1 – надзвичайно небезпечні; 2 – високонебезпечні; 3 – помірно небезпечні; 4 – малонебезпечні; 5 – безпечні.

Критерієм санітарного оцінювання середовища є *гранично допус-*

**тимі концентрації** (ГДК) забруднювальних речовин. Це така концентрація, яка при щоденній дії протягом тривалого часу не викликає патологічних змін та захворювань. Значення граничних допустимих концентрацій основних шкідливих викидів наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Значення ГДК шкідливих речовин

| Речовина                                   | Клас небезпеки | ГДК в населених пунктах, мг/м <sup>3</sup> |                  |                |
|--|----------------|--|------------------|----------------|
|  |                | разова                                     | середньодобова   | в робочій зоні |
| Двоокис азоту NO <sub>2</sub>              | 2              | 0,085                                      | 0,085            | 5              |
| Бензопірен C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> | 1              | -  | 10 <sup>-6</sup> | 0,00015        |
| Сірководень H <sub>2</sub> S               | 2              | 0,008                                      | 0,008            | 10             |
| Сірчаний ангідрид SO <sub>3</sub>          | 2              | 0,3  | 0,1              | 1              |
| Сірчистий ангідрид SO <sub>2</sub>         | 3              | 0,5  | 0,05             | 10             |
| Окис вуглецю CO                            | 4              | 3  | 1                | 20             |
| Формальдегід HCOH                          | 2              | 0,035                                      | 0,012            | 0,5            |

Для визначення техногенного навантаження (Technogenic loading) на навколишнє середовище, що здійснюють промислові, енергетичні чи інші технології можна використовувати програмне забезпечення, яке розроблено на основі методів врахування життєвого циклу виробу чи системи. Тобто враховується техногенне навантаження, яке здійснює система, починаючи з видобування руди для виробництва матеріалів та обладнання, закінчуючи витратами пов'язаними із утилізацією елементів системи. Прикладом такого програмного забезпечення є продукт Sima Pro.

## 7.2 Методи зменшення техногенного навантаження

Проблему зменшення техногенного навантаження можна поділити на кілька напрямків. По-перше, зменшення енергоємності технологічних процесів, що дозволить зменшити викиди під час виробництва теплової та електричної енергії. По-друге, зменшення матеріалоємності технологій, що дозволить зменшити викиди в навколишнє середовище на всіх етапах від видобування руди і до утилізації залишків системи. По-третє, підвищення екологічної ефективності теплогенерувального обладнання. По-четверте, розроблення маловідходних або безвідходних технологій, що дозволить зменшити викиди, пов'язані із витратами матеріалів та енергії.

Для зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище в теплогенерувальних установках використовують такі заходи.

1. Очищення палива перед спалюванням.
2. Збагачення палива перед спалюванням.
3. Підвищення повноти та якості спалювання палива.
4. Стимування утворення шкідливих речовин при спалюванні палива.

5. Вловлювання утворених шкідливих речовин.

6. Розсіювання викидів.

Останній метод є обов'язковим, але найменш ефективним, оскільки шкідливі викиди все ж попадають в навколишнє середовище, хоча вдалині від місць сконцентрованого перебування людей. Димові труби зазвичай виконують сталевими або цегляними (див. рис. 7.1). Висота димової труби визначається в залежності від потужності джерела, атмосферних умов, фонові концентрації шкідливих речовин в цьому місці.



а)



б)

Рисунок 7.1 – Сталеві (а) та цегляні (б) димові труби

Очищення та збагачення палива є найбільш дорогими і енергоємними процесами. Очищення продуктів згорання обмежується переважно видаленням золи, оскільки видалення оксидів сірки і азоту, бензопірену тощо є, на сьогодні, технологічно складним і дорогим.

Тому максимальна увага повинна бути приділена питанням підвищення ефективності спалювання палива з паралельним стримуванням утворення шкідливих речовин.

Для двох основних шкідливих викидів з котельного обладнання – окислів вуглецю  $\text{CO}$  та азоту  $\text{NO}_x$  – існує така закономірність. Стимування утворення одного з цих викидів призводить до збільшення утворення іншого. Для зменшення кількості окислів азоту у димових газах необхідно зменшувати температуру в зоні горіння, а це призводить до погіршення горіння палива і збільшення утворення  $\text{CO}$ . І навпаки, покращення горіння палива і зменшення викидів  $\text{CO}$  призводить до підвищення температури в зоні горіння і окислення азоту із утворенням  $\text{NO}_x$ .

### 7.3 Аналіз ефективності теплоенергетичного обладнання

Існує кілька методів оцінювання ефективності теплоенергетичного обладнання і систем: ексергетичний, енергетичний, термoeкономічний, еко-

номічний або техніко-економічний та методи оцінювання життєвого циклу, наприклад, програма з використанням екологічних показників Sima Pro.

Ексергетичний метод показує ефективність системи чи обладнання відносно абсолютної енергетичної ефективності. Показниками енергетичних методів є ККД, коефіцієнт використання палива тощо. Всі такі методи не мають узагальненого характеру, оскільки не враховують матеріалоємність системи, її екологічні показники.

Найбільш узагальненим серед традиційних, на нашу думку, є техніко-економічний метод в грошових показниках. Але екологічна складова теплоенергетики врахована лише штрафами за шкідливі викиди, а ці штрафи, на нашу думку, не відповідають наслідкам, що спричиняють викиди.

