

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Енергетичні системи та
енергоменеджмент»

В авторській редакції

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ КОМУНАЛЬНИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Навчально-методичні рекомендації
до практичних занять

ДНІПРО
2025

Упорядники:
В. В. Біляєва, Ю. В. Бразалук, А. Ю. Усенко, С. М. Форись

Електронний аналог
друкованого видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
144 «Теплоенергетика»

Протокол № 7 від 20.03.2025

Е 63 Енергетичний аудит комунальних та промислових підприємств :
навчально-методичні рекомендації до практичних занять / упоряд.
В. В. Біляєва, Ю. В. Бразалук, А. Ю. Усенко, С. М. Форись ; Укр.
держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 66 с.

Навчально-методичні рекомендації призначені для використання студентами спеціальності 144 «Теплоенергетика» під час практичних занять з дисциплін «Енергетичний аудит комунальних та промислових підприємств», «Основи енергетичного аудиту».

Навчально-методичні рекомендації містять основні теоретичні положення для засвоєння матеріалу, інструкції до виконання індивідуальних завдань та вимоги до аналізу результатів.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	5
1.1. Основні терміни та визначення.....	5
1.2. Рівні проведення енергоаудиту.....	7
1.3. Енергобаланси підприємств.....	13
1.4. Вторинні енергоресурси (ВЕР) як додаткове джерело енергії.....	15
1.5. Критерії енергетичної ефективності.....	18
2. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ...	19
3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРООСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК	37
4. ТЕРМОІЗОЛЯЦІЯ ТРУБОПРОВODІВ ТА ПАРOPPOBODІВ	44
5. ОЦІНКА ТЕПЛОВОГО СПOЖИBАННЯ БУДІВЕЛЬ.....	53
БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	59
ДОДАТКИ.....	60

ВСТУП

У сучасних умовах зростання цін на енергоносії, вичерпності традиційних джерел енергії та необхідності зменшення впливу на довкілля, все більшої актуальності набувають питання підвищення енергоефективності та раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів. Особливу роль у цьому процесі відіграє енергетичний аудит — систематичний підхід до аналізу та оцінювання споживання енергії з метою виявлення шляхів її збереження та оптимізації витрат.

Методичне забезпечення навчального процесу з дисциплін «Енергетичний аудит комунальних та промислових підприємств», «Основи енергетичного аудиту» є важливою складовою підготовки майбутніх фахівців зі спеціальності 144 – Теплоенергетика. Представлені навчально-методичні рекомендації розроблені з метою надати студентам необхідну теоретичну базу, сформувати практичні навички з проведення енергетичного обстеження, аналізу енергоспоживання, а також підготовки рекомендацій щодо підвищення енергоефективності.

Навчально-методичні рекомендації містять короткий огляд основних понять, термінів та визначень, що використовуються у сфері енергетичного аудиту. Особлива увага приділена практичним аспектам – наведені типові ситуації, що часто зустрічаються на підприємствах та в установах, і які потребують ретельного аналізу та впровадження енергоефективних рішень. Матеріали можуть бути використані як у процесі аудиторних занять, так і під час самостійної підготовки студентів до практичних робіт.

Навчально-методичні рекомендації призначені для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» та сприятимуть формуванню професійних компетентностей і сучасного світогляду в галузі енергозбереження та ефективного використання енергетичних ресурсів.

1. Теоретичні відомості

1.1. Основні терміни та визначення

Паливно-енергетичні ресурси (ПЕР) – сукупність усіх природних і перетворених видів палива та енергії, зокрема й води як енергоносія, що використовуються в господарській діяльності.

Енергетичний ресурс – носій енергії, енергія якого використовується або може бути використана під час здійснення господарської чи іншої діяльності, а також вид енергії (атомна, теплова, електрична, електромагнітна енергія або інший вид енергії).

Енергозбереження – реалізація організаційних, правових, технічних, технологічних, економічних та інших заходів, спрямованих на зменшення обсягу використовуваних енергетичних ресурсів при збереженні відповідного корисного ефекту від їх використання (у тому числі обсягу виробленої продукції, виконаних робіт, наданих послуг).

Потенціал енергозбереження – кількість ПЕР, яку можна заощадити в результаті реалізації технічно можливих та економічно виправданих заходів без зниження якості та обсягів вироблених продуктів і послуг. Потенціал енергозбереження охоплює ефективне використання і залучення до господарського обігу поновлюваних джерел енергії та вторинних ресурсів, за умови збереження або зниження техногенного впливу на довкілля і природне середовище [1].

Відновлювані джерела енергії – джерела енергії, що постійно відновлюються природним шляхом за рахунок фізико-хімічних процесів природного походження.

Вторинні енергетичні ресурси (ВЕР) – енергетичні ресурси, одержувані у вигляді відходів виробництва і споживання або побічних продуктів у результаті здійснення технологічного процесу або використання обладнання, функціональне призначення якого не пов'язане з виробництвом відповідного виду енергетичного ресурсу.

Енергетична ефективність – характеристики, що відображають відношення корисного ефекту від використання енергетичних ресурсів до витрат енергетичних ресурсів, здійснених з метою отримання такого ефекту, застосовно до продукції, технологічного процесу, юридичної особи, індивідуального підприємця.

Клас енергетичної ефективності – характеристика продукції, що відображає її енергетичну ефективність [1].

Характеристика енергоресурсоспоживання – фізична величина, що відображає кількість і якість спожитого енергоресурсу, яка використовується для розрахунку показників ефективності об'єкта або процесу.

Показник енергозбереження – кількісна та/або якісна характеристика проєктованих або реалізованих заходів з енергозбереження, що виражається в абсолютних або відносних характеристиках [1].

Нераціональне витрачання енергетичних ресурсів – наявність витрат паливно-енергетичних ресурсів на енергетичних і технічних установках у промисловому і комунально-побутовому секторі (у тому числі в житлових і громадських будівлях), які можуть бути знижені за умови реалізації виявлених резервів енергозбереження.

Енергетичне обстеження – збір та обробка інформації про використання енергетичних ресурсів з метою отримання достовірної інформації про обсяг використовуваних енергетичних ресурсів, про показники енергетичної ефективності, виявлення можливостей енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності з відображенням отриманих результатів в енергетичному паспорті.

Енергоаудит - обстеження енергоспоживаючих об'єктів і процесів із розробленням відповідних рекомендацій і заходів з енергозбереження, зниження витрат у системах енергозабезпечення та споживання [1].

Збір документальної інформації – збір даних про споживача ПЕР, виробництво послуг, технологічні параметри, техніко-економічні показники,

режими експлуатації та інших даних, необхідних для розрахунку показників енергетичної ефективності об'єкта.

Інструментальне обстеження – вимірювання та реєстрація характеристик режимів роботи енергетичних установок, енергоресурсоспоживання за допомогою стаціонарних або переносних вимірювальних і реєстраційних приладів.

Аналіз інформації – визначення показників енергетичної ефективності та резервів енергозбереження на основі зібраної документальної інформації та інструментальних даних обстеження.

Розроблення рекомендацій і програм з енергозбереження – визначення організаційних, технічних і технологічних пропозицій з енергозбереження, спрямованих на підвищення енергоефективності об'єкта енергоаудиту, з обов'язковою оцінкою економічної та технічної можливостей їх реалізації, прогнозованого техніко-економічного ефекту.

1.2. Рівні проведення енергоаудиту

Енергоаудит – добровільний захід, ініціатором якого виступає керівництво або власники підприємства [1].

Енергоаудит проводять за універсальним алгоритмом, який не залежить від специфіки роботи підприємства, що скорочує загальні витрати на його проведення, даючи змогу ефективно під'єднувати інших енергоаудиторів на певних (уніфікованих) етапах робіт.

Метою енергоаудиту є всебічний аналіз ефективності генерування, транспорту, використання і утворення енергоресурсів підприємствами і системами енергопостачання, витрат на їх придбання, а також резервів економії ПЕР і розроблення рекомендацій щодо підвищення ефективності їх використання. Глибина вирішення поставлених завдань і обсяг необхідної для цього інформації залежать від рівня проведеного енергоаудиту [1].

Експрес-аудит. Метою експрес-аудиту є отримання вихідної статистичної інформації про підприємство, його технології, енергетичне господарство в обсязі, який дає змогу зробити доказовий висновок про наявність і величину потенціалу

енергозбереження, про можливості зниження фінансових витрат на енергоносії та намітити основні шляхи енергозбереження на підприємстві [1].

На ознайомчому етапі обстеження енергоаудитори знайомляться:

- зі структурою і генеральним планом підприємства;
- з принциповими схемами енергопостачання;
- з технологіями;
- із системами обліку енергоресурсів;
- з проблемами, що ускладнюють нормальну роботу підприємства (дефіцит потужності тощо).

Далі проводиться візуальний огляд стану систем енергопостачання та технологічних установок.

Детальніша інформація збирається про:

- номенклатуру і помісячні обсяги продукції, що випускається і прогнозованої до випуску продукції;
- тарифи і фінансові платежі за енергоресурси та їх динаміці;
- договори з енергопостачальними організаціями;
- щомісячне споживання енергоресурсів по підприємству загалом і по окремих виробництвах (цехах);
- власні джерела енергії, системи паро- і теплопостачання, збору і повернення конденсату та основне енергоспоживаюче обладнання;
- установки із трансформації енергоресурсів;
- системи обліку та контролю споживання ПЕР;
- системи повітро-, холодо-, водопостачання та водовідведення;
- стан будівель і споруд (для підприємств ЖКГ - житлового фонду).

Як правило, збір статистичних даних проводять за останні 1,5 – 2 роки. Якщо частка фінансових витрат на енергоресурси не перевищує 10 %, то експрес-аналіз енергоспоживання достатній для подальшої роботи. У разі збільшення частки витрат на енергоресурси до 15 % стає доцільним проведення поглибленого енергоаудиту, оскільки зроблені енергоаудиторами пропозиції дають змогу

підприємству знизити витрати на енергоресурси на 3 – 4 %. Подальше збільшення витрат до 20 % і більше вимагає проведення термінового енергоаудиту, оскільки передбачувана фінансова вигода від його результатів очевидна.

Інформація, отримана з документів, є вихідним матеріалом для аналізу ефективності енерговикористання. За окремими видами енергоресурсів і об'єктами обчислюється фактичне питоме енергоспоживання, що є відношенням енергоспоживання до продукції, що випускається. При порівнянні фактичного питомого енергоспоживання з базовими показниками робиться висновок про ефективність використання енергії за кожним об'єктом. Базові показники можуть ґрунтуватися на галузевих нормах, попередніх показниках цього підприємства або споріднених підприємств (у тому числі й зарубіжних), фізичному моделюванні процесів або експертних оцінках [1].

Результати експрес-аудиту дають змогу підприємству отримати наочну фактичну картину енергозабезпечення виробництва, експертну оцінку потенціалу енергозбереження та основні напрямки енергозбереження.

Поглиблений енергоаудит. Енергоаудит цього рівня передбачає точнішу оцінку потенціалу енергозбереження, розроблення не тільки напрямів, а й технічних рішень щодо раціонального енерговикористання та енергозбереження, створення передумов для підготовки комплексного довготривалого плану реалізації енергозберігаючих заходів на підприємстві. Як вихідна інформація, яку зобов'язані надати співробітники підприємства, слугують більш розширені (порівняно з експрес-аудитом) відомості [1]:

- про випуск основної та додаткової продукції підприємством;
- про наявність енергетичного паспорта та організаційно-технічні заходи щодо економії енергоресурсів;
- про енергоспоживання, тарифи і фінансові витрати на енергоресурси (електроенергія, теплоенергія, паливо, вода, стиснене повітря, холод);
- про облік споживання енергоресурсів;
- про джерела енергопостачання та параметри енергоносіїв (ГПП, ТП, ТЕЦ, котельня, компресорні та холодомісткі установки);

- про комунікації підприємства;
- про встановлену потужність електроустановок за напрямками використання;
- про технологічне теплоспоживаюче та паливоспоживаюче обладнання;
- про технологічне устаткування та про джерела ВЕР;
- про систему збору та повернення конденсату;
- про холодильне обладнання;
- про компресорне обладнання (стиснене повітря, азот);
- про підігрівачі ГВП, опалення;
- про припливно-витяжну вентиляцію;
- про системи опалення будівель, споруд, підприємств;
- про системи гарячого та холодного водопостачання, про кількості душових сіток і водорозбірних кранів;
- про систему освітлення, електроприймачів будівлі, споруди;
- про питомі витрати ПЕР на продукцію, що випускається;
- про технічний стан енергетичного обладнання, рівень автоматизації роботи цього обладнання, наявність технічних паспортів, проведення балансових випробувань і контрольних замірів.

Для заповнення відсутньої інформації, яка необхідна для оцінки ефективності енерговикористання, але не може бути отримана з документів або викликає сумніви в достовірності, використовують інструментальне дослідження.

Для реалізації цілей поглибленого енергоаудиту слід дати кількісну і якісну оцінку стану фактичного енерговикористання всіх видів енергоресурсів і за допомогою розрахунків визначити розрахунково-нормативне споживання енергоресурсів. Різниця фактичного і розрахунково-нормативного споживання енергії становитиме основну величину резерву економії енергоресурсів. Використання для покриття енергетичних навантажень вторинних енергетичних ресурсів збільшить резерв економії енергії. Аналіз паливно-енергетичного балансу промислових підприємств і складання науково-обґрунтованого паливно-енергетичного балансу часто дають змогу виявити значні резерви економії енергії.

Корисну для виявлення напрямів і заходів з енергозбереження інформацію можна отримати, складаючи приватні (за окремими видами енергоресурсів) енергетичні баланси.

