

В. В. КЛИМЕНКО, В. І. КРАВЧЕНКО, Р. В. ТЕЛЮТА

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ТА УСТАНОВКАХ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



В.В. КЛИМЕНКО, В.І. КРАВЧЕНКО
Р.В. ТЕЛЮТА

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ТА УСТАНОВКАХ

Навчальний посібник
*для студентів спеціальностей «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»*

Кропивницький
ІПІ «Ексклюзив-Систем»
2020

Затверджено Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету (протокол № 8 від 24.03.2018)

Рецензенти:

Тітлов О.С., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв Одеської національної академії харчових технологій.

Іваницький Г.К., доктор технічних наук, професор кафедри машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

КЛИМЕНКО В. В., КРАВЧЕНКО В. І., ТЕЛЮТА Р. В.
Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках: Навчальний посібник. – Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем, 2020. – 219 с.

У навчальному посібнику проведений аналіз сучасного стану та напрямків енергозбереження в Україні, розглянуті загальні заходи з енергозбереження у теплотехнологічних, тепломасообмінних і холодильних установках, промислових печах та системах постачання стиснутого повітря.

Посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за спеціалізацією «Енергетичний менеджмент».

ISBN 978-617-7079-91-9

УДК: 621.31

КЛИМЕНКО В. В., КРАВЧЕНКО В. І., ТЕЛЮТА Р. В.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	6
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
1. СТАН ТА НАПРЯМКИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В УКРАЇНІ	9
1.1. Основні терміни і поняття енергозбереження	9
1.2. Стан енергоспоживання та енерговикористання в Україні	14
1.3. Основні напрямки в галузі енергозбереження.....	17
1.3.1. Потенціал енергозбереження в Україні	17
1.3.2. Напрямки в галузі енергозбереження у теплотехнологіях.....	24
1.4. Енергетичний аудит і енергетичний менеджмент	26
1.4.1. Енергетичний аудит і методи його проведення	26
1.4.2. Енергетичний менеджмент та його зв'язок з енергоаудитом.....	29
2. НАПРЯМКИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГІЯХ ТА ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ	31
2.1. Пріоритетні напрямки енергозбереження в промислових галузях.....	31
2.2. Енергетична ефективність теплотехнологічної установки	36
2.3. Показники ефективності роботи теплотехнологічних установок	37
2.3.1. Нормалізація енергоспоживання	37
2.3.2. Енергетичні баланси та їх різновиди.....	42
2.3.3. Енергобаланси агрегатів і форми їх подання.....	43
2.3.4. Показники енергоефективності агрегатів.....	49
3. ЗАГАЛЬНІ ЗАХОДИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ТЕПЛО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВКАХ	54
3.1. Використання вторинних енергетичних ресурсів	54
3.2. Організація систем рециркуляції	58
3.3. Пасивні методи енергозбереження	59
3.4. Інтенсифікація теплопередачі у теплотехнологічних установках.....	65
3.5. Використання ефективних теплопровідних пристроїв	71
3.6. Комплексне використання холоду, теплової та електричної енергій	76
3.6.1. Ефективність одночасного виробництва теплової та електричної енергії	76

3.6.2. Схеми та принцип роботи когенераційних установок....	80
3.6.3. Тригенераційні системи	87
3.7. Акумулятори теплоти	88
3.8. Трансформатори теплоти	92
3.8.1. Класифікація трансформаторів теплоти.....	92
3.8.2. Термодинамічні основи процесів трансформації теплоти	93
3.8.3. Класифікація та термодинамічний цикл ТН	95
3.9. Використання ВДЕ	97
3.9.1. Геліоенергетика.....	98
3.9.2. Вітроенергетика	101
3.9.3. Гідроенергетика	103
3.9.4. Біоенергетика	103
4. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ВИСОКОТЕМПЕРА- ТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВКАХ	106
4.1. Види та класифікація високотемпературних теплотехно- логічних установок	106
4.2. Заходи з енергозбереження у високотемпературних теплотехнологічних установках	109
4.2.1. Оптимальний вибір конструктивних та технологічних параметрів установки	110
4.2.2. Використання сучасних вогнетривких матеріалів	111
4.2.3. Ущільнення робочого простору печей	112
4.2.4. Використання системи рециркуляції.....	113
4.3. Утилізація теплоти відхідних газів	114
4.3.1. Застосування рекуператорів і повітропідігрівників.....	114
4.3.2. Використання котлів-утилізаторів	116
4.3.3. Схеми взаємного розташування повітропідігрівника і котла-утилізатора.....	118
4.3.4. Ефективність застосування контактних економайзерів	120
5. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ТЕПЛОМАСООБМІННИХ УСТАНОВКАХ.....	123
5.1. Класифікація та принцип дії сушильних установок.....	124
5.2. Енергозбереження у сушильних установках	127
5.3. Способи енергозбереження у випарних установках	132
5.4. Енергозбереження у ректифікаційних установках	136
5.5. Енергозбереження в абсорбційних, екстракційних та	