На основі методів оцінювання життєвого циклу розроблений програмний продукт Sima Pro, в якому ефективність життєвого циклу об'єкту визначається в екологічних одиницях Eco-indicator point (Pt), які обчислюються шляхом розподілу загального навантаження на навколишнє середовище на кількість жителів Європи.

Для порівняння вищенаведених методів проведено розрахунок ефективності пластинчастого водоводяного теплообмінника, виконаного з легованої сталі, з тепловою потужністю 1 МВт. Результати числового експерименту наведені на рис. 7.2.

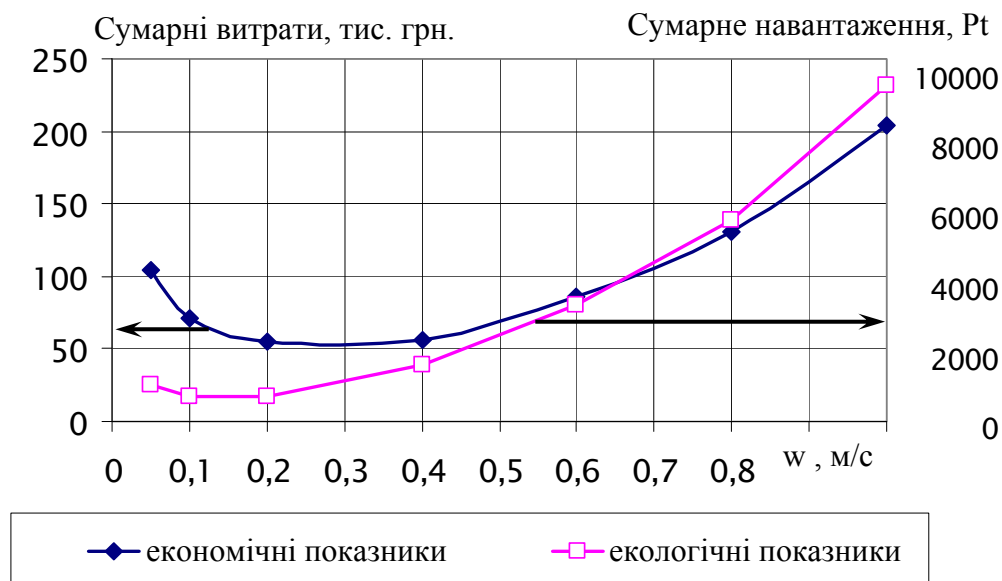


Рис. 7.2 – Порівняння результатів оптимізації швидкості води в каналах теплообмінника за економічним та екологічним показниками

До розгляду були прийняті дві найбільші складові витрат – витрати матеріалів на створення теплообмінника і витрати електроенергії на прокачування теплоносіїв через теплообмінник. Оптимізація конструкції відбувалася за рахунок зміни швидкості нагрівного теплоносія в каналах в діапазоні 0,05...1 м/с. Оптимальна швидкість відповідає мінімуму грошових витрат та мінімуму техногенного навантаження на навколишнє середовище.

Згідно з даними на рис. 7.2, оптимальна швидкість за економічним показником складає біля 0,3 м/с, а за екологічним показником – 0,15 м/с. Тобто використання техногенного навантаження як критерію оптимізації дозволяє зекономити електроенергію на перекачування теплоносіїв через теплообмінник. За весь термін експлуатації (прийнято 15 років) це дозволить зекономити біля 7000 кВт-год електроенергії. Таке енергозбереження приведе до відповідного зменшення використання палива і зменшення шкідливих викидів при його спалюванні в теплоенергетичних установках.

Таким чином, метод оцінювання життєвого циклу виробу чи системи в екологічних одиницях є, на нашу думку, більш перспективним, особливо для теплоенергетичних об'єктів, що є одними з найбільших забруднювачами навколишнього середовища. Його більш широке застосування дозволить зменшити споживання енергоносіїв і поліпшити стан навколишнього середовища.

### **Контрольні запитання**

1. Які основні шкідливі викиди утворюються в теплоенергетиці?
2. Наведіть класифікацію викидів за впливом на організм людини. Проілюструйте на прикладах.
3. Гранично допустима концентрація шкідливої речовини, наведіть різновиди ГДК.
4. Наведіть методи зменшення шкідливих викидів в теплоенергетиці. Проілюструйте прикладами.
5. Поясніть методи стримування утворення шкідливих речовин.
6. Наведіть та проаналізуйте відомі методи оцінювання ефективності обладнання та систем.
7. Чому впровадження методів оцінювання техногенного навантаження протягом життєвого циклу дозволить зменшити споживання енергоносіїв?

### **Завдання для самостійної роботи**

**Завдання 7.1.** Користуючись літературною та іншою інформацією підготуйте звіт за однією з тем.

1. Зіставлення українських та закордонних екологічних норм.
2. Сучасні методи очищення та збагачення палива.
3. Сучасні методи видалення шкідливих речовин з димових газів.
4. Традиційна та альтернативна енергетика. Екологічні проблеми.

## 8 ВИМІРЮВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ОБЛАДНАННІ

### 8.1 Теплотехнічні вимірювання

Сучасний рівень в теплоенергетиці відзначається високою інтенсивністю процесів і великою одиничною потужністю агрегатів. Це потребує достатньо точного вимірювання великої кількості параметрів для можливості якісного управління процесами.