Уся інформація, отримана з документів або в результаті інструментального обстеження, є вихідним матеріалом для аналізу ефективності енерговикористання. Методи аналізу застосовуються до окремого об'єкта або підприємства в цілому.

Критичний аналіз відібраної на попередніх етапах проектної, статистичної, інструментальної та розрахункової інформації дає змогу запропонувати шляхи зниження витрат на енергоресурси. Проведений енергоаудит завершується, як правило, заключним документом – звітом, у якому у вступній частині містяться: загальні відомості про підприємство; сумарна витрата умовного палива, тепла та електроенергії на виробництво основних видів продукції та загалом по підприємству; види енергоносіїв, використаних на підприємстві, їхня кількість та розподіл по укрупнених групах технологічних процесів; фактичні звітні дані щодо енергокористування та випуску продукції в поточному й базовому році (за місяцями); перелік, технічні й енергоресурси, що використовуються на підприємстві.

У розрахунково-аналітичній частині звіту містяться відомості про фактичний стан енергоспоживання та критичні нотатки, що виникають у результаті зазначеного вище аналізу вихідної та розрахункової інформації, а саме: структури споживання енергоресурсів у вартісному та натуральному виразі; тенденції зміни в енергоспоживанні, пояснення до процесів зміни споживання з плином часу; енергоефективності за видами продукції з визначенням тенденцій зміни у вартісному та натуральному виразі; результати порівняльного аналізу фактичної енергоефективності роботи устаткування з проектною [1].

У заключній частині звіту має бути проведено розроблення рекомендацій з енергозбереження та розроблено енергетичний паспорт.

Під час розроблення рекомендацій необхідно: визначити технічну суть пропонованого вдосконалення та принцип отримання економії; розрахувати потенційну річну економію у фізичному та грошовому вираженні; визначити

склад обладнання, необхідного для реалізації рекомендації, його приблизну вартість, ґрунтуючись на світовій ціні аналогів, вартість доставки, встановлення та введення в експлуатацію; розглянути всі можливості зниження витрат, наприклад виготовлення або монтаж устаткування силами самого підприємства; визначити можливі побічні ефекти від упровадження рекомендацій, що впливають на реальну економічну ефективність; оцінити загальний економічний ефект пропонованої рекомендації з урахуванням усіх перерахованих вище пунктів.

Після оцінки економічної ефективності всі рекомендації класифікують за трьома категоріями: безвитратні; низьковитратні – здійснювані в порядку поточної діяльності підприємства; середньовитратні – здійснювані, як правило, за рахунок власних коштів підприємства; високовитратні – такі, що потребують додаткових інвестицій, здійснювані, як правило, із залученням позикових коштів.

Інструментальний аудит. Під інструментальним аудитом розуміють обстеження об'єкта або його частин, яке виконують кваліфіковані незалежні фахівці, за допомогою сертифікованих і повірених інструментів, що має на меті одержання достовірної інформації про споживання ресурсів, параметри стану устаткування та комунікацій об'єкта, обсяги та якість продуктів, які виробляються, ступінь використання відходів [1].

Інструментальне обстеження застосовують для заповнення відсутньої інформації, яка необхідна для оцінки ефективності енерговикористання, але не може бути отримана з документів або викликає сумніви щодо достовірності.

Завдання, які можна вирішувати за допомогою інструментального аудиту:

- визначення кількісних значень і якості використовуваних ресурсів;
- діагностика і моніторинг параметрів стану обладнання об'єкта промислового підприємства або житлово-комунального господарства;
- визначення кількісних значень і якості вироблюваних продуктів;
- оцінка кількості та ступеня утилізації відходів.

У загальному випадку виконання інструментального аудиту проводиться в кілька етапів:

- аналіз завдань обстеження;
- вибір вимірювального та іншого обладнання за функціональними можливостями, метрологічними та експлуатаційними характеристиками;
- вибір колективу фахівців (або підготовка власної бригади);
- підготовка експериментів та виконання експериментів;
- опрацювання та подання результатів.

Для проведення інструментального аудиту найзручнішими є автономні переносні прилади, що дають змогу проводити вимірювання без зупинки виробничого процесу та порушення цілісності технологічного обладнання. Нижче наводиться традиційний перелік приладів для проведення вимірювань у процесі енергоаудиту [1]:

- переносний ультразвуковий витратомір;
- ультразвуковий товщиномір;
- електронний газоаналізатор, пірометр;
- контактний термометр (бажано з функцією вимірювання вологості повітря), тепловізор, термоанемометр;
- кліщі струмовимірювальні універсальні;
- аналізатор якості електроенергії, люксметр.

1.3. Енергобаланси підприємств

Оцінку ефективності використання теплоти, яка ґрунтується на застосуванні першого початку термодинаміки і відображає кількісний бік теплових процесів, можна провести на основі енергетичного балансу.

Енергетичний баланс є важливою характеристикою стану енергетичного господарства підприємства і відображає повну кількісну відповідність між сумою отриманої енергії (прибутковою частиною), з одного боку, і сумою корисної енергії та втрат (витратною частиною), з іншого боку [4].

Прибуткова частина енергобалансу складається з енергоресурсів, що надходять на підприємство. Видаткова частина - з усіх статей витрат

енергоресурсів, у тому числі втрат під час їхнього використання, перетворення і транспортування.

Скласти енергобаланс можна для будь-якого ієрархічного рівня - планета, країна, регіон, підприємство, цех (підрозділ), установка, апарат. Складання та аналіз енергобалансів дають змогу розв'язати низку важливих для підприємства завдань: оцінку фактичного стану та ефективності енерговикористання; виявлення причин виникнення та визначення втрат енергоресурсів та енергоносіїв; виявлення й оцінку резервів економії енергоресурсів і розроблення енергоощадних заходів, спрямованих на зниження втрат та ін.

Енергетичні баланси промислових підприємств класифікуються наступним чином:

- за об'єктами енергоспоживання – енергобаланси підприємства, виробництва, цеху, дільниці, агрегату, установки тощо;
- за цільовим призначенням – енергобаланси технологічні, енергобаланси санітарно-технічних потреб (опалення, вентиляція, кондиціонування, освітлення тощо);
- за сукупністю видів енергетичних потоків – зведений енергобаланс за сумарним споживанням паливно-енергетичних ресурсів, часткові енергобаланси за окремими видами і параметрами споживаних енергоресурсів;
- за часом розроблення – звітні, планові, проектні, перспективні;
- за способом розроблення – дослідний, складений за фактичними вимірами параметрів і витрат енергетичного потоку; розрахунковий, складений на підставі розрахунку енергоспоживання виробництва, яке розглядають; дослідно-розрахунковий, складений із використанням як фактичних вимірів, так і розрахунків;
- за формою складання – синтетичний, що показує розподіл підведених енергоносіїв усередині підприємства або окремих його елементів; аналітичний, що визначає глибину і характер використання енергоносіїв, який складають із розподілом загальних витрат енергоносіїв на корисну

витрату (або умовно-корисну) і втрату енергоресурсів.

У загальному вигляді енергетичний баланс промислового підприємства можна записати таким чином [4, 8]:

$$\begin{aligned}\sum Q_{\text{ПРИБ}} &= \sum Q_{\text{ВИД}}, \\ \sum Q_{\text{ПРИБ}} &= Q_{\text{П, ТЕХ}} + Q_{\text{П}} + Q_{\text{Е}} + Q_{\text{ТЕХ}} + Q_{\text{ВЕР}}, \\ \sum Q_{\text{ВИД}} &= Q_{\text{ТЕХ}} + Q_{\text{ОВК}} + Q_{\text{ГВП}} + Q_{\text{ИН}} + Q_{\text{ВТР}} + Q_{\text{СТ}},\end{aligned}$$

де: $Q_{\text{ПРИБ}}$ – прибуткова частина енергобалансу;

$Q_{\text{ВИД}}$ – видаткова частина енергобалансу;

$Q_{\text{П, ТЕХ}}$ – паливо для технології;

$Q_{\text{П}}$ – паливо для виробництва теплової та електричної енергії, яка споживається підприємством;

$Q_{\text{Е}}$ – електроенергія;

$Q_{\text{ВЕР}}$ – вторинні енергоресурси;

$Q_{\text{ТЕХ}}$ – витрати енергії на технологію;

$Q_{\text{ОВК}}$ – витрати енергії на опалення, вентиляцію, кондиціонування;

$Q_{\text{ГВП}}$ – витрати енергії на гаряче водопостачання;

$Q_{\text{СТ}}$ – відпуск енергії на сторону;

$Q_{\text{ИН}}$ – інші витрати енергії;

$Q_{\text{ВТР}}$ – втрати енергії всіх видів під час використання, перероблення і транспортування енергоресурсів.

Наведені вище складові енергобалансу для промислового підприємства є сумами відповідних потоків енергоресурсів [4, 8].

1.4. Вторинні енергоресурси (ВЕР) як додаткове джерело енергії

Усі ВЕР поділяють на три основні групи:

Горючі (паливні) ВЕР – горючі гази плавильних печей (доменний, колошниковий шахтних печей і вагранок, конверторний тощо); горючі відходи процесів хімічної та термохімічної переробки вуглецевої або вуглеводневої

сировини; невикористовувані (непридатні для подальшої технологічної переробки); горючі відходи процесів хімічної та термохімічної переробки вуглецевої або вуглецево-водневої сировини; невикористовувані (непридатні) для подальшої технологічної переробки відходи деревообробки (тріска, тирса, стружка, обрізки тощо); тріски целюлозно-паперового виробництва. Горючі ВЕР можуть бути безпосередньо використані як котельно – пічне паливо в силових або паливо – використовувальних установках [4].

Теплові ВЕР – фізична теплота відхідних газів, основної та побічної продукції; теплота робочих тіл систем примусового охолодження технологічних агрегатів; теплота гарячої води і пари, що відпрацювали в технологічних і силових установках [4].

ВЕР надлишкового тиску – потенційна енергія газів і рідин, які залишають технологічні агрегати з надлишковим тиском, що його необхідно знижувати перед наступним етапом використання, або під час викиду їх в атмосферу.

Принципово, застосування утилізованої енергії можливе у двох напрямках:

- повернення ВЕР безпосередньо в технологічний процес, що дає змогу істотно знизити питому витрату енергії;
- використання утилізованої енергії для вироблення енергоресурсів (електроенергія, пар, гаряча вода).

Методи утилізації теплових ВЕР можна узагальнити таким чином:

1. Безпосереднє використання теплоти за відсутності будь-яких теплообмінників.
2. Рекуперація, за якої гази, що відходять, і повітря, що підігрівається, розділяються теплообмінними поверхнями.
3. Регенерація, за якої теплота газів, що відходять, акумулюється насадками в теплообмінному пристрої і потім використовується для нагрівання.
4. Утилізація відхідних газів за допомогою котлів – утилізаторів для вироблення пари на технологічні та енергетичні потреби або для вироблення гарячої води.
5. Утилізація відхідних газів за допомогою котлів – утилізаторів для

вироблення пари та електричної енергії.

6. Ступеневе використання енергії, за якого спочатку застосовують енергію з найвищими параметрами, а потім низькопотенційну – для інших процесів.

Необхідно відзначити й суттєву проблему при використанні ВЕР, а саме збалансованість графіків виходу та споживання ВЕР. Наприклад, підприємство металургійного або нафтохімічного профілю працює цілодобово протягом усього року. Відповідно вихід ВЕР відбувається також цілодобово протягом усього року. У зимовий період частина ВЕР утилізується для потреб опалення житлового масиву недалеко від підприємства. Але влітку опалювального навантаження немає. Отже, для корисного використання "опалювальних" ВЕР потрібні додаткові технічні та організаційні заходи, або доведеться скидати ВЕР у навколишнє середовище, що сприяє його тепловому забрудненню. А в разі якщо вихід ВЕР нерівномірний не тільки протягом року, а й за часом доби - то з використанням таких ВЕР можуть виникнути проблеми і під час їхньої утилізації в межах підприємства [4].

Використання ВЕР дає змогу скоротити споживання палива. У середньому, витрати на створення установок з використання ВЕР у 2-3 рази менші за витрати на видобуток еквівалентного за енергетичним потенціалом палива. Причому використання ВЕР дає змогу, як правило, економити й інші енергоресурси – сировину, воду, електроенергію, допоміжні матеріали.

Для характеристики можливого використання ВЕР застосовують такі показники:

- вихід ВЕР – кількість ВЕР, що утворюються в процесі виробництва в даному технологічному агрегаті за одиницю часу;
- виробок за рахунок ВЕР – кількість теплоти, холоду, електроенергії або механічної роботи, одержуваної за рахунок ВЕР в утилізаційній установці;
- коефіцієнт виробку за рахунок ВЕР – відношення фактичного (планованого) виробітку до економічно доцільного;
- використання ВЕР – кількість використовуваної у споживача енергії, що

- виробляється за рахунок ВЕР в утилізаційних установках, а також палива і теплоти, одержуваних безпосередньо як вторинні енергоресурси;
- економія палива за рахунок ВЕР – кількість первинного палива, що економиться за рахунок використання ВЕР;
 - коефіцієнт утилізації ВЕР – відношення фактичної (планованої) економії палива за рахунок ВЕР до економічно доцільної.

1.5. Критерії енергетичної ефективності

Для характеристики процесу виробництва, передавання і споживання енергії, оцінювання потенціалу енергозбереження різних об'єктів, обґрунтування правильності вибору енергозберігаючих заходів застосовують критерії енергетичної ефективності [8].

У загальному випадку, критерій – деяка загальна (універсальна) характеристика процесу, виражена в числовій формі. Як такий критерій зручно вибрати показник енергоефективності при споживанні енергоресурсів.

Показник енергоефективності – абсолютна або питома величина споживання чи втрати енергетичних ресурсів будь-якого призначення, встановлена державними стандартами.