кристалізаційних установках.....	140
6. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВКАХ	145
6.1. Призначення та класифікація холодильних установок	145
6.2. Акумуляування теплової енергії в холодильній техніці	147
6.2.1. Види акумуляуючих речовин	149
6.2.2. Схемні рішення системи охолодження з акумуляторами холоду	151
6.3. Проведення енергетичного аудиту холодильного обладнання	155
6.4. Основні можливості енергозбереження в системах охолодження	159
7. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У СИСТЕМАХ ПОСТАЧАННЯ СТИСНУТОГО ПОВІТРЯ	161
7.1 Характеристика системи виробництва стисненого повітря	161
7.2. Заходи по підвищенню ефективності систем виробництва стисненого повітря	163
8. СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВДЕ ТА ВЕР	179
8.1. Біопаливо та його застосування	179
8.1.1. Підвищення ефективності використання твердих рослин- них відходів.....	179
8.1.2. Застосування біологічних продуктів для виробництва біогазу	186
8.1.3. Рідке біопаливо та його застосування	189
8.2. Використання ВЕР	190
8.2.1. Використання відпрацьованої пари для теплопостачання	190
8.2.2. Використання відпрацьованої пари для вироблення електроенергії.....	191
8.2.3. Використання теплоти технологічних продуктів	193
8.3. Застосування ТН як низькопотенційних джерел теплоти та альтернативних джерел енергії	194
8.4. Використання енергії надлишкового тиску природного газу	199
Список літератури	205
Додаток	207

ПЕРЕДМОВА

В Україні відбуваються зрушення у зміні у підходах до формування її енергетичної політики: здійснюється перехід від застарілої моделі функціонування енергетичного сектору, в якому домінували великі виробники, викопне паливо, неефективні мережі, недосконала конкуренція на ринках природного газу, електроенергії, вугілля – до нової моделі, в якій створюється більш конкурентне середовище, вирівнюються можливості для розвитку й мінімізується домінування одного з видів виробництва енергії або джерел та/або шляхів постачання палива. Разом з цим віддається перевага підвищенню енергоефективності й використанню енергії, у тому числі у *теплотехнологіях*, із відновлюваних та альтернативних джерел.

У державній економічній політиці України до останнього часу більша увага наголошувалася на понятті «енергозбереження», тоді як у європейських та інших розвинених країнах оперують поняттям дещо іншого і більш комплексного виміру – «енергоефективність», яке розглядається в єдиній системі координат з екологічністю та конкурентоспроможністю.

Під енергоефективністю розуміють зменшення споживання енергії без зниження використання енергії виробництвом і устаткуванням, тобто мається на увазі раціональне використання енергоресурсів і альтернативних джерел енергії та зменшення загальної потреби в енергоресурсах за окремими напрямками.

Реалізація політики підвищення енергоефективності з використанням ВЕР, відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива дасть Україні можливість створити умови для зниження рівня енергоємності валового внутрішнього продукту.

Оскільки на сьогодні альтернатива енергозбереженню відсутня, тому знання принципів роботи, розрахунку і експлуатації теплоенергетичного і теплотехнологічного обладнання дозволяють визначити основні та приховані ділянки, причини та обсяги втрат енергії, усунення яких дасть можливість підвищити техніко-економічні показники таких установок.

Для рішення задач енергозбереження у теплоенергетиці та теплотехнологіях потрібні висококваліфіковані спеціалісти, які добре володіють теоретичними питаннями технічної термодинаміки, тепломасообміну та засвоїли принципи проектування і експлуатації технологій енергозбереження і обладнання.

Навчальний посібник дає уявлення про загальні можливості заощадження теплової енергії, можливості підвищення рівня ефективності використання теплової енергії у теплотехнологічних установках та пристроях (промислових печах, тепломасообмінних установках, холодильних машинах, компресорах тощо).

Навчальний посібник орієнтовано на студентів, магістрантів та аспірантів тепло- та електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів, також він буде корисним для підвищення рівня кваліфікації інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням та експлуатацією теплоенергетичного обладнання.