**Вимірювання** (Measuring) – процес пошуку значення фізичної величини експериментальним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

До теплотехнічних вимірювань відносять вимірювання температури, тиску, витрати, складу, властивостей рідин та газів.

#### 8.1.1 Вимірювання температур

Одиницею термодинамічної температури  $T \in 1 \text{ K}$  (один Кельвін), одиницею температури для інших випадків  $\in 1 \text{ }^\circ\text{C}$  (один градус Цельсія). Зв'язок між ними  $1 \text{ }^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ .

Для вимірювання температури використовують явища розширення тіл при нагріванні, виникнення термоелектричної сили струму в колі з різних провідників (термопара з мілівольтметром, див. рис. 8.1б), зміна електричного опору при зміні температури металу (термометри опору), теплове випромінювання тіл (пірометри).

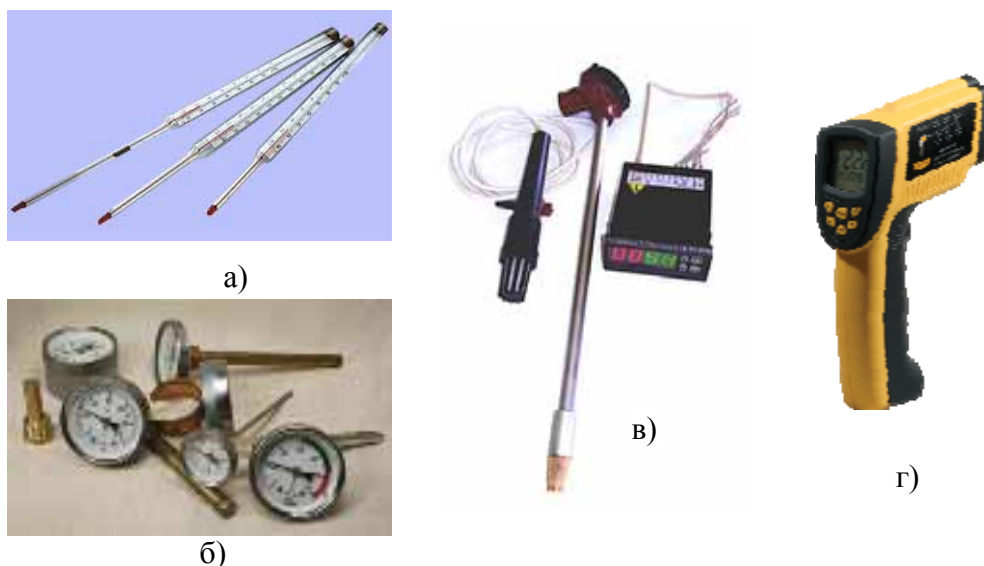


Рисунок 8.1 – Термометри: а) – рідинний; б) – біметалічний; в) – термопара з мілівольтметром; г) – пірометр

В термометрах розширення використовують ефект температурного розширення рідини (спирт, ртуть тощо) рис. 8.1, а, або металів (біметалічні



термометри) рис. 8.1, б. Діапазон використання ртутних термометрів –  $-35 \dots 600$  °С, спиртових  $-80 \dots 70$  °С.

Найбільш широко в системах автоматизації та контролю використовують термопари (рис. 8.1, в). Такі прилади дозволяють отримувати величину температури у вигляді електричного сигналу, який зручно використовувати в комп'ютеризованих системах.

Термопара складається з двох провідників, виконаних з різних металів. Якщо температура на кінцях провідників неоднакова в такому контурі виникає рушійна сила термоЕРС, яка фіксується за допомогою мілівольметра. Хромель-копелева термопара має діапазон використання  $-200 \dots 700$  °С, платинородій-платинова  $300 \dots 1600$  °С.

Пірометри (рис. 8.1, г) безконтактно вимірюють температуру тіл на основі їх теплового випромінювання. Пірометри використовуються для вимірювання температур в діапазоні  $20 \dots 6000$  °С.

### 8.1.2 Вимірювання тисків

Для вимірювання тиску середовища використовують різні манометри: барометри (для визначення атмосферного тиску); манометри надлишкового тиску або просто манометри та вакуумметри (для визначення розрідження). Манометри, які вимірюють невисокі надлишкові тиски (до 0,4 атм) називають напоромірами, вакуумметри, які вимірюють невеликі розрідження (до 0,4 атм) називають тягомірами.

За принципом вимірювання манометри поділяють на рідинні, деформаційні, вантажопоршневі тощо.

В рідинних манометрах тиск середовища врівноважується тиском, що створений стовпом рідини (рис. 8.2, а).