На практиці використовується велика кількість різних критеріїв, але їх всі можна розбити на три основні групи: термодинамічні, натуральні, економічні. Наприклад, деякі з них: енергетичний ККД; питома витрата палива (теплової, електричної енергії) на одиницю продукції, що випускається; питома витрата палива (теплової, електричної енергії) на одиницю переробленої сировини; питома витрата палива (теплової, електричної енергії) на одиницю вартості продукції, що випускається; річна (місячна, добова тощо) витрата енергоресурсів на підприємстві, у регіоні; термін окупності; чиста сучасна вартість; коефіцієнт чистої приведеної вартості; частка витрат на енергетичні ресурси в собівартості продукції [8].

2. Підвищення енергоефективності систем стисненого повітря

Виробництво стисненого повітря – це вкрай неефективний процес. Близько 90% електроенергії, яка витрачається на виробництво стисненого повітря, втрачається у вигляді тепла. Менше 10% витраченої електроенергії перетворюється в корисну. Недосконала конструкція і витоки повітря з трубопроводів розподілення призводять до подальшого зниження ефективності ще на 30-50% [6].

Як правило, на українських підприємствах використовуються розміщені на спільній компресорній станції об'ємні поршневі компресори для централізованої подачі стисненого повітря трубопроводами в будівлі і на окремі виробничі лінії. Продуктивність компресорів контролюється, зазвичай, за допомогою підпружиненого запобіжного клапана. Це призводить до того, що споживання електроенергії компресорами не змінюється навіть тоді, коли відпадає необхідність подачі стисненого повітря на короткий або тривалий період часу. Клапан просто випускає повітря в атмосферу, у той час як компресор продовжує працювати. Існує також проблема чистоти стисненого повітря. На деяких виробництвах (наприклад, у харчовій промисловості) досить актуальною є проблема подачі стисненого повітря без домішок води й олив.

На рис. 1.1 наведена типова схема мережі стисненого повітря на підприємстві [6].

Для систем стисненого повітря, як і для інших систем, які використовують енергоносії, є характерними три підсистеми:

- виробництва стисненого повітря;
- транспортування і розподілення;
- споживання стисненого повітря.

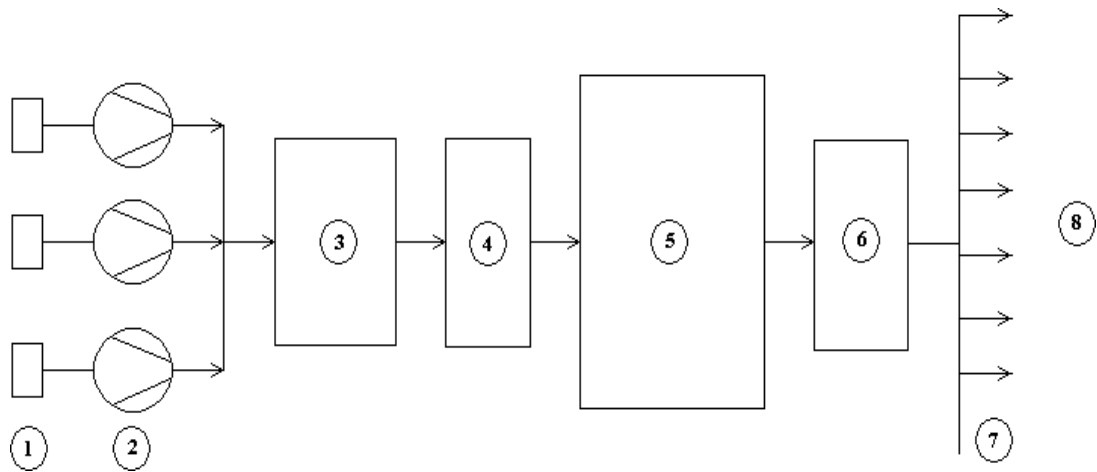


Рисунок 1.1. Схема системи стисненого повітря

1 – всмоктувальний повітряний фільтр; 2 – компресори; 3 – охолоджувач на виході; 4 – мастиловологовідділювач; 5 – повітроприймач; 6 – додаткова сушарка повітря; 7 – розподільча мережа; 8 – пневмоінструмент

Розглянемо деякі можливості енергозбереження для кожної підсистеми.

Підсистема виробництва стисненого повітря

Можливо виділити наступні напрями енергозбереження для підсистеми виробництва стисненого повітря:

1. *Керування продуктивністю компресора, якщо навантаження системи змінюється у часі.*
 2. *Запобігання неробочому ходу компресора за тривалого нульового навантаження. По можливості, компресори повинні вимикатись.*
 3. *Регулярне очищення всмоктувального фільтра (спад тиску на кожні 25 мбар через забруднений фільтр знижує ефективність роботи компресора на 2%).*
 4. *Удосконалення системи керування роботою мережі компресорів для досягнення оптимальної пріоритетності процесів вмикання і вимикання.*
 5. *Відбір (відновлення) тепла за наявності теплового навантаження.*
- Наприклад, можна опалювати виробничі приміщення за рахунок ефективного відбору теплоти від компресорів системи стисненого повітря [6].

6. *Заміна кільцевих клапанів компресорів на прямоточні.*

Раніше більшість компресорів випускалися з кільцевими або дисковими клапанами.

Ці клапани мали такі недоліки:

- прохідні перерізи були недостатніми, що викликало значні опори проходженню повітря; у результаті знижувалася подача компресора і збільшувалася питома витрата енергії;
- термін служби дискових і кільцевих клапанів не перевищує 3000 годин роботи (прямоточних – 8000 годин).

Багаторічні випробування і накопичений досвід експлуатації показали, що з установленням прямоточних клапанів замість кільцевих (пластинчастих) питома витрата електроенергії на вироблення стисненого повітря знижується в середньому на 13-15%.

Річні нераціональні витрати електроенергії компресором внаслідок використання кільцевих клапанів замість прямоточних визначається за формулою [6]:

$$\Delta W = k \cdot P_k \cdot t, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (1.1)$$

де $k = 0,13 \div 0,15$ – коефіцієнт зниження витрати електроенергії;

P_k – потужність, яку споживає компресор з мережі, кВт:

$$P_k = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{1000}, \quad (1.2)$$

де U – напруга мережі, В;

I – фактичний струм електродвигуна компресора, А;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності електродвигуна компресора;

t – тривалість роботи компресора за рік, год.

7. *Усунення витоків стисненого повітря через нещільності елементів системи транспортування повітря та деталей компресора.*

У компресорній машині між деталями і вузлами існують зазори та нещільності, через які стиснене повітря може перетікати з області високого тиску в область з меншим тиском. Ці нещільності – наслідок неякісного виготовлення, монтажу, зношеності деталей і несвоєчасного ремонту компресора.

В поршневому компресорі витокам стисненого повітря сприяють:

- нещільності всмоктувальних і нагнітальних клапанів, спричинені низькою якістю пластин, утворенням твердого нагару, що заважає клапанові щільно закриватися;
- нещільності поршнів у циліндрі, що спричиняє перетоки повітря;
- завищені зазори і нещільно підігнані поршневі кільця;
- нещільності поршневих клапанів компресора;
- неправильний розподіл тисків між ступенями компресора високого тиску.

У ротаційних компресорах особливо великий вплив на зниження продуктивності спричиняє завищення поздовжніх (торцевих) зазорів і зношеність пластин. Ці причини призводять до різкого зниження продуктивності компресора, яке сягає 30% і вище.

У відцентровому компресорі перетікання повітря з області підвищеного тиску в область зниженого відбувається через завищені зазори лабіринтових ущільнень і нещільності в міжступінчатих охолоджувачах. Ці перетоки стисненого повітря можуть бути істотними, що призводить до зниження продуктивності компресора і збільшення витрат електроенергії на стиснення повітря.

8. *Зменшення втрат електроенергії заміною застарілих компресорів на сучасні.*

Річні втрати електроенергії в компресорах застарілих конструкцій, які мають однакову подачу з компресорами нової конструкції визначають за формулою [2, 3]:

$$\Delta W = P_1 \cdot P_2 \cdot t, , \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де P_1 – потужність електродвигуна компресора старої конструкції, кВт;

P_2 – потужність електродвигуна компресора нової конструкції, kW ;

t – тривалість річної роботи компресора, $год/рік$.

Підсистема транспортування і розподілення стисненого повітря

У підсистемі транспортування і розподілення перспективними напрямками енергозбереження є [6]:

1. *Вимикання окремих секцій мережі за допомогою вентилів.*

Бажано, щоб це були дистанційно керовані електромагнітами вентилі. Якщо на даний момент часу в якійсь секції не використовується жоден споживач стисненого повітря, то стики і фланці в цій секції все одно протікають. Якщо неактивну секцію вимкнути за допомогою вентиля, то зникнуть і витoki в цій секції.

2. *Поділ системи на дві або більшу кількість систем, якщо в одній і тій же системі використовуються різні рівні тиску (наприклад, зменшенням тиску на деяких компресорах до 2 бар можна скоротити витрату енергії на 15%).*

3. *Усунення витоків стисненого повітря з повітропроводів низького тиску.*

Рациональне використання стисненого повітря споживачами набуває не меншого, якщо не більшого, значення для економічної роботи компресора, ніж його номінальна продуктивність.

Багато організацій, які займаються випробуваннями і налагодженням компресорних установок, основну увагу звертають на підвищення продуктивності компресора, залишаючи осторонь питання транспортування і рационального споживання стисненого повітря. Тому дуже часто робота з налагодження компресора виявляється безрезультативною внаслідок значних втрат при споживанні і транспортуванні стисненого повітря.

Тим часом величезні резерви економії стисненого повітря й електроенергії містяться головним чином у налагодженні роботи повітряних мереж і рациональному використанні цих ресурсів.

Випробування повітряних мереж на щільність показали, що непродуктивні втрати стисненого повітря перевищують 30%.

Необхідно прагнути, щоб в умовах експлуатації повітряного господарства невиробничі втрати стисненого повітря під час його транспортування не перевищували 8 - 10% [2, 3].

Ефективним засобом боротьби з витоками повітря є систематична - не рідше 1 разу на рік - перевірка повітропроводу на щільність. Відімкнувши повітропровід від компресора, спостерігають (за показами манометра) за падінням тиску протягом визначеного проміжку часу. Знаючи об'єм відімкненого повітропроводу, визначають витік.

Найпростіше визначити витоки за допомогою чутливого повітроміра. Періодично здійснюються заміри витрати стисненого повітря цехом, групою споживачів і окремими споживачами, які приєднані до мережі, але не працюють. У цьому випадку витрата повітря характеризує стан запірних і регулюючих пристроїв, шлангів і повітропроводів.

Розглянемо способи визначення втрат стисненого повітря.

За наявності витратомірів на початку і в кінці розподільної мережі втрата повітря:

$$C = C_n - C_k ,$$

де C_n , C_k – витрата стисненого повітря протягом часу випробувань відповідно на початку і кінці ділянки, $м^3/хв$.

Втрата електроенергії визначається шляхом перемноження величини абсолютних витоків на норму витрати електроенергії для вироблення стисненого повітря.

За відсутності приладів або неможливості з їхньою допомогою встановити розмір невиробничих витрат, витоку, досить просто знаходять падіння тиску у відімкненій мережі. Під час випробувань усі пневматичні приймачі повинні бути підімкнені до мережі, але не повинні працювати, тобто випробувана ділянка повинна знаходитися в робочому стані. Для точнішого визначення витоків бажано мати якомога більший об'єм відімкненої магістралі, тобто по можливості приєднати до випробовуваної ділянки магістралі повітрозбірники, водовідділювачі, ємні ділянки трубопроводів за умови достатньої щільності

ємностей, які приєднуються. Випробування на щільність може аналогічним чином здійснюватися для повітропровідних магістралей з вимкненими споживачами.

Визначення маси повітря у вимкненій магістралі до і після випробування – це найпростіший спосіб визначення витоків. Внутрішній об'єм випробуваної магістралі попередньо визначається за кресленням або іншим способом, наприклад, заповненням водою. Різниця тисків на початку і наприкінці випробування повинна бути невеликою, щоб умови випробування наближалися до робочих [2, 3].

Маса повітря, кг, у відімкненій магістралі на початку випробування визначається як

$$m_1 = \frac{P_1 \cdot V_0}{R \cdot T_1}, \quad (1.3)$$

а наприкінці випробування:

$$m_2 = \frac{P_2 \cdot V_0}{R \cdot T_2}, \quad (1.4)$$

де P_1, P_2 – тиск повітря на початку і наприкінці випробування, Па;

T_1, T_2 – температура повітря на початку і наприкінці випробування, К;

V_0 – об'єм вимкненої магістралі, м³;

$R = 287$ Дж/(кг·град).

Витік у кг/год протягом випробування дорівнює [6]

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{V_0}{R} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right). \quad (1.5)$$

Витік вимірювався за середньої різниці робочого й атмосферного тиску:

$$\Delta P_{\text{сер}} = \frac{P_1 + P_2}{2} - P_0,$$

де P_0 – тиск навколишнього середовища, Па (кг/м²).

У реальних робочих умовах витік відбувається за різниці тисків $\Delta P = P_1 - P_0$, тому витік, приведений до дійсних робочих умов дорівнює:

$$\Delta m_0 = \frac{V_0 \cdot 60}{R \cdot \tau} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right) \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{сер}}}, \quad (1.6)$$

де τ – тривалість випробувань, хв.

Відсоток витоку визначається за формулою:

$$q = \frac{\Delta m_0}{\rho_0 \cdot V} \cdot 100\%, \quad (1.7)$$

де ρ_0 – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$;

V – годинна витрата повітря в магістралі підімкненими споживачами, $\text{м}^3/\text{год}$.