У підготовці навчального посібника та опрацюванні окремих його розділів брали участь викладачі кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту Центральноукраїнського національного технічного університету.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ВЕР – вторинні енергетичні ресурси

ВЕС – вітрова електрична станція

ГПА – газопоршневий агрегат

ЕСУ – енергетична стратегія України

ЕСКО – енергосервісна компанія

ЄСБ – Європейська стратегія безпеки

ЗППЕ – загальне первинне постачання енергії, що розраховується як сума виробництва (видобутку), імпорту, експорту, міжнародного бункрування суден та зміни запасів енергоресурсів у країні

КГУ – когенераційна установка

МЕА – Міжнародне енергетичне агентство

НВДЕ – нетрадиційні та відновлювані джерела енергії

ОЕС України – Об'єднана енергетична система України

ПБ – пасивний будинок

ПЕБ – паливно-енергетичний баланс

ПЕК – паливно-енергетичний комплекс

ПЕР – паливно-енергетичні ресурси

ПКС – паритет купівельної спроможності

СЕС – сонячна електростанція

ТЕЦ – теплоелектроцентраль

ТН – тепловий насос

ТП – технологічна платформа

ТПВ – тверді побутові відходи

CCS – Carbon capture and sequestration – технології уловлювання та зв'язування CO₂

т у.п. – тон умовного палива

COP - Coefficient of Performance

1. СТАН ТА НАПРЯМКИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В УКРАЇНІ

1.1. Основні терміни і поняття енергозбереження

Паливо - речовина, яка може бути використано у господарській діяльності для отримання теплової енергії, що виділяється при її згорянні.

Енергоносій - речовина або форма матерії, що знаходяться в різних агрегатних станах. Енергія цих речовин, при створенні певних умов, використовується для цілей енергопостачання.

Природний енергоносій - енергоносій, що утворився в наслідок природних процесів: вода гідросфери (при використанні енергії річок, морів, океанів); гаряча вода і пара геотермальних джерел; повітря атмосфери (при використанні енергії вітру); органічне паливо (нафта, газ, вугілля, торф, сланці), біомаса.

Вироблений енергоносій - енергоносій, отриманий як продукт виробничого технологічного процесу: водяна пара парогенераторів; гаряча вода; стиснене повітря; продукти переробки органічного палива і біомаси тощо

Паливно-енергетичні ресурси (ПЕР) - сукупність природних і виробничих енергоносіїв, енергія яких при існуючому рівні розвитку техніки і технології доступна для використання в господарській діяльності підприємств, транспорті, житлово-комунальному комплексі.

Вторинні паливно-енергетичні ресурси (ВЕР) – паливно енергетичні ресурси, отримані як відходи або побічні продукти (викиди) виробничого технологічного процесу.

Первинна енергія - енергія, укладена у ПЕР.

Корисна енергія - енергія, для здійснення заданих операцій, технологічних процесів або виконання роботи і надання послуг.

Прикладами визначення терміну «корисна енергія»: в термічних процесах - за теоретичною витратою енергії на нагрів, кипіння, плавку, випаровування матеріалу і проведення ендотермічних реакцій; в системах холодопостачання – за кількістю теплоти, отриманої споживачами або користувачами; в системах

перетворення, зберігання, транспортування паливно енергетичних ресурсів – за кількістю ресурсів, що отримуються з цих систем.

Відновлювані паливно-енергетичні ресурси – природні енергоносії, що постійно поповнюються в результаті природних (природних) процесів.

Енергоустановка - комплекс взаємопов'язаного обладнання та споруд, призначених для виробництва або перетворення, передачі, накопичення, розподілу чи споживання енергії.

Теплотехнологічна установка – пристрій, в якому відбувається теплотехнологічний процес або його окремі стадії.

Теплотехнологічний процес – технологічний процес одержання продукції, що здійснюється при регламентованій тепловій дії на початковий матеріал, сировину, напівфабрикати шляхом тепломасообміну.

Теплотехнологічна система – сукупність теплотехнологічної установки і технологічного, теплотехнічного, енергетичного, транспортного, розподільчо-приймального та іншого обладнання, що безпосередньо забезпечує реалізацію даного теплотехнологічного процесу або окремої його стадії.

Теплотехнологічний комплекс – сукупність теплотехнологічних та виробничо зв'язаних технологічних, енергетичних, транспортних та інших систем, агрегатів, пристроїв, що забезпечують всю послідовність технологічних стадій перетворення початкових сировинних матеріалів у певну продукцію, яка реалізується.

Раціональне або ефективне використання ПЕР - використання паливно-енергетичних ресурсів, що забезпечує досягнення максимальних при існуючому рівні розвитку техніки і технології ефективності з урахуванням обмеженості їх запасів і дотримання вимог зниження техногенного впливу на навколишнє середовище та інших вимог суспільства. Поняття «Раціональне використання ПЕР» є загальним у порівнянні з поняттям «Економне витрачання ПЕР» і включає:

- вибір оптимальної структури енергоносіїв, тобто оптимального кількісного співвідношення різних використовуваних видів енергоносіїв в установці, на ділянці, в цеху, на підприємстві, в регіоні, галузі або господарстві;

- комплексне використання палива, його теплоти, в тому числі і відходів продуктів згоряння палива в якості сировини для промисловості (наприклад, використання золи і шлаків в будівництві);

- облік можливості використання органічного палива (наприклад нафти) в якості цінної сировини для промисловості.