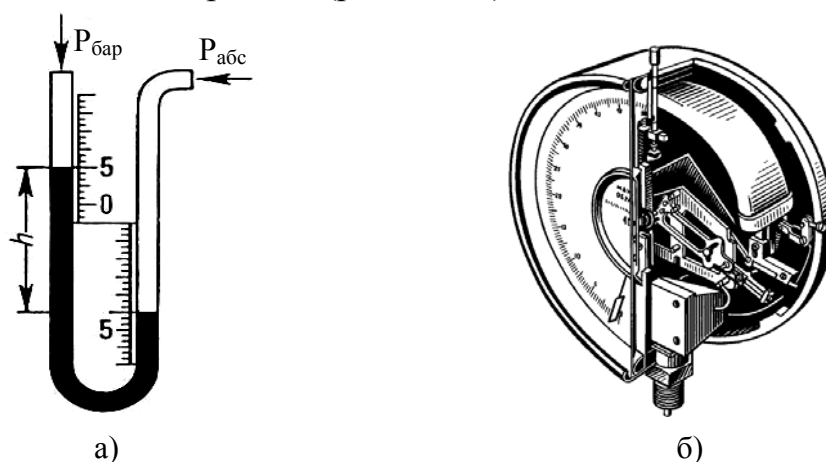


Рисунок 8.2 – Манометри: а) – рідинний; б) – деформаційний

В деформаційних манометрах (рис. 8.2, б) тиск середовища відображається за рахунок деформації пружного елемента.

### 8.1.3 Вимірювання витрати і кількості потоку

**Витрата** – кількість речовини, яка проходить через переріз за одиницю часу. Вимірювальні прилади для визначення витрат називають **витратомірами**, а для вимірювання кількості – **лічильниками**. Найбільш поширені різновиди витратомірів – тахометричні, електромагнітні, ультразвукові, із звужувальним пристроєм, із елементом обтікання.

Найбільше застосування отримали витратоміри із звужувальним пристроєм (рис. 8.3, а). Звужувальним пристроєм є зазвичай шайба, до і після якої під'єднують трубки відбору тиску, і трубки під'єднують до дифманометра, проградуєваного на витрату потоку. Недоліком такого пристрою є значні втрати тиску потоку і необхідність прямих ділянок трубопроводу для вирівнювання швидкості потоку до та після витратоміра.



Рисунок 8.3 – Витратоміри і лічильники: а) – із звужувальним пристроєм; б) – сталого перепаду тиску; в) – ультразвуковий; г) – тахометричний

**Ротаметр** (рис. 8.3, б) є пристроєм сталого перепаду тиску із елементом обтікання. Потік проходить крізь канал ротаметра із поплавком. Із збільшенням витрати поплавок піднімається в зону із більшим перерізом. За його положенням визначається витрата.

В ультразвукових витратомірах (рис. 8.3, в) вимірювання відбувається на основі визначення зміни часу або кута проходження сигналу в каналі під дією потоку речовини. Перевагою такої конструкції є можливість використання її на різних діаметрах каналів і навіть без втручання в потік.

Тахометричні лічильники (рис. 8.3, г) мають обертальний елемент (крильчатку чи турбінку), розташований в каналі. Швидкість обертання елемента перетворюють в величину витрати потоку.

### 8.1.4 Вимірювання складу та властивостей речовини

Вимірювання складу та властивостей речовин одна з важливих складових процесу управління теплоенергетичними системами. Вимірювання теплопровідності, теплоємності, хімічного складу речовини проводять у лабораторних умовах, а вологість, вміст певного компонента в речовині – постійно. Особливо це стосується вмісту шкідливих викидів у відхідних газах котлів.

Для визначення вологості газових середовищ використовують такі методи:

- психрометричний (визначення різниці між температурами "сухого" і "мокрого" термометра) (рис. 8.4, а);
- точки роси (визначення температури конденсації водяної пари на дзеркальній поверхні);
- гігрометричний (використання залежності фізичних властивостей речовин – довжини, електричного опору тощо від їх вологості) (рис. 8.4,б).



а)



б)

Рисунок 8.4 – Прилади для вимірювання вологості:  
а) – психрометр; б) – термогігрометр

Для вимірювання хімічного складу газових середовищ використовують *газоаналізатори*. За принципом вимірювання виділяють механічні, теплові, магнітні, електричні маспектрометричні газоаналізатори.

### 8.2 Моделювання та оптимізація процесів і обладнання

Технічні, екологічні, економічні і інші системи, що вивчаються сучасною наукою, більше не піддаються дослідженню (в потрібній повноті і точності) звичайними теоретичними методами, а прямий натурний експеримент над ними довгий, дорогий, часто або небезпечний, або просто неможливий.

Тому математичне (ширше - інформаційне) моделювання є невід'ємною складовою науково-технічного прогресу.

В теплоенергетиці виділяють різновиди моделювання: фізичне; аналогове; математичне.

**Фізичне моделювання** дозволяє поглибити знання про явища, їх кількісно оцінити, полегшити математичний опис об'єкту. Результати є більш наочними. Недоліком фізичного моделювання є необхідність створювати нову модель для нового процесу. Важче із моделями ланцюга процесів. Приходиться ув'язувати моделі процесів, створювати систему управління моделями, а це буває складніше, ніж створити систему управління реальним об'єктом.

Під час фізичного моделювання використовується теорія подібності. Подібні явища описуються однаковими рівняннями: рух ньютонівських рідин – рівнянням Нав'є-Стокса і нерозривності; теплові процеси – рівняннями Фур'є-Кірхгофа, Нав'є-Стокса та нерозривності і т. д.

**Аналогове моделювання** (analogus – схожий) побудоване на тому, що різні за своєю природою процеси можуть описуватись однаковими рівняннями або якісно аналогічними рівняннями.

Аналогічними рівняннями називають такі, в яких величини відрізняються, але всі оператори однакові і розставлені в однаковому порядку. Величини в аналогічних рівняннях називають аналогами. Метод вивчення процесів за допомогою аналогів називають аналоговим моделюванням.