4. *Зменшення витоків стисненого повітря через нещільності в арматурі і шлангах.*

Витоки стисненого повітря відбуваються головним чином у триходових кранах і через отвори в шлангах та залежать від тиску в мережі і діаметра отвору.

Втрати електроенергії на витоки стисненого повітря орієнтовно визначаються виразом [6]:

$$\Delta W = \alpha \cdot n \cdot w \cdot t, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (1.8)$$

де α – коефіцієнт витрати повітря через нещільності арматури і шлангів, $\text{м}^3/\text{хв}$;

n – кількість точок, де потрібно усунути витоки стисненого повітря;

w – питома витрата електроенергії на виробництво 1 м^3 стисненого повітря, $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$;

t – тривалість знаходження повітропроводу під тиском, хв.

5. *Зменшення витоків стисненого повітря з повітропроводів високого тиску.*

Для визначення витоків стисненого повітря з повітропроводів високого тиску необхідно наповнити повітряну мережу стисненим повітрям, виміряти його температуру, робочий тиск, зупинити компресор і привести його у теплову рівновагу. Для цього повітряна мережа знаходиться під тиском протягом 2 годин, після чого здійснюються заміри [2, 3].

Значення відносного витоку визначається за формулою:

$$Y = 100 \cdot \left(1 - \frac{P_k \cdot (t_n + 273)}{P_n \cdot (t_k + 273)} \right)$$

де P_n – тиск у трубопроводі на початку дослідів, МПа;

P_k – тиск повітря в трубопроводі наприкінці дослідів, МПа;

t_n – температура стисненого повітря на початку дослідів, $^{\circ}\text{C}$;

t_k – температура стисненого повітря наприкінці дослідів, $^{\circ}\text{C}$.

Труднощі визначення початкової і кінцевої температури стисненого повітря в трубопроводі знижують точність отриманих результатів, але вони в практичних умовах достатньо характеризують стан повітряної мережі.

Щільними вважаються трубопроводи, якщо значення витоку в них не перевищує 5%.

Підсистема споживання стисненого повітря

На багатьох підприємствах у зимовий час замість опалення продувних ліній повітрозбірників і мастиловологовідділювачів на них залишають не повністю закритими спускні крани, через які стиснене повітря безперервно випускається в атмосферу, запобігаючи їх замерзанню [2, 3].

З метою осушення стисненого повітря від вологи в цехах, що споживають стиснене повітря, також часто залишають відкритими продувні вентиля від місцевих мастиловологовідділювачів. Так, наприклад, втрати стисненого повітря через продувки на деяких підприємствах перевищують 10%.

На багатьох підприємствах спускання конденсату з мастиловологовідділювачів здійснюється вручну, відкриванням вентиля замість застосування автоматичних конденсатовідвідників, які значно скорочують непродуктивні втрати стисненого повітря.

Отже, перелічимо деякі можливості енергозбереження для підсистеми споживання стисненого повітря:

1. Вимкнення невикористовуваного пневмоінструменту.

Зниження навантаження легко підрахувати, знаючи потужність, тривалість роботи і кількість устаткування, яке вимикається.

2. *Заміна стисненого повітря іншими енергоносіями.*

Застосування стисненого повітря для роботи приводів різних механізмів зазвичай супроводжується втратами його через виробку ущільнювальних манжет і запірних клапанів. Крім того, влітку волога в стисненому повітрі викликає корозію пневматичних пристроїв, що сприяє збільшенню витоків.

Коефіцієнт корисної дії ручного пневмоінструменту дуже низький, тому доцільно замінити його електроінструментом. У середньому економія електроенергії в цьому випадку складає 7..10%.

Якщо за умовами виробництва є доцільною заміна стисненого повітря вентиляторним дуттям, отримується значний економічний ефект.

Річна економія електроенергії:

$$\Delta W = (W_K - W_B) \cdot Q, \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де W_K – питома витрата електроенергії на вироблення стисненого повітря, $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$;

$W_B = (60 \cdot P) / G$ – питома витрата електроенергії на вироблення вентиляторного повітря, $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$;

P – потужність електродвигуна, кВт ;

G – продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{хв}$;

Q – річний виробіток стисненого повітря, м^3 .

3. *Вибір оптимального робочого тиску стисненого повітря.*

Нерідко прямі втрати стисненого повітря (витоки в мережах, невиробничі витрати, невпорядкованість повітряного господарства і незадовільна його експлуатація) сягають 20... 25% і в окремих випадках складають половину вироблення стисненого повітря на підприємстві. Споживання стисненого повітря під тиском вищим від необхідного призводить до непродуктивної витрати електроенергії на його вироблення. Зниження тиску в споживачів може бути здійснене застосуванням редукторів, інжекторів, дроселів і регуляторів тиску [6].

Річні втрати електричної енергії внаслідок використання стисненого повітря з тиском вищим від номінального визначають за формулою (див. Додаток 1):

$$\Delta W = \frac{0.9 \cdot (L_1 - L_2) \cdot Q \cdot t}{\eta_c \cdot \eta_e \cdot \eta_{np} \cdot \eta_m \cdot \eta_i} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де L_1, L_2 – робота стиснення 1 м^3 свіжого повітря в залежності від тиску, визначається за характеристикою компресора, $\text{кВт} \cdot \text{м}^3$;

Q – подача компресора, $\text{м}^3/\text{хв}$;

t – тривалість роботи компресора за рік, год ;

$\eta_c, \eta_e, \eta_{np}$ – ККД електричної мережі, електродвигуна, передачі (0,8...0,99);

η_m – механічний ККД компресора (0,85...0,95);

η_i – індикаторний ККД [2, 3].

Кінцевий тиск стисненого повітря значною мірою впливає на питому витрату електроенергії. Наприклад, зростання тиску на 0,98 МПа збільшує витрату електроенергії на 6...7%. Крім того необхідно врахувати, що з підвищенням тиску зростають втрати стисненого повітря в пневматичних двигунах і повітропроводах.

Значну економію електроенергії, яка йде на виробництво стисненого повітря, дає застосування повітря зниженого тиску для обдування у ливарному виробництві, у дрібних піскоструминних апаратах тощо.

Застосовуючи з цією метою повітря тиском 0,294 МПа замість звичайних 0,588 МПа, можна знизити витрату електроенергії на 30%. Якщо на підприємствах є лише одна система стисненого повітря, є доцільним застосування редукування тиску для окремих цехів, які мають можливість працювати на зниженому тиску [2, 3].

Цей метод менш ефективний ніж система двох тисків, оскільки тиск повітря доводиться збільшувати до високого рівня, а потім редукувати його, але все-таки це дає економію.

4. Підігрівання стисненого повітря перед пневмоприймачами.

Підігрівання повітря, яке надходить до споживачів – ефективний засіб зменшення його витрати за рахунок збільшення питомого об'єму і зниження масової витрати обернено пропорційно температурі підігрівання.

Значення економії електроенергії у цьому випадку визначається виразом:

$$\Delta W = 0,22 \cdot G \cdot \Delta t \cdot \omega \cdot \tau, \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де G – витрата стисненого повітря, $\text{м}^3/\text{хв}$;

Δt – величина підігріву повітря, $^{\circ}\text{C}$;

ω – питома витрата електроенергії на виробництво стисненого повітря, $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$;

τ – тривалість роботи компресійної установки за рік, год .

З нагріванням повітря поліпшується робота піскоструминних апаратів, що запобігає забиванню сопел і зменшує простої.

Можливе використання підігрітого повітря і для ручних пневматичних інструментів, але з температурою 90 – 100 $^{\circ}\text{C}$, що зменшує витрату повітря на 10% і збільшує працездатність, особливо в зимовий час.

Для підігрівання повітря можуть використовуватися рекуператори, встановлювані в борови нагрівальних печей, а за їх відсутності рекуперативні труби можна розташовувати під подом печі або безпосередньо над нею в спеціальній повітропідігрівній камері.

Велика кількість стисненого повітря споживається в ковальських молотах. Втрати стисненого повітря в повітряних ковальських молотах часто перевищують 40% загальної витрати. Ці втрати викликані збільшеними зазорами між циліндром і поршневыми кільцями внаслідок їх швидкої зношуваності і частій поломки; збільшеними зазорами між золотником і втулкою; нещільностями в сальниках; неправильним встановленням золотника і нещільністю в дроселі; нещільностями запірних пристроїв керування в молотах, що не забезпечує відмикання стисненого повітря на час перерви в роботі молота [6].

Усунення витоків стисненого повітря в розподільних золотниках повинне дати помітний ефект у зменшенні витрати стисненого повітря в ковальських цехах.

5. Використання нових систем стисненого повітря.

У випадку, якщо підприємство вирішує придбати або установити нову систему стисненого повітря необхідно звернути увагу на такі важливі моменти:

- необхідно запобігти збільшенню тиску в системі понад 5 бар. Зниження тиску в системі на 1 бар дозволяє знизити витрату електроенергії на 5-10%;
- необхідно передбачити автоматичне відімкнення компресорів за нульового навантаження;
- у компресор повинно всмоктуватися повітря, охолоджене до мінімально можливої температури. Зростання температури всмоктуваного компресором повітря на кожні 4 °С збільшує витрату енергії на 1%;
- у сучасних компресорах споживання енергії на неробочому ході складає всього 30% від споживання при повному навантаженні. У типових компресорах застарілих конструкцій ця цифра сягає 90%;
- швидкість потоку у повітропроводах не повинна перевищувати 6 м/с. Швидкість потоку 9 м/с буде коштувати на 2% дорожче.

Задача 1. На виробничому підприємстві працює компресорна станція, що забезпечує технологічні лінії стисненим повітрям. В даний час використовуються кільцеві клапани, які спричиняють значні аеродинамічні втрати та витoki повітря. Планується заміна клапанів на прямоточні, що має знизити енергоспоживання та підвищити продуктивність компресора.

Розрахувати параметри системи у вихідній ситуації (з кільцевими клапанами) та у покращеній ситуації (з прямоточними клапанами), порівняти результати та визначити економію електроенергії, оцінивши фінансову вигоду модернізації.

Вхідні дані:

Напруга живлення компресора: $U=380\text{ В}$.

Струм, що споживається двигуном компресора: $I_1 = 100 \text{ A}$.

Коефіцієнт потужності: $\cos \varphi$ (див. вхідні дані до задачі 1).

Річний час роботи компресора: $t, \text{ год}$ (див. вхідні дані до задачі 1).

ККД компресора: $\eta_1 = 0.75$.

Продуктивність компресора (подача стиснутого повітря): $Q_1, \text{ м}^3/\text{год}$ (див. вхідні дані до задачі 1).

Застосування прямоточних клапанів призводить до зниження споживаного струму на $\Delta I, \%$, підвищення ККД на $\Delta \eta, \%$ та продуктивності компресора на $\Delta Q, \%$.

Порядок розрахунку.

Розраховуємо повну споживану потужність компресора за формулою (1.2):

$$P_k = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{1000}, \text{ кВт}.$$

Річне енергоспоживання компресора визначається за формулою (1.1):

$$\Delta W = k \cdot P_k \cdot t, \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де k – коефіцієнт, що враховує реальні умови експлуатації компресора. Він враховує реальні втрати та відхилення від ідеальних умов, що впливають на енергоспоживання (див. вхідні дані до задачі 1).

У загальному випадку типовими значеннями коефіцієнту k можна вважати наступні значення:

Ідеальні умови: $k \approx 1.0$ (без додаткових втрат).

- нормальні робочі умови: $k=1.05-1.15$ (врахування невеликих витоків, нагрівання, нестабільних навантажень).
- старе чи зношене обладнання: $k=1.2-1.4$ (підвищені виток повітря, механічні втрати, забруднені фільтри).

- дуже неефективна система: $k > 1.5$ (великі витоку, перегрів, невідповідність потужності компресора потребам).

Фінансові витрати на електроенергію розраховується наступним чином:

$$C = W \times T, \text{ (грн)},$$

де T – тариф на електроенергію (прийняти $T = 4,32 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$).

Розрахувати параметри роботи компресора з використанням кільцевих клапанів ($P_{k1}, \Delta W_1, C_1$) та з використанням прямоточних клапанів ($P_{k2}, \Delta W_2, C_2$).

Зниження струму, що споживається двигуном компресора, розраховується за наступною залежністю:

$$I_2 = I_1 \times (1 - \Delta I), \Delta I = 0 \dots 1.$$

Визначаємо річну економію електроенергії та фінансову економію за відповідними співвідношеннями:

$$\Delta W = \Delta W_1 - \Delta W_2,$$

$$\Delta C = C_1 - C_2.$$

ККД та продуктивність компресора після модернізації:

$$\eta_2 = \eta_1 \times (1 + \Delta \eta),$$

$$Q_2 = Q_1 \times (1 + \Delta Q),$$

де $\Delta \eta, \Delta Q = 0 \dots 1$.

На основі визначених ККД, продуктивності компресора, економії електроенергії та фінансової економії зробити висновок щодо доцільності запропонованого варіанту модернізації обладнання.

Варіанти вхідних даних до задачі 1

№	$\cos \varphi$	$t, \text{ год}$	$Q_1, \text{ м}^3/\text{год}$	k	$\Delta I, \%$	$\Delta \eta, \%$	$\Delta Q, \%$
1	0,75	2000	300	1,05	10	5	10
2		2200	320		12	6	9

3		2500	350	1,2	14	7	8
4		2800	370		16	8	7
5	0,8	3000	385	1,5	18	9	6
6		3300	400		20	10	5
7		3600	420	1,15	18	11	6
8		3900	450		16	12	7
9	0,85	4000	470	1,3	14	13	8
10		4200	500		12	14	9
11		4500	530	1,4	10	15	10
12		4800	550		11	5	5
13	0,9	5000	580	1,05	12	6	6
14		5200	600		14	7	7
15		5500	650	1,15	15	8	8
16		5700	685		17	9	9
17	0,95	6000	700	1,3	19	10	10
18		6300	750		20	11	9
19		6600	900	1,4	15	12	8
20		6800	1000		13	13	7

Задача 2. На підприємстві проводиться енергетичний аудит системи стисненого повітря. Для оцінки втрат виміряли параметри системи до і після випробування.