Економія ПЕР - порівняльне в зіставленні з базовим, еталонним значенням скорочення споживання ПЕР на виробництво продукції, виконання робіт і надання послуг встановленої якості без порушення екологічних та інших обмежень відповідно до вимог суспільства.

Економію ПЕР визначають через порівняльне скорочення витрат, а не споживання ПЕР, кореспондується з видатковою частиною паливно-енергетичного балансу конкретним енергоспоживаючим об'єктом (виробом, процесом, роботою та послугами).

Еталонні значення витрат ПЕР встановлюються в нормативних, технічних, технологічних, методичних документах.

Непродуктивна витрата ПЕР - споживання ПЕР, обумовлена недотриманням або порушенням вимог, встановлених державними стандартами, іншими нормативними актами, нормативними і методичними документами.

Енергозбереження - реалізація правових, організаційних, наукових, виробничих, технічних і економічних заходів, спрямованих на ефективне (раціональне) використання (і економне витрачання) ПЕР і на залучення в господарський оборот поновлюваних джерел енергії.

Показник енергозбереження - якісна і (або) кількісна характеристика проєктованих або реалізованих заходів щодо енергозбереження.

Енергозберігаюча політика - комплексне системне проведення на державному рівні програми заходів, спрямованих на створення необхідних умов організаційного, матеріального, фінансового та іншого характеру для раціонального використання та економного витрачання ПЕР.

Паливно-енергетичний баланс - система показників, що відбиває повну кількісну відповідність між приходом і витратою

(включаючи втрати та залишок) ПЕР в господарстві в цілому або на окремих його ділянках (галузь, регіон, підприємство, цех, процес, установка) за вибраний інтервал часу.

Термін виражає повну кількісну відповідність (рівність) за певний інтервал часу між витратою і приходом енергії і палива всіх видів в енергетичному господарстві. Паливно-енергетичний баланс може складатися:

- за видами ПЕР (ресурсні баланси);
- за стадіями енергетичного потоку ПЕР (видобуток, переробка, перетворення, транспортування, зберігання, використання);
- за єдиним або зведеним паливно-енергетичним балансом всіх видів енергії та ПЕР;
- щодо окремих агрегатів, енергоустановок, цехів, підприємств;
- за рівнем використання (з виділенням корисної енергії і втрат);
- в територіальному розрізі і по галузях народного господарства.

Енергетичний паспорт промислового споживача ПЕР – нормативний документ, що відображає баланс споживання і показники ефективності використання ПЕР в процесі господарської діяльності об'єктом виробничого призначення і здатний утримувати енергозберігаючі заходи.

Енергозберігаюча технологія - новий або удосконалений технологічний процес, який характеризується більш високим коефіцієнтом корисного використання ПЕР.

Показник енергетичної ефективності - абсолютний, питомий або відносний параметр споживання або втрат енергетичних ресурсів для продукції будь-якого призначення або технологічного процесу.

Коефіцієнт корисного використання енергії - відношення всієї корисно використаної в господарстві (ділянці, енергоустановки тощо) енергії до сумарної кількості витраченої енергії.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) - відношення корисної енергії до підведеної; параметр, що характеризує досконалість процесу перетворення або передачі енергії.

Втрата енергії - різниця між кількістю підведеної (первинної) і споживаної (корисної) енергії. Втрати енергії класифікуються наступним чином:

а) за областю виникнення: при видобуванні, зберіганні, транспортуванні, переробці, перетворенні, при використанні і утилізації;

б) за фізичною ознакою і характером:

- втрати теплоти в навколишнє середовище з димовими топковим газами, технологічною продукцією, технологічними відходами, виносом матеріалів, хімічним, механічним і фізичним недопалом, охолоджуваною водою;

- втрати рідин і газів з витоками через нещільності;

- гідравлічні втрати напору при дроселюванні і втрати на тертя при русі рідини (пари, газу) по трубопроводах з урахуванням місцевих опорів;

- механічні втрати на тертя рухомих частин машин і механізмів;

в) за причинами виникнення:

- внаслідок конструктивних недоліків,

- в результаті неправильної експлуатації агрегатів і не оптимально обраного технологічного режиму роботи;

- в результаті браку продукції та з інших причин.

Повна енергоємність продукції - параметр витрати енергії і (або) палива на виготовлення продукції, включаючи витрати на видобуток, транспортування, переробку корисних копалин і виробництво сировини, матеріалів, деталей з урахуванням коефіцієнта використання сировини і матеріалів.

Енергоємність виробництва продукції - параметр споживання енергії та (або) палива на основні і допоміжні технологічні процеси виготовлення продукції, виконання