Якщо порівняти теплові, гідравлічні і електричні процеси, то можна виявити такі аналогії: температура – гідравлічний напір – електрична напруга; термічний опір – гідравлічний опір – електричний опір; теплоємність – поперечний переріз посудини – ємність конденсатора. Таким чином, за допомогою, наприклад, електричних схем можна моделювати гідравлічні системи.

Виходить, що процес моделюється «без математики», але математична аналогія вже наперед доведена.

**Математичне моделювання** – дослідження технологічного або іншого процесу із використанням сукупності математичних співвідношень (рівностей, нерівностей, логічних умов тощо), що описують процес.

**Математична модель** – це формальна система, що є сукупністю математичних виразів, що визначають кінцеві характеристики (параметри стану, показники ефективності) процесу в залежності від початкового стану, зміни зовнішніх умов та часу.

**Оптимізація** системи – це процес знаходження таких параметрів системи, при яких вона має максимальну ефективність. Найважливішим етапом постановки задачі оптимізації є вибір критерію оптимізації, тобто показника ефективності. В наш час задачі оптимізації вирішують за допомогою багатокритеріальних підходів або з використанням узагальненого критерію.

Відомим і найбільш уживаним критерієм ефективності системи в наш час є техніко-економічний показник – зведені витрати. На жаль цей показник не повною мірою враховує екологічні збитки від діяльності, наслідки можливих аварій і катастроф тощо.

Використання багатокритеріальних методів потребує, в більшості випадків, експертного оцінювання для виявлення коефіцієнтів впливу окремих критеріїв на ефективність системи в цілому.

### **8.3 Автоматизація технологічних процесів**

Теплоенергетичні об'єкти на сьогоднішній день мають високий ступінь автоматизації. В іншому випадку неможливо досягти високого ступеня ефективності і безпеки роботи. Сучасні водогрійні котельні проектується з таким рівнем автоматики, який дозволяє обходитись без обслуговуючого персоналу до 72 год.

Автоматизовані системи керування технологічним процесом (АСК ТП) виконують такі функції:

- контроль за основними параметрами роботи систем і у разі відхилення їх від налаштованих інтервалів – миттєве інформування обслуговуючого персоналу;
- регулювання показників системи в залежності від зміни зовнішніх факторів;
- вимірювання та реєстрування параметрів за викликом оператора;
- реєстрація показників роботи обладнання;
- видача рекомендацій оператору щодо керування;
- обчислення заданих комплексних показників, що не піддаються безпосередньому вимірюванню;
- визначення оптимального режиму роботи обладнання;
- стабілізація показників технологічного процесу на постійному визначеному рівні;
- виявлення та сигналізація про настання загрозливих або аварійних ситуацій;
- захист обладнання від аварій;
- керування пусками та зупинками обладнання.

Склад будь-якої АСК ТП повинен включати організаційне, технологічне, математичне, програмне забезпечення, а також оперативний персонал.

У безпосередній близькості від обладнання розміщують щити керування з регуляторами, вторинними показувальними та самописними приладами, вузлами локальної автоматики.

Оператор, що керує технологічним процесом постійно знаходиться на центральному пульті управління, обладнаному щитами, пультами, елек-

тронною реєструвальною апаратурою, системами інтелектуальної підтримки прийняття рішення.

На пульт виводяться дані систем керування, сигнальні табло, задатчики, блоки керування регуляторами тощо.

В теплоенергетиці ЕОМ використовуються на всіх стадіях – під час досліджень, проектування і експлуатації об'єктів. Сучасна ЕОМ (комп'ютер) – це комплекс технічних засобів, призначених для автоматичного оброблення інформації під час розв'язання обчислювальних та інформаційних завдань. ЕОМ складається з основного та периферійного обладнання:

- процесора (пристрій управління та арифметико-логічний пристрій);
- пристрій для зберігання команд і даних – оперативна пам'ять для забезпечення оброблення інформації;
- накопичувачі та пристрої зчитування та запису на зовнішні носії – жорсткий диск для зберігання інформації – вінчестер, flash-пам'ять, диск-вод, CD- або DVD-ROM, принтер, сканер);
- пристрої для діалогу з користувачем – клавіатура, миша, монітор, акустичні системи, відео- та аудіокарта;
- комунікаційні пристрої – мережеві карти, модеми тощо.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке вимірювання? Які параметри вимірюють в теплоенергетиці?
2. Наведіть методи та засоби вимірювання температур та тиску потоку.
3. Методи та засоби вимірювання витрати, кількості і складу речовин.
4. Поясніть методи моделювання теплоенергетичних об'єктів.
5. Які функції виконують системи автоматизації в теплоенергетиці?
6. Поясніть призначення та склад елементів ЕОМ.