Вхідні дані:

Початковий тиск у магістралі: P_1 , кПа (див. вхідні дані до задачі 2).

Кінцевий тиск після випробування: P_2 , кПа (див. вхідні дані до задачі 2).

Тиск навколишнього середовища: $P_0=101,4 \text{ кПа}$.

Температура повітря до випробування: $T_1=298 \text{ К}$.

Температура повітря після випробування: $T_1=300 \text{ К}$.

Обсяг вимкненої магістралі: V_0 , м^3 (див. вхідні дані до задачі 2).

Час випробування: $\tau=10 \text{ хв}$.

Годинна витрата повітря в магістралі: $V_{\text{год}}=500 \text{ м}^3/\text{год}$.

Питоме енергоспоживання стисненого повітря: $w=0,12 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$.

Кількість точок витоку: n (див. вхідні дані до задачі 2).

Коефіцієнт витоків: $\alpha=0,5 \text{ м}^3/\text{хв}$.

Час роботи системи: $t, \text{ хв}$ (див. вхідні дані до задачі 2).

Розрахувати масу витоку повітря, витрати стисненого повітря в реальних умовах експлуатації, втрати електроенергії через витоки та відсоток витоку повітря.

Порядок розрахунку.

Розраховуємо масу повітря до та після випробування за формулами (1.3) та (1.4):

$$m_1 = \frac{P_1 \cdot V_0}{R \cdot T_1}, \quad m_2 = \frac{P_2 \cdot V_0}{R \cdot T_2}.$$

Прийняти $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$.

Визначаємо масу витоку (формула 1.5):

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad \text{або} \quad \Delta m = \frac{V_0}{R} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right)$$

Витрати стисненого повітря у реальних робочих умовах визначаються згідно виразу (1.6):

$$\Delta m_0 = \frac{V_0 \cdot 60}{R \cdot \tau} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right) \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{сер}}},$$

де

$$\Delta P_{\text{сер}} = \frac{P_1 + P_2}{2} - P_0.$$

Відсоток витоку розраховується за виразом (1.7):

$$q = \frac{\Delta m_0}{\rho_0 \cdot V} \cdot 100\%,$$

де густину повітря ρ_0 прийняти рівною $1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$;

V – годинна витрата повітря в магістралі ($V_{\text{год}}$) підімкненими споживачами, $\text{м}^3/\text{год}$.

За формулою (1.8) розраховуємо втрати електроенергії на витоки стисненого повітря:

$$\Delta W = \alpha \cdot n \cdot w \cdot t.$$

За результатами розв'язку задачі зробити висновок щодо втрати стисненого повітря та електроенергії через витоки, а також оцінити необхідність контролю стану магістралей, усунення витоків і впровадження заходів з енергозбереження для підвищення ефективності роботи системи.

Варіанти вхідних даних до задачі 2

№	$P_1, \text{кПа}$	$P_2, \text{кПа}$	$V_0, \text{м}^3$	n	$t, \text{хв}$
1	500	455	3	5	600
2			4	6	700
3		470	5	7	800
4			6	8	900
5	550	500	7	9	1000
6			8	10	1100
7		515	9	11	1200
8			10	12	1300
9	600	545	9	13	1400
10			8	14	1500
11			7	15	1600
12		560	6	16	1700
13			5	17	1800
14	650	610	4	18	1500
15			3	19	1400
16		620	10	20	1600
17			9	19	1200
18	700	660	8	18	1100
19			7	17	1000
20		670	6	16	900

3. Оцінка ефективності електроосвітлювальних установок

Впровадження нових прогресивних джерел світла, застосування світильників з високим ККД, впровадження нових конструкцій відбиваючої арматури і раціональних схем освітлення дозволяють у багатьох випадках різко підвищити ефективність електроосвітлювальних установок, збільшити освітленість робочих місць, досягти економії електроенергії [4].

На даний час значного поширення набули газорозрядні лампи, які економніші ніж лампи розжарення (рис.2.1).



Рисунок 2.1. Види освітлення

Світлова віддача вітчизняних люмінесцентних ламп лежить в межах:

$$\eta_l = \Phi / P_n = 42 \dots 62 \text{ лм} / \text{Вт}, \quad (2.1)$$

і значно перевершує світлову віддачу ламп розжарення, яка становить $\eta_n = 5 \dots 20 \text{ лм} / \text{Вт}$,

де Φ – світловий потік, лм, P_n – номінальна потужність, Вт.

Світлова віддача деяких ламп за даними Асоціації інженерів - електроенергетиків США наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Світлова віддача ламп

№	Тип лампи	$\eta_l, \text{лм/Вт}$
1	Лампа розжарення	$5 \div 20$
2	Вольфрамowo-галоїдна лампа	$15 \div 25$
3	Галогенна інфрачервона відбиваюча лампа	$20 \div 30$
4	Ртутна лампа	$25 \div 55$
5	Компактна люмінесцентна лампа (5-26 Вт)	$20 \div 55$
6	Компактна люмінесцентна лампа (27-55 Вт)	$50 \div 80$
7	Люмінесцентна лампа	$65 \div 100$
8	Метало-галогенна лампа	$45 \div 100$
9	Компактна метало-галогенна лампа	$45 \div 80$
10	Натрієва лампа високого тиску	$45 \div 110$
11	Біла натрієва лампа	$37 \div 55$
12	Натрієва лампа низького тиску	$55 \div 160$

Річні втрати електроенергії від використання ламп розжарення замість люмінесцентних складають [6]:

$$\Delta W = P_p \cdot \left(1 - \frac{\eta_p}{\eta_l}\right) \cdot \tau_{oc}, \quad (2.2)$$

де P_p – сумарна потужність ламп розжарення, кВт ;

η_p, η_l – світлова віддача ламп розжарення і люмінесцентних відповідно, лм/Вт ;

τ_{oc} – число годин використання максимуму освітлювального навантаження, год .

Річне число годин використання максимуму освітлювального навантаження τ_{oc} для деяких споживачів наведене у додатку 2.

За завищеної потужності освітлювальних установок річні втрати електроенергії визначаються за виразом:

$$\Delta W = (P_{\phi} - P) \cdot \tau_{oc}, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (2.3)$$

де P_{ϕ} – фактична потужність ламп, кВт ,

P – потужність ламп, визначена проектом або необхідна за нормами освітлення, кВт .

У випадку вмикання джерел світла в денний час через порушення графіків вмикання і вимикання освітлення втрати електроенергії можна обчислити

за встановленою потужністю освітлення даного цеху або ділянки і за тривалістю увімкненого стану освітлення в денний час [6]:

$$\Delta W = P \cdot \tau, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (2.4)$$

де P – потужність усіх ламп, ввімкнених у денний час, кВт ,

τ – тривалість увімкненого стану освітлення в денний час, год .

Забруднення світильників речовинами, що знаходяться в повітрі виробничих приміщень, призводить до різкого зниження їх ККД. Тому постійне підтримування світильників чистими має велике значення для раціонального використання електроенергії в електроосвітлювальних установках.

Очищення від бруду ламп і світильників у приміщеннях зі значним виділенням пилу і/або диму повинні проводитися двічі на місяць, в інших приміщеннях – один раз на три місяці, в установках зовнішнього освітлення – один раз на чотири місяці [6].

При проектуванні систем освітлення використовують різні методи розрахунку, у тому числі:

– *метод послідовних наближень* – сучасний метод проектування, досить точний, але трудомісткий;

– *метод світлового потоку* – досить простий метод, виходить із припущення однакової освітленості по всій площі, тому використовується частіше, і відповідно до цього методу кількість необхідних ламп визначається в такий спосіб:

$$N = \frac{F \cdot A}{\Phi \cdot L \cdot K_i}, \quad (2.5)$$

де F – необхідний рівень освітленості на робочому місці, лк (див. додаток 2);

A – площа приміщення, м^2 ;

Φ – світловий потік у люменах на одну лампу;

L – коефіцієнт втрати світлового потоку;

K_i – коефіцієнт використання.

У загальному випадку ефективність та раціональність застосування освітлювальних приладів оцінюється наступним чином.

1. Розраховується річне споживання електроенергії існуючою освітлювальною установкою:

$$P_{\text{заг}} = N \cdot P_{\text{св}}, \quad (2.6)$$

$$P_{\text{заг з втратами}} = P_{\text{заг}} \cdot (1 + \Delta P\%), \quad (2.7)$$

$$E_{\text{річ}} = P_{\text{заг з втратами}} \cdot t \cdot K_{\text{зав}}, \quad (2.8)$$

де $P_{\text{заг}}$ – загальна потужність освітлювальних приборів, *Вт*;

$P_{\text{св}}$ – потужність світильника, *Вт*;

$P_{\text{заг з втратами}}$ – потужність освітлювальних приборів з урахуванням втрат у пуско-регульованому колі, *Вт*;

$E_{\text{річ}}$ – річне споживання електроенергії, *кВт·год*;

t – час роботи освітлення, *год*;

$K_{\text{зав}}$ – коефіцієнт завантаження;

$\Delta P\%$ – коефіцієнт втрат у пуско-регульованому колі, %;

N – кількість світильників.

Час роботи освітлення t може збільшуватися або зменшуватися після проведення модернізації системи освітлення, а може й залишатися на постійному рівні. Це залежить від того, чи впроваджується автоматична система управління, а також від інтенсивності роботи підприємства [8].

2. Розраховується річне споживання електроенергії після модернізації системи освітлення $E1_{\text{річ}}$ за співвідношеннями (2.6) – (2.8) з урахуванням оновлених параметрів.

3. Розрахунок економії електроенергії та грошових коштів:

$$\Delta E = E_{\text{річ}} - E1_{\text{річ}}, \quad (2.9)$$

$$\Delta C = \Delta E \cdot c_{\text{ел}}, \quad (2.10)$$

де ΔE – економія електроенергії, *кВт·год*;

ΔC – економія грошових коштів, *грн*;

$C_{ел}$ – вартість електроенергії, $грн/кВт\cdot год$.

4. Розрахунок терміну окупності інвестицій:

$$C_{заг} = N \cdot c_{св}, \quad (2.11)$$

$$T = C_{заг} / \Delta C, \quad (2.12)$$

де $C_{заг}$ – загальні витрати на модернізацію системи освітлення, $грн$;

$c_{св}$ – вартість одного нового світильника, $грн$;

T – термін окупності, $років$.

В контексті освітлювальних систем можливі наступні напрями енергозбереження [4, 8]:

1. Облаштування відбивачами простих люмінесцентних світильників, які працюють понад 5000 годин на рік. Це дозволяє збільшити світловий потік до двох разів або за того ж світлового потоку вдвічі скоротити кількість ламп.

2. Заміна ефективнішими джерелами світла звичайних ламп розжарення, що працюють понад 4000 годин на рік. За однакового рівня світлового потоку лампа розжарення споживає електроенергії в 6 разів більше ніж люмінесцентна. Не рекомендується встановлювати лампи розжарення, що працюють понад 3000 годин на рік у холодильниках або інших охолоджуваних приміщеннях.

3. Застосування електронних високочастотних баластів у люмінесцентних системах освітлення, що дозволяють заощаджувати до 30% електроенергії.

4. Використання металогалогенних ламп замість люмінесцентних для систем освітлення, встановлюваних на висоті понад 5 м від рівня освітлюваної поверхні.

5. Встановлення автоматичних вимикачів освітлення, наприклад, з регулюванням у залежності від рівня природної освітленості, від кількості працівників у приміщенні, від часу доби тощо.

6. Установка малогабаритних люмінесцентних ламп у коридорах, приймальнях, на сходах.

7. Використання вимикачів для зонного керування декількома джерелами світла (наприклад, у прольотах цехів, тунелях, складах і т.ін.).

Задача 1. На підприємстві планується провести енергетичний аудит освітлювальної установки у виробничому цеху. Вихідні дані для розрахунків:

- характеристики існуючої освітлювальної установки
- кількість світильників $N = 50$ шт;
- потужність одного світильника $P_{св} = 100$ Вт;
- коефіцієнт завантаження світильників $K_{зав} = 0.8$;
- річний час роботи освітлення $t = 3000$ годин;
- вартість електроенергії $c_{ел} = 4.32$ грн/кВт·год;
- коефіцієнт втрат у пуско-регулювальному колі $\Delta P\% = 10\%$.

- характеристика модернізованої освітлювальної установки
- кількість нових світильників $N1$, шт;
- потужність нового світильника $P1_{св}$, Вт;
- коефіцієнт завантаження $K1_{зав} = 0.9$;
- річний час роботи освітлення $t1$, годин;
- вартість одного нового світильника $c_{св} = 300$ грн.

Необхідно розрахувати річне споживання електроенергії до та після модернізації, економію електроенергії та грошових коштів після заміни світильників та термін окупності інвестицій.

Порядок розрахунку.

1. На першому етапі розраховується загальна потужність, потужність з втратами та річне споживання електроенергії існуючих світильників за співвідношеннями (2.6) – (2.8).

$$P_{заг} = N \cdot P_{св},$$

$$P_{заг \text{ з втратами}} = P_{заг} \cdot (1 + \Delta P\%),$$

$$E_{річ} = P_{заг \text{ з втратами}} \cdot t \cdot K_{зав},$$

де $\Delta P\% = 0..1$.

2. Розраховуються аналогічні параметри за допомогою наведених виразів для нових світильників після заміни.