### **Завдання для самостійної роботи**

**Завдання 8.1.** Користуючись літературною та іншою інформацією підготуйте звіт за однією з тем.

1. Точність вимірювальних пристроїв. Тарування, повірка.
2. Діагностика котла з використанням сучасних газоаналізаторів.
3. Сучасні системи автоматичного управління в теплоенергетиці.
4. Комп'ютеризовані системи диспетчеризації об'єктів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Іванов А. Й. Промислова теплоенергетика (вступ до спеціальності) : навч. посіб. / А. Й. Іванов, Д. М. Пархоменко, Ю. Л. Курбатов. – К. : НМК ВО, 1992. – 228 с.
2. Чепурний М. М. Енергозбережні технології в теплоенергетиці : навч. посіб. / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 115 с.
3. Степанов Д. В. Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності : моногр. / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця : Універсум – Вінниця, 2011. – 152 с.
4. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки : підруч. / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : Поділля – 2000, 2004. – 358 с.
5. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : моногр. / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця : – Універсум – Вінниця. – 2004. – 132 с.
6. Ткаченко С. Й. Розрахунки теплових схем і основи проектування джерел теплопостачання : навч. посіб. / С. Й. Ткаченко, М. М. Чепурний, Д. В. Степанов. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 137 с.
7. Чепурний М. М. Розрахунки тепломасообмінних апаратів : навч. посіб. / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 129 с.
8. Степанов Д. В. Холодильна техніка та технологія : навч. посіб. / Д. В. Степанов, Н. Д. Степанова. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 95 с.
9. Ткаченко С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання : моногр. / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця : Універсум – Вінниця, 2008. – 150 с.
10. Степанова Н. Д. Теплові мережі : навч. посіб. / Н. Д. Степанова, Д. В. Степанов. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 134 с.