3. На наступному кроці оцінюється економія електроенергії та грошових коштів за виразами (2.9), (2.10).

$$\Delta E = E_{річ} - E1_{річ}, \quad \Delta C = \Delta E \cdot c_{ел}.$$

4. Наприкінці розраховується термін окупності інвестицій за співвідношеннями (2.11), (2.12).

$$C_{заг} = N \cdot c_{св}, \quad T = C_{заг} / \Delta C.$$

Зробити висновок щодо доцільності запропонованих заходів енергозбереження та оцінити їх ефективність в рамках енергетичного аудиту освітлювальної установки у виробничому цеху.

Варіанти вхідних даних до задачі 1

№	N1, шт	Pl _{св} , Вт	K1 _{зав}	t1, години
1	34	40	0,85	2500
2		45		
3	37	50		3000
4		55		
5	40	60		3500
6		65		
7		70		
8	43	65	0,9	4000
9		60		
10		55		
11	45	50	0,95	3750
12		45		3500
13		40		
14	42	45		0,9
15		50		
16		55		
17	39	60	0,9	2800
18		65		
19	37	70		2600
20		55		

4. Термоізоляція трубопроводів та паропроводів

Оцінка теплових втрат у трубопроводах і паропроводах є важливою складовою при проєктуванні та експлуатації систем теплопостачання. Теплові втрати, що виникають під час транспортування теплоносія, безпосередньо впливають на енергоефективність мережі, витрати палива та якість теплопостачання споживачів. Ці втрати залежать від багатьох факторів — наявності або відсутності теплоізоляції, її типу та товщини, а також способу прокладання трубопроводів [4, 5].

Особливу роль відіграє розміщення труб: вони можуть бути прокладені наземно або підземно. Підземна прокладка буває мілкою або глибокою закладання, що суттєво впливає на тепловий режим та інтенсивність тепловіддачі в навколишнє середовище. Наземні трубопроводи, як правило, більше піддаються впливу зовнішніх температур і вимагають ретельнішої оцінки втрат. У випадку відсутності теплоізоляції втрати можуть сягати значних обсягів, тоді як правильно підібрана ізоляція здатна знизити ці показники в кілька разів [5].

Таким чином, аналіз теплових втрат у різних умовах прокладання та ізоляції є ключовим етапом для прийняття техніко-економічно обґрунтованих рішень у сфері теплопостачання.

Основні розрахункові формули

Питомі теплові втрати надземних теплопроводів та однетрубного підземного теплопровода, $Вт/м$:

$$q = \frac{\tau_t - t_0}{R_{T.0}}, \quad (3.1)$$

де τ_t — температура теплоносія, $^{\circ}C$; t_0 — температура навколишнього середовища, $^{\circ}C$; $R_{T.0} = R_B + R_{mp} + R_i + R_s$ — сумарний термічний опір в інтервалах температур від τ_t до t_0 , $м^{\circ}C/Вт$; R_B, R_s — термічний опір внутрішньої та зовнішньої поверхонь, $м^{\circ}C/Вт$; R_{mp}, R_i — термічний опір стінки труби та шару ізоляції, $м^{\circ}C/Вт$.

Термічний опір циліндричної поверхні, m^0C/Bm :

$$R = \frac{1}{\pi d \alpha}, \quad (3.2)$$

де d – діаметр поверхні, m ; α – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні, $Bm/m^2 \cdot ^0C$.

Термічний опір однорідного циліндричного шару, m^0C/Bm :

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}, \quad (3.3)$$

де λ – теплопровідність матеріалу шару, $Bm/m \cdot ^0C$; d_1 , d_2 – внутрішній та зовнішній діаметри, m .

Термічний опір ґрунту, m^0C/Bm :

$$R_{ep} = \frac{1}{2\pi\lambda_{ep}} \ln \left[\frac{2h}{d} + \sqrt{\frac{4h^2}{d^2} - 1} \right], \quad (3.4a)$$

де λ_{ep} – теплопровідність ґрунту, $Bm/m \cdot ^0C$; h – глибина закладання осі теплопроводу, m ; d – діаметр теплопроводу, m (рис.3.1).

При $h/d \geq 2$:

$$R_{ep} \approx \frac{1}{2\pi\lambda_{ep}} \ln \frac{4h}{d}. \quad (3.4b)$$

Питомі теплові втрати двотрубного безканального теплопроводу [5, 7]:

$$q_1 = \frac{(\tau_1 - t_0)R_2 - (\tau_2 - t_0)R_0}{R_1R_2 - R_0^2}, \quad (3.5)$$

$$q_2 = \frac{(\tau_2 - t_0)R_1 - (\tau_1 - t_0)R_0}{R_1R_2 - R_0^2}, \quad (3.6)$$

де q_1 , q_2 – питомі теплові втрати першого та другого трубопроводу, Bm/m ; τ_1 , τ_2 – температура теплоносія у першому та другому трубопроводу, 0C ; t_0 – температура ґрунту на глибині осі теплопроводу, 0C ; R_1 , R_2 – сумарний термічний опір (ізоляції та ґрунту) першого та другого трубопроводу, m^0C/Bm ; R_0 – умовний додатковий термічний опір, який враховує взаємний вплив сусідніх труб, m^0C/Bm :

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\lambda_{cp}} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2}, \quad (3.7)$$

де b – горизонтальна відстань між осями труб, м (рис.3.1).

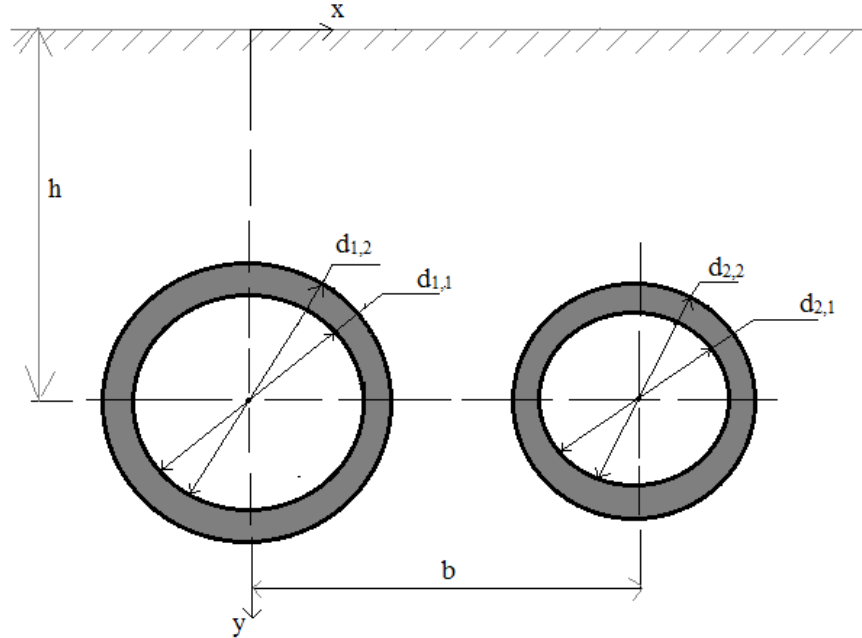


Рисунок 3.1. Двотрубний теплопровід підземної безканальної прокладки

Температура повітря в каналі багатотрубного теплопроводу з температурами теплоносія кожного теплопроводу $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ та термічними опорами ізоляційної конструкції $R_1, R_2, \dots, R_n$:

$$t_k = \frac{\tau_1 / R_1 + \tau_2 / R_2 + \dots + \tau_n / R_n + t_0 / R_{k,0}}{1 / R_1 + 1 / R_2 + \dots + 1 / R_n + 1 / R_{k,0}}, \quad (3.8)$$

де $R_{k,0} = R_{nk} + R_k + R_{cp}$ – сумарний термічний опір внутрішньої поверхні каналу, стінок каналу та ґрунту [5, 7].

Температура зовнішньої поверхні першого шару двошарової теплової ізоляції при температурі теплоносія τ та навколишнього середовища t_0 :

$$t_x = \frac{\tau / R_{i1} + t_0 / (R_{i2} + R_3)}{1 / R_{i1} + 1 / (R_{i2} + R_3)}, \quad (3.9)$$

де R_{i1} , R_{i2} – термічний опір першого та другого (якщо рахувати від поверхні труби) шарів ізоляції; R_3 – термічний опір зовнішньої поверхні ізоляції.

Температура у довільній точці ґрунту навколо одиночного безканального теплопроводу при віддаленні даної точки на величину x від вертикальної осі трубопроводу та на величину y від поверхні ґрунту [5, 7]:

$$t = t_0 + (\tau_1 - t_0) \frac{\frac{1}{2\pi\lambda_{ep}} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y+h)^2}{x^2 + (y-h)^2}}}{R_{T,0}}, \quad (3.10)$$

де $R_{T,0}$ – сумарний термічний опір теплової ізоляції і ґрунту.

Температура у довільній точці ґрунту навколо двотрубного безканального теплопроводу при віддаленні даної точки від вертикальної осі труби з більш високою температурою на величину x та на величину y від поверхні ґрунту [5, 7]:

$$t = t_0 + \frac{q_1}{2\pi\lambda_{ep}} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y+h)^2}{x^2 + (y-h)^2}} + \frac{q_2}{2\pi\lambda_{ep}} \ln \sqrt{\frac{(x-b)^2 + (y+h)^2}{(x-b)^2 + (y-h)^2}}, \quad (3.11)$$

Для підземних теплопроводів глибокого закладання $h/d \geq 2$ в формулах (3.1), (3.5), (3.6), (3.8), (3.10) та (3.11) температура t_0 приймається рівною природній температурі ґрунту на глибині закладання осі теплопроводу ($t_0 = t_{ep}$).

Для підземних теплопроводів неглибокого закладання $h/d < 2$ за температуру навколишнього середовища t_0 приймається температура зовнішнього повітря t_n . У цьому випадку у формули (3.4а), (3.7), (3.10) та (3.11) необхідно підставляти не дійсні, а приведені глибини закладання $h_n = h + h_\phi$ та $y_n = y + h_\phi$, де $h_\phi = \lambda_{ep}/\alpha_0$ – фіктивний шар ґрунту, а α_0 – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні ґрунту.

Повні теплові втрати теплопроводу довжиною l , Вт:

$$Q = ql(1 + \beta), \quad (3.12)$$

де β – коефіцієнт місцевих втрат теплоти.

Температура в кінці ділянки (за відсутності змін агрегатного стану теплоносія):

$$\tau_2 = \tau_1 - Q/Gc, \quad (3.13)$$

або

$$\tau_2 = t_0 + (\tau_1 - t_0)e^{-l(1+\beta)/RGc}, \quad (3.14)$$

τ_1, τ_2 – температури теплоносія на початку та в кінці ділянки, $^{\circ}\text{C}$; l – довжина теплопроводу, м ; c – теплоємність теплоносія, $\text{Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$.

Задача 1. Визначити теплові втрати 1 м паропроводу з зовнішнім та внутрішнім діаметром $d / d_g = 273 / 259 \text{ мм}$, прокладеного на відкритому повітрі з температурою $t_0, ^{\circ}\text{C}$. Середня швидкість руху повітря $w, \text{м/с}$. По паропроводу передається насичений пар з температурою $\tau, ^{\circ}\text{C}$. Теплова ізоляція паропроводу має товщину $\delta_i, \text{мм}$ та відповідну теплопровідність (див. додаток 3.а).

При розрахунку приймати коефіцієнт тепловіддачі від пари до стінки труби $\alpha_g = 10000 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, а коефіцієнт випромінювання поверхні ізоляції $C = 5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}^4$. Теплопровідність стінки сталевих труби $\lambda_{mp} = 58 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Для попереднього розрахунку прийняти коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ізоляції до повітря $\alpha_3 = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Порівняти розраховані теплові втрати з тепловими втратами зазначеного паропроводу у випадку відсутності теплової ізоляції.

Порядок розрахунку.

Прийнявши для попереднього розрахунку коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ізоляції до повітря, розраховуємо повний термічний опір ізольованого паропроводу:

$$R = R_g + R_{mp} + R_i + R_3 = \frac{1}{\pi d_g \alpha_g} + \frac{1}{2\pi \lambda_{ep}} \ln \frac{d}{d_g} + \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \frac{d_3}{d} + \frac{1}{\pi d_3 \alpha_3}, \text{ м}\cdot\text{C}^0/\text{Вт}. \quad (3.15)$$

Якщо термічний опір внутрішньої поверхні труби R_g та самої труби R_{mp} значно менший за повний термічний опір, то величинами R_g та R_{mp} зазвичай нехтують при розрахунках ізольованих теплопроводів.

Тому у даному випадку повний термічний опір:

$$R = R_i + R_3. \quad (3.16)$$

Наближене значення температури зовнішньої поверхні ізоляції розраховується за залежністю:

$$t_3 = \frac{\tau/R_i + t_0/R_3}{1/R_i + 1/R_3}$$

Уточнене значення коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляції до навколишнього повітря:

– коефіцієнт тепловіддачі конвекцією

$$\alpha_\kappa = 4,65 \frac{W^{0.7}}{d_3^{0.3}}, Bm / m^2 \cdot ^\circ C; \quad (3.17)$$

– коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням

$$\alpha_\epsilon = \frac{C \left[\left(\frac{t_3 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_0 + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_3 - t_0}, Bm / m^2 \cdot ^\circ C. \quad (3.18)$$

$$\alpha_3 = \alpha_\kappa + \alpha_\epsilon, Bm / m^2 \cdot ^\circ C \quad (3.19)$$

Наступним кроком уточнюємо значення термічного опору R_3 , та, відповідно R , за формулами (3.15) та (3.16).

Питомі теплові втрати ізольованого паропроводу розраховуються за формулою (3.1):

$$q_{iz} = \frac{\tau - t_0}{R}.$$

Надалі розрахуємо теплові втрати паропроводу у випадку відсутності теплової ізоляції та порівняємо отримані дані для обох випадків.

Оскільки термічні опори внутрішньої поверхні труби R_ϵ та самої труби R_{mp} зазвичай значно менші за термічний опір зовнішньої поверхні паропроводу R_3 , то з достатнім ступенем точності можна припустити, що $\tau = t_\epsilon = t_3 = 150^\circ C$.

Коефіцієнт тепловіддачі для зовнішньої поверхні труби при коефіцієнті випромінювання поверхні труби $C = 5 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^4$ розраховується за співвідношеннями (3.17) – (3.19), враховуючи змінне значення d_3 (тобто за відсутності шару теплової ізоляції).

Обчислюємо термічний опір:

$$R_3 = \frac{1}{\pi d_3 \alpha_3}, \text{ м} \cdot \text{С}^0 / \text{Вт},$$

та теплові втрати неізолюваного паропроводу:

$$q_{н/із} = \frac{\tau - t_0}{R_3}.$$

Для порівняння теплових втрат ізолюваного та неізолюваного паропроводів знайдемо їх відношення:

$$\Delta = \frac{q_{н/із}}{q_{із}}.$$

Варіанти вхідних даних до задачі 1

№	Матеріал ізоляції	δ_i , мм	t_0 , °С	w , м / с	τ , °С
1	Мінеральна вата ($\rho=200 \text{ кг/м}^3$)	50	3	2	100
2	Пінополістирол ($\rho=150 \text{ кг/м}^3$)	55	5	5	
3	Пінополістирол екструдований	60	8	7	
4	Пінопласт ПВХ	65	10	10	110
5	Піноскло ($\rho=400 \text{ кг/м}^3$)	70	12	15	
6	Мінеральна вата ($\rho=100 \text{ кг/м}^3$)	75	0	12	120
7	Пінополістирол ($\rho=100 \text{ кг/м}^3$)	80	10	8	
8	Пінополіуретан ($\rho=80 \text{ кг/м}^3$)	85	7	5	130

9	Піноскло ($\rho=200 \text{ кг/м}^3$)	90	5	3	
10	Пінополістирол екструдований	45	2	0	
11	Мінеральна вата ($\rho=50 \text{ кг/м}^3$)	50	4	1	140
12	Пінопласт ПВХ	55	7	5	
13	Пінополістирол ($\rho=40 \text{ кг/м}^3$)	60	9	9	
14	Пінополіуретан ($\rho=60 \text{ кг/м}^3$)	65	10	10	150
15	Мінеральна вата ($\rho=200 \text{ кг/м}^3$)	70	0	11	
16	Пінополістирол ($\rho=33 \text{ кг/м}^3$)	75	15	7	155
17	Піноскло ($\rho=400 \text{ кг/м}^3$)	80	10	5	
18	Мінеральна вата ($\rho=100 \text{ кг/м}^3$)	85	8	3	145
19	Пінополістирол ($\rho=100 \text{ кг/м}^3$)	90	5	0	
20	Пінополістирол екструдований	80	3	5	

Задача 2. Для умов задачі 1 при довжині паропроводу l , m визначити теплові втрати паропроводу, коефіцієнт ефективності ізоляції та кількість конденсату, що випадає. Середній абсолютний тиск пари p , МПа.

При розрахунку місцевих втрат теплоти врахувати коефіцієнт місцевих втрат β (див. варіанти вхідних даних до задачі 2).

Порядок розрахунку.

Для розрахунку теплових втрат ізольованого та неізольованого паропроводів визначеної довжини використовуємо результати, отримані у задачі 1, а саме q_{i3} та $q_{н/із}$.

Теплові втрати паропроводу визначеної довжини l обчислюються наступним чином:

$$Q_{i3} = q_{i3} l (1 + \beta), \quad Q_{н/i3} = q_{н/i3} l, \text{ Вт}.$$

Коефіцієнт ефективності ізоляції:

$$\eta_{i3} = \frac{Q_{н/i3} - Q_{i3}}{Q_{н/i3}}.$$

Кількість конденсату, що випадає ізольованого та неізольованого паропроводів:

$$G_{к.i3} = \frac{Q_{i3}}{r}, \quad G_{к.н/i3} = \frac{Q_{н/i3}}{r},$$

де r – прихована теплота пароутворення в залежності від тиску, кДж/кг (див. додаток 3.б).

Варіанти вхідних даних до задачі 2

N_0	$l, м$	$p, МПа$	β
1	100	0,3	0,15
2	150		
3	200		
4	250	0,5	0,2
5	300		
6	350	0,6	0,25
7	400	0,7	
8	450	0,8	0,3
9	500	0,3	
10	550		
11	600	0,4	0,35
12	650		
13	700	0,5	
14	750	0,6	0,4
15	800	0,7	
16	850	0,8	0,45
17	900	0,3	
18	700	0,4	0,5
19	600	0,5	
20	500		

5. Оцінка теплового споживання будівель

Однією з ключових складових ефективного використання енергоресурсів є оптимізація теплового споживання будівель. Теплова енергія використовується на опалення приміщень, гаряче водопостачання, вентиляцію та інші потреби, які забезпечують комфортні умови для проживання та роботи людей [4].

Разом із тим, значна частина теплової енергії втрачається в процесі експлуатації будівель через огорожувальні конструкції: стіни, дахи, вікна, двері, а також через вентиляцію та інфільтрацію повітря (рис.4.1). Ці втрати називають *тепловими втратами будівлі*. Вони залежать від кліматичних умов, теплоізоляційних властивостей матеріалів, якості будівельних робіт і технічного стану будівлі [4, 5].

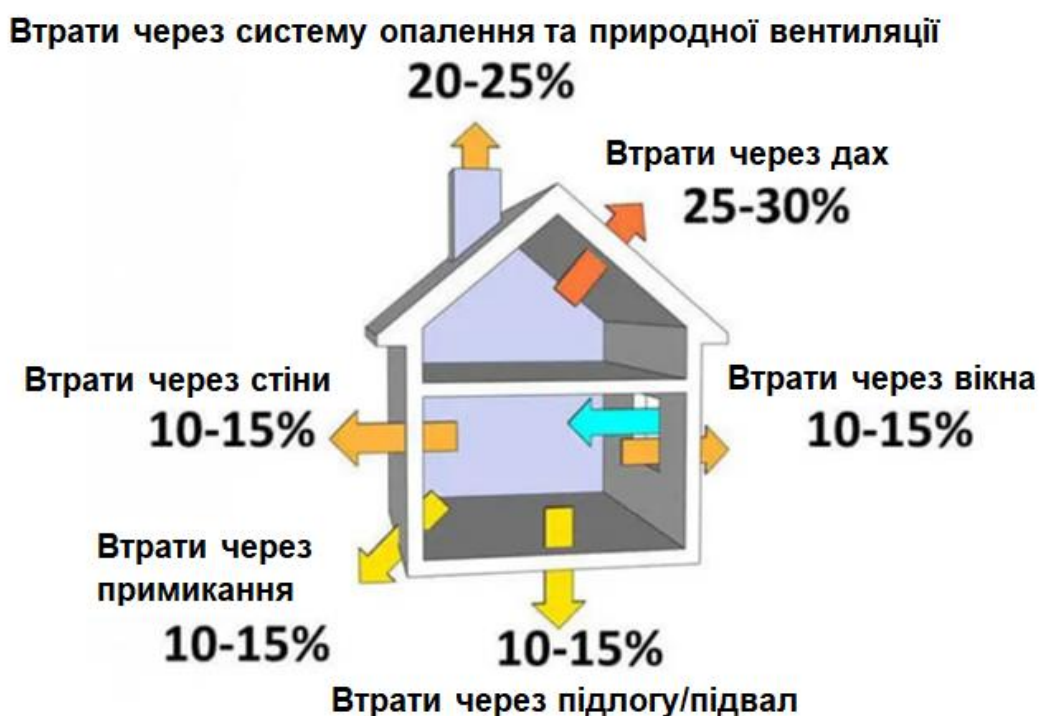


Рисунок 4.1. Втрати тепла елементами будівлі

Розуміння процесів теплового споживання та втрат дає змогу проектувати енергоефективні споруди, проводити енергетичні аудити, розраховувати потребу в тепловій енергії та приймати ефективні рішення щодо її економії [4].

Основні розрахункові формули

Тепловтрати через зовнішні огороження, Bm (Дж/с):

$$Q_T = \left(\sum kF\psi \right) (t_e - t_z) \quad (4.1)$$

або

$$Q_T = q_0 V (t_e - t_z), \quad (4.2)$$

де F – поверхня окремих зовнішніх огорожень будівлі, m^2 ; k – коефіцієнт теплопередачі окремих зовнішніх огорожень будівлі, $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_z – температура зовнішнього повітря, $^\circ C$; t_e – температура внутрішнього повітря приміщень, $^\circ C$; ψ – поправочний коефіцієнт на розрахунковий перепад температур для верхньої та нижньої горизонтальних огорожень (для стін і вікон $\psi = 1$); V – зовнішній об'єм будинку, m^3 ; q_0 – питомі теплові втрати теплопередачею через зовнішні огороження будинку, $Bm/(m^3 \cdot ^\circ C)$.

Теплове навантаження опалення [5, 7]

$$Q_0 = Q_T + Q_i + Q_{me}, \quad (4.3)$$

де Q_i – тепловтрати інфільтрацією через надходження холодного повітря в приміщення через нещільності зовнішніх огорожень; Q_{me} – внутрішнє тепловиділення.

Теплове навантаження вентиляції, Bm :

$$Q_B = m V_B c_B (t_e - t_z) \quad (4.4)$$

або

$$Q_B = q_B V (t_e - t_z), \quad (4.5)$$

де V_B – вентиляований об'єм будівлі, m^3 ; m – кратність повітрообміну, l/s ; c_B – об'ємна теплоємність повітря, $Дж/(m^3 \cdot ^\circ C)$; q_B – питоме теплове навантаження вентиляції, $Bm/(m^3 \cdot ^\circ C)$; V – об'єм будівлі.

Теплове навантаження гарячого водопостачання середньотижневе для зимового періоду, Bm :

$$Q_z^{sep.m} = \frac{a M c (t_z - t_x)}{n_c}, \quad (4.6)$$

де M – кількість жителів, люд.; a – середньотижневе споживання гарячої води на одну людину на добу, $\text{кг}/(\text{доб} \cdot \text{люд})$; t_x – температура холодної (водопровідної) води (для зими $t_x = 5^\circ\text{C}$); t_z – температура нагрітої води, що надходить у систему гарячого водопостачання, $^\circ\text{C}$; c – теплоємність води, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; n_c – орієнтовна тривалість подачі тепла на гаряче водопостачання, $\text{с}/\text{добу}$.

Теплове навантаження гарячого водопостачання середнє за добу максимального споживання та максимальне становить, Вт :

$$Q_z^{\text{сер.д}} = \chi_m Q_z^{\text{сер.м}}, \quad (4.7)$$

$$Q_z^{\text{м}} = \chi_m \chi_d Q_z^{\text{сер.м}}, \quad (4.8)$$

де χ_m – коефіцієнт тижневої нерівномірності споживання тепла; χ_d – коефіцієнт добової нерівномірності споживання тепла за добу найбільшого споживання води.

Задача 1. Визначити питомі тепловтрати і розрахункові тепловтрати через зовнішні огороження будівлі довжиною $L=86 \text{ м}$, шириною $B=14 \text{ м}$ та висотою $H=20 \text{ м}$.

Коефіцієнт скління (відношення поверхні вікон до загальної площі вертикального зовнішнього огороження) прийняти φ . Коефіцієнти теплопередачі стелі та підлоги відповідно дорівнюють $k_{\text{стелі}}=0,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $k_n=0,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, коефіцієнти теплопередачі стін $k_{\text{ст}}$ та вікон k_v , дивитися у варіантах вхідних даних до задачі 1. Коефіцієнти зниження розрахункової різниці температур для стін, вікон, стелі та підлоги: $\psi_{\text{ст}}$, ψ_v , $\psi_{\text{стелі}}$, ψ_n . Температура внутрішнього повітря $t_{\text{в}}$, температура зовнішнього повітря $t_{\text{з}}$.

Порядок розрахунку.