# Додаток А Діаграми

h-s діаграма водяної пари

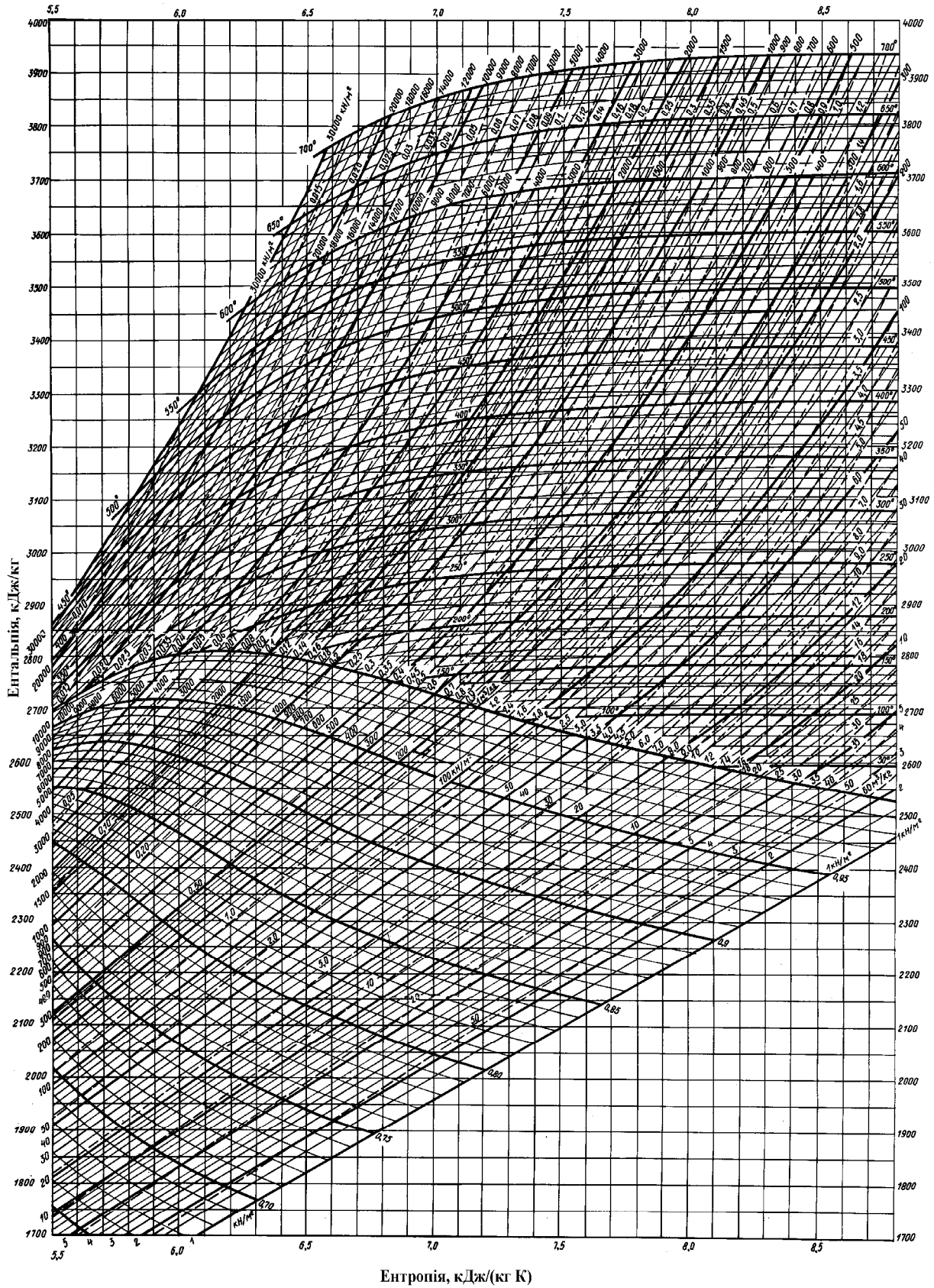


Рисунок А.1 – h-s діаграма водяної пари



h-d - діаграма вологого повітря

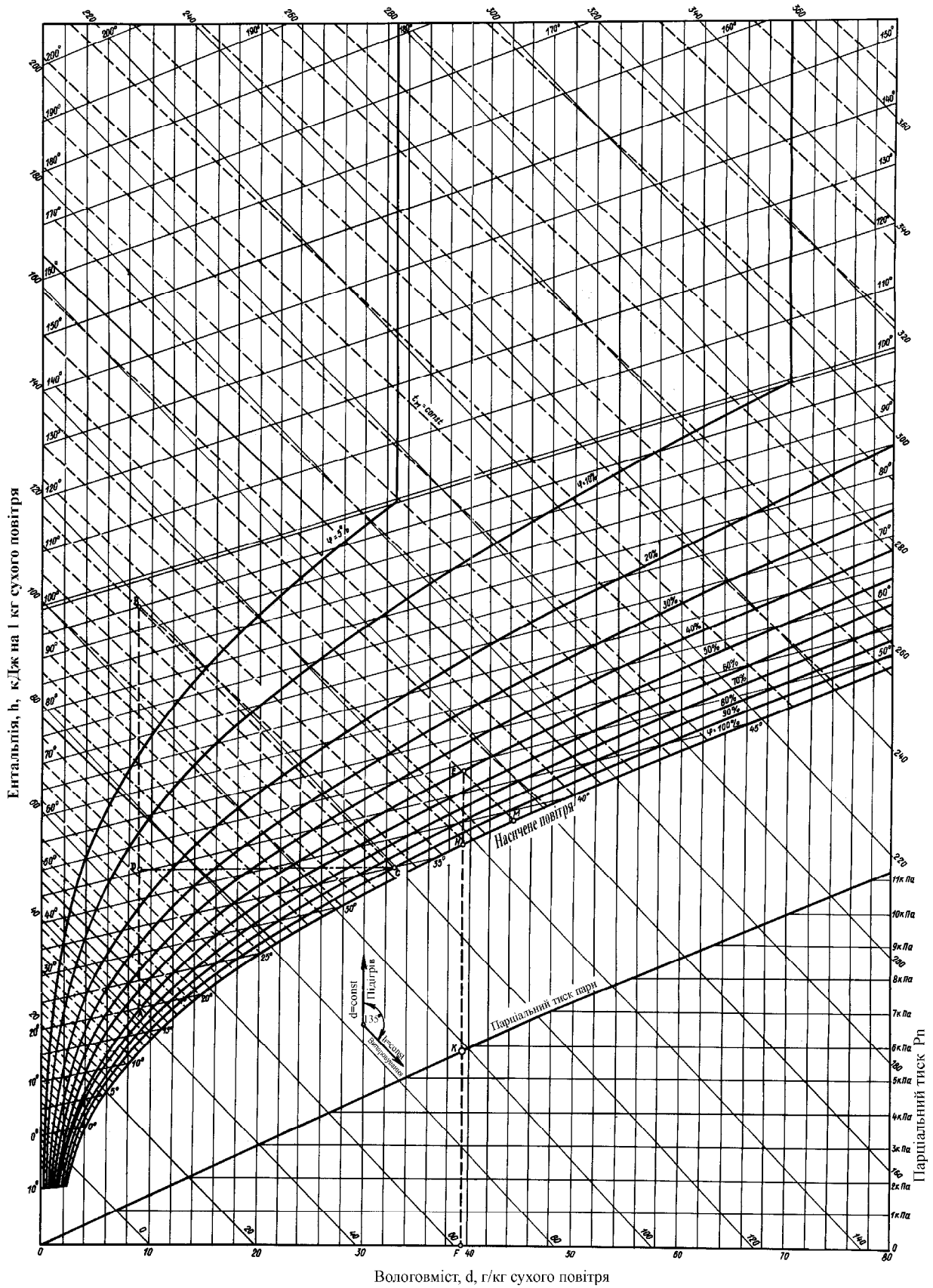


Рисунок А.2 – h-d діаграма вологого повітря

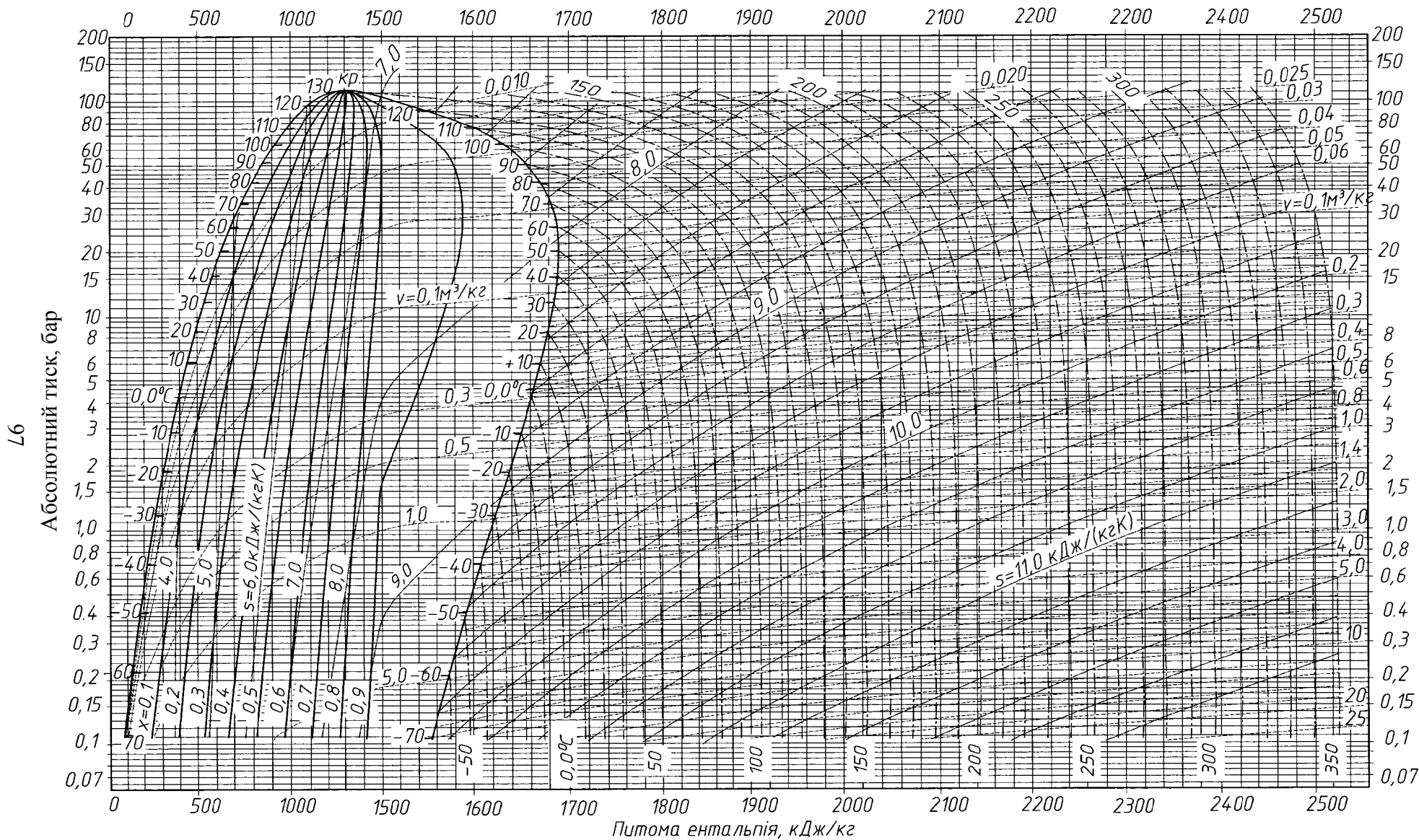


Рисунок А.3 – p-h діаграма аміаку NH<sub>3</sub> (холодоагент R717)

## ГЛОСАРІЙ

|   |
|---|
| Бакалаврська дипломна робота – Bachelor diploma work                        |
| Біомаса – Biomass   |
| Вентилятор – Ventilator   |
| Випарна установка – Evaporate unit  |
| Високотемпературна установка – High temperature unit                        |
| Вугілля – Coal  |
| Газогенерація – Gasgeneration   |
| Гідравлічна шорсткість – Hydraulic roughness                                |
| Гідрогазодинаміка – Hydrogasdynamics  |
| Горіння – Burning   |
| Горизонтальна площина – Horizontal plane                                    |
| Густина – Density   |
| Джерела тепlopостачання – Sources of thermal supply                         |
| Дифузія – Diffusion   |
| Енергозбереження – Energy saving  |
| Звалищний газ – Dumpgas   |
| Компресор – compressor  |
| Конвекція – Convection  |
| Котельний агрегат – Boiling aggregate                                       |
| Котельня – Boiler room  |
| Крапельна рідина – Drop liquid  |
| Курсові проекти і роботи – Course projects and works                        |
| Лабораторні роботи – Laboratory works                                       |
| Лекція – Lecture  |
| Мазут – Oil Fuel  |
| Масообмін – Mass exchange   |
| Насос – Pump  |
| Опори – Resistances   |