Площі поверхонь стін, вікон, стелі та підлоги розраховуються за відповідними співвідношеннями:

$$F_{cm} = 2 \cdot (L + B) \cdot H \cdot (1 - \varphi), \text{ м}^2,$$

$$F_{\varepsilon} = 2 \cdot (L + B) \cdot H \cdot \varphi, \text{ м}^2,$$

$$F_{стелі} = F_n = L \cdot B, \text{ м}^2.$$

Зовнішній об'єм будівлі:

$$V = L \cdot B \cdot H, \text{ м}^3.$$

Розраховуються питомі тепловтрати теплопередачею через зовнішні огороження будівлі:

$$q_0 = \frac{\sum kF\psi}{V}, \text{ Вт} / \text{ м}^3 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Розрахункові тепловтрати теплопередачею через зовнішні огороження будівлі обчислюються за формулою (4.2):

$$Q_T = q_0 V (t_{\varepsilon} - t_3), \text{ Вт}.$$

Варіанти вхідних даних до задачі 1

N_0	φ	k_{cm}	k_{ε}	ψ_{cm}	ψ_{ε}	ψ_{cmeni}	ψ_n	$t_{\varepsilon},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t_3,\text{ }^{\circ}\text{C}$
1	0,2	0,5	1,5	0,9	1,0	0,7	0,5	15	-15
2		0,6	1,75					18	-10
3	0,25	0,7	2,0	0,95	0,95		0,6	20	-5
4		0,8	2,2			22		0	
5	0,3	0,9	2,25	0,95	0,9	0,8	0,6	25	5
6		1,0	2,5					27	8
7	0,35	1,1	2,75	1,0	0,95		0,9	0,7	15
8		1,2	3,0			17			-9
9	0,4	1,3	3,25	0,95	1,0	0,9		0,8	20
10		1,4	3,5				23		-5
11	0,45	1,5	3,65	0,9	0,9		1,0	0,8	25
12		1,4	3,8			16			0
13	0,2	1,3	4,0	0,95	0,95	1,0		0,9	18
14		1,2	4,2				20		5
15	0,25	1,1	4,45	0,95	1,0		1,0	23	8
16		1,0	4,5			1,0		25	10

17	0,3	0,9	4,75	0,9	0,95	0,8		18	-8	
18		0,8	5,0		0,9			20	-3	
19	0,35	0,7	3,25		0,9		0,9	0,7	22	-1
20		0,6	2,85						25	2

Задача 2. Використовуючи умови та результати, отримані у задачі 1 визначити внутрішні тепловиділення, тепловтрати через інфільтрацію та розрахункове навантаження на опалення. Для визначення внутрішніх тепловиділень прийняти об'ємний коефіцієнт будівлі $K_{об}=6,4 \text{ м}^3/\text{м}^2$, а питомі тепловиділення (на 1м^2 житлової площі) $q_{тв}=20 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Порядок розрахунку.

Об'ємний коефіцієнт будівлі $K_{об}$ обчислюється наступним чином:

$$K_{об} = V / F_{жс},$$

де V – об'єм будівлі; $F_{жс}$ – житлова площа, м^2 .

Для визначення відношення втрат тепла шляхом інфільтрації до втрат тепла шляхом теплопередачі через зовнішнє огороження використовують наближену формулу:

$$\mu = Q_i / Q_T = b \sqrt{2gL \left(1 - \frac{T_z}{T_e} \right) + K_{aep} (w\beta)^2},$$

де Q_i – тепловтрати інфільтрацією, Вт ; Q_T – тепловтрати теплопередачою через зовнішні огорожувальні конструкції, Вт ; L – розрахункова висота для середнього поверху будівлі, м ($L \approx 0,25H$, H – висота будівлі); T_e та T_z – температури відповідно внутрішнього та зовнішнього повітря, К ; w – швидкість повітря, $\text{м}/\text{с}$; K_{aep} – аеродинамічний коефіцієнт ($K_{aep}=0,6$); β – поправочний коефіцієнт, що враховує розбіжність у часі прийнятих у розрахунках швидкості повітря та температури зовнішнього повітря ($\beta=0,6$); b – постійна величина ($b=0,035 \text{ с}/\text{м}$ при густині повітря при температурі t_z $\rho_z = 1,42 \text{ кг}/\text{м}^3$ та коефіцієнті повітропроникності вікон для простого ущільнення їх притворів).

Враховуючи отриманий у задачі 1 об'єм будівлі V , розраховуємо житлову площу будівлі:

$$F_{жс} = V / K_{об}, м^2.$$

Внутрішні тепловиділення:

$$Q_{тв} = q_{тв} F_{жс}, Вт.$$

Тепловтрати інфільтрацією у частках від Q_T (див. результати задачі 1):

$$Q_i = \mu Q_T.$$

Теплове навантаження на опалення:

$$Q_o = Q_T + Q_i - Q_{тв}.$$

Варіанти вхідних даних до задачі 2

№	$w, м/с$	$t_в, ^\circ C$	$t_з, ^\circ C$
1	2	15	-15
2		18	-10
3	4	20	-5
4		22	0
5		25	5
6	6	27	8
7		15	10
8	5	17	-9
9		20	-7
10		23	-5
11	8	25	-3
12		16	0
13	10	18	2
14		20	5
15		23	8
16	7	25	10
17		18	-8
18	4	20	-3
19		22	-1
20		25	2

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Енергетичний аудит : навч. посіб. / О. І. Соловей та ін. Черкаси : ЧДТУ, 2005. 299 с.
2. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода : навч. посіб. Київ : Кондор, 2005. 408 с.
3. Конспект лекцій по дисципліні «Компресори та компресорні станції» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 – Теплоенергетика / уклад.: Р. О. Клімов. Кам'янське : ДДТУ, 2016. 96 с.
4. Новічонок С. М., Комаров В. М., Тарасова В. В. Основи енергозбереження : навч.-метод. посіб. Харків : ХУПС, 2006. 121 с.
5. Погорєлов А. І. Тепломасообмін : навч. посіб. Львів : Новий Світ, 2006. 144 с.
6. Прокопенко В. В., Закладний О. М., Кульбачний П. В. Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями : навч. посіб. Київ : Освіта України, 2009. 438 с.
7. Співак О. Ю., Резидент Н. В. Тепломасообмін : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2021. Ч. І. 113 с.
8. Типова методика енергетичних обстежень промислових підприємств. М0013184.0.33-04. Київ, 2004. 80 с.

Додаток 1

Середні значення ККД компресорних установок

Вид ККД	Поршневі	Гвинтові	Відцентрові
Ізотермічний	0,5 ÷ 0,75	0,5 ÷ 0,68	0,6 ÷ 0,7
Адіабатний	—	0,75 ÷ 0,78	0,74 ÷ 0,87
Механічний	0,85 ÷ 0,96	0,97 ÷ 0,99	0,98 ÷ 0,99

Значення наявної роботи для різних процесів стиснення

Процес	Формула
Характерний процес стиснення	$l = \int_{p_1}^{p_2} v dp$
Політропний процес	$l = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} RT_1 \left(\varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$
Адіабатний процес	$l = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} RT_1 \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$
Ізотермічний процес	$l = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = RT_1 \ln \varepsilon$

Додаток 2

Число годин використання максимуму освітлювального навантаження для деяких споживачів

Споживачі освітлювального навантаження	τ_{oc}, ГОД
Внутрішнє освітлення	
Робоче освітлення (для місцевості із широтою 56°):	
– однозмінна робота	
– двозмінна робота	
– тризмінна робота	250 1850 4000
Аварійне загальне освітлення	4800
Зовнішнє освітлення	
Робоче освітлення заводських територій, що вмикається	
– до 24 год	
– до 1 год	
– на всю ніч	1750 2450 3600

Необхідний рівень освітленості робочих місць об'єктів

№	Об'єкт	F, лк
1	Офіс	500
2	ВТК	1000
3	Операційна	10000
4	Цех	300
5	Коридор	100
6	Паркувальний майданчик	20

Фізичні властивості будівельних та теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Щільність, кг/м ³	Тепло- провідність, Вт/м·°C	Паро- проникність, мг/м·год·Па	Еквівалентна товщина 1 (при опорі теплопередачі 4,2 м ² ·°C/Вт), м	Еквівалентна товщина 2 (при опорі паропроникності 1,6 м ² ·год·Па/мг), м
Залізобетон	2500	1,69	0,03	7,10	0,048
Бетон	2400	1,51	0,03	6,34	0,048
Керамзито- бетон	1800	0,66	0,09	2,77	0,144
Керамзито- бетон	500	0,14	0,30	0,59	0,48
Цегла червона, глиняна	1800	0,56	0,11	2,35	0,176
Цегла силікатна	1800	0,70	0,11	2,94	0,176
Цегла керамічна пустотіла (брутто 1400)	1600	0,41	0,14	1,72	0,224
Цегла керамічна пустотіла (брутто 1000)	1200	0,35	0,17	1,47	0,272
Пінобетон	1000	0,29	0,11	1,22	0,176
Пінобетон	300	0,08	0,26	0,34	0,416
Граніт	2800	3,49	0,008	14,6	0,013
Мармур	2800	2,91	0,008	12,2	0,013
Сосна, ялина поперек волокна	500	0,09	0,06	0,38	0,096
Дуб поперек волокна	700	0,10	0,05	0,42	0,08
Сосна, ялина уздовж волокна	500	0,18	0,32	0,75	0,512

Продовження Додатку 3.а

<i>Матеріал</i>	<i>Щільність, кг/м³</i>	<i>Тепло- провідність, Вт/м·°C</i>	<i>Паро- проникність, мг/м·год·Па</i>	<i>Еквівалентна товщина 1 (при опорі теплопередачі 4,2 м²·°C/Вт), м</i>	<i>Еквівалентна товщина 2 (при опорі паропроникності 1,6 м²·год·Па/мг), м</i>
Дуб уздовж волокна	700	0,23	0,30	0,96	0,48
Фанера клеєна	600	0,12	0,02	0,50	0,032
ДСП	1000	0,15	0,12	0,63	0,192
Пакля	150	0,05	0,49	0,21	0,784
Гіпсокартон	800	0,15	0,075	0,63	0,12
Картон обліцюваль- ний	1000	0,18	0,06	0,75	0,096
Мінеральна вата	200	0,070	0,49	0,30	0,784
Мінеральна вата	100	0,056	0,56	0,23	0,896
Мінеральна вата	50	0,048	0,60	0,20	0,96
Пінополі- стирол	33	0,031	0,013	0,13	0,021
Пінополі- стирол екструдо- ваний	45	0,036	0,013	0,13	0,021
Пінополі- стирол	150	0,05	0,05	0,21	0,08
Пінополі- стирол	100	0,041	0,05	0,17	0,08
Пінополі- стирол	40	0,038	0,05	0,16	0,08
Пінопласт ПВХ	125	0,052	0,23	0,22	0,368
Пінополі- уретан	80	0,041	0,05	0,17	0,08
Пінополі- уретан	60	0,035	0,05	0,15	0,08
Пінополі- уретан	40	0,029	0,05	0,12	0,08
Пінополі- уретан	30	0,020	0,05	0,09	0,08
Керамзит	800	0,18	0,21	0,75	0,336

Продовження Додатку 3.а

<i>Матеріал</i>	<i>Щільність, кг/м³</i>	<i>Тепло- провідність, Вт/м·°С</i>	<i>Паро- проникність, мг/м·год·Па</i>	<i>Еквівалентна товщина 1 (при опорі теплопередачі 4,2 м²·°С/Вт), м</i>	<i>Еквівалентна товщина 2 (при опорі паропроникності 1,6 м²год·Па/мг), м</i>
Керамзит	200	0,10	0,26	0,42	0,416
Пісок	1600	0,35	0,17	1,47	0,272
Піноскло	400	0,11	0,02	0,46	0,032
Піноскло	200	0,07	0,03	0,30	0,048
АЦП	1800	0,35	0,03	1,47	0,048
Бітум	1400	0,27	0,008	1,13	0,013
Поліуретано- ва мастика	1400	0,25	0,00023	1,05	0,00036
Полімоче- вина	1100	0,21	0,00023	0,88	0,00054
Руберойд, пергамін	600	0,17	0,001	0,71	0,0016
Поліетилен	1500	0,30	0,00002	1,26	0,000032
Асфальто- бетон	2100	1,05	0,008	4,41	0,0128
Лінолеум	1600	0,33	0,002	1,38	0,0032
Сталь	7850	58	0	243	0
Алюміній	2600	221	0	928	0
Мідь	8500	407	0	1709	0
Скло	2500	0,76	0	3,19	0

Додаток 3.6

Теплота пароутворення та температура кипіння води в залежності від тиску

Тиск, <i>p</i> , МПа	Температура кипіння, <i>t</i> _{кип} , °С	Теплота пароутворення, <i>r</i> , кДж/кг	Тиск, <i>p</i> , МПа	Температура кипіння, <i>t</i> _{кип} , °С	Теплота пароутворення, <i>r</i> , кДж/кг
0,00123	10	2477,4	2,1	214,84	1878,4
0,00234	20	2453,8	2,2	217,24	1868,2
0,00424	30	2430,2	2,3	219,55	1858,2
0,00737	40	2406,5	2,4	221,77	1848,5
0,01234	50	2382,5	2,5	223,93	1838,8
0,1	99,63	2258,2	2,6	226,03	1829,5
0,2	120,23	2202,2	2,7	228,06	1820,3
0,3	133,54	2164,1	2,8	230,04	1811,2
0,4	143,62	2133,8	2,9	231,96	1802,3
0,5	151,84	2108,4	3,0	233,83	1793,5
0,6	158,84	2086,0	3,2	237,44	1776,3
0,7	164,96	2065,8	3,4	240,88	1759,7
0,8	170,42	2047,5	3,6	244,16	1743,4
0,9	175,35	2030,4	3,8	247,31	1727,5
1,0	179,88	2014,4	4,0	250,33	1711,9
1,1	184,05	1999,3	4,2	253,24	1696,7
1,2	187,95	1985,0	4,4	256,05	1681,7
1,3	191,60	1971,3	4,6	258,75	1667,0
1,4	195,04	1958,3	4,8	261,37	1652,5
1,5	198,28	1945,7	5,0	263,91	1638,2
1,6	201,36	1933,6	5,6	271,10	1596,4
1,7	204,30	1922,0	6,0	275,56	1569,4
1,8	207,10	1910,5	6,6	281,85	1529,6
1,9	209,78	1899,5	7,0	285,80	1503,7
2,0	212,37	1888,8	8,0	294,98	1440,0

Навчально-методичне видання

**Біляєва Вікторія Віталіївна,
Бразалук Юлія Володимирівна,
Усенко Андрій Юрійович,
Форись Світлана Миколаївна**

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ КОМУНАЛЬНИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Навчально-методичні рекомендації
до практичних занять

В авторській редакції
Комп'ютерна верстка В. В. Біляєва

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Світлана Форись

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 42 від 22.04.2025)

Формат 60x84 _{1/16}. Ум. друк. арк. 3,83. Обл.-вид. арк. 3,88.
Зам. № 57

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010