| Освітньо-кваліфікаційна характеристика – Educational qualifying description |
| Паливо – Fuel   |
| Парогенератор – Steam boiler  |
| Піроліз – Pyrolysis   |

Питомий об'єм – Specific volume  
Поновлювані джерела енергії – Renewable energy sources  
Практичні заняття – Practical employments  
Природний газ – Natural gas  
Ректифікаційна установка – Rectification unit  
Самостійна робота студента – Alone work of students  
Сушильна установка – Drying unit  
Температура – Temperature  
Теплове випромінювання – Thermal radiation  
Теплові мережі – Thermal networks  
Теплоенергетика – Heat Power Engineering  
Теплообмін – Heat exchange  
Теплообмінники – Heat exchangers  
Теплопередача – Heat transfer  
Теплопровідність – Heat Conductivity  
Теплопроводи – Hot-water pipes  
Теплотехніка – Heating Engineering  
Технічна термодинаміка – Technical thermodynamics  
Техногенне навантаження – Technogenic loading  
Тиск – Pressure  
Турбіна – Turbine  
Форсунки – Sprayers  
Холодильна установка – Refrigeration unit  
Шкідливі речовини – Harmful matters

*Навчальне видання*

**Степанов Дмитро Вікторович**

**Ткаченко Станіслав Йосипович**

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА**

**ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ**

Навчальний посібник

Редактор О. Скалоцька

Оригінал-макет підготовлено Степановим Д.

Підписано до друку  
Формат 29,7×42¼ . Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний . Ум. друк. арк.  
Наклад прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, к. 2201.  
Тел. (0432) 59-87-36.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-87-38.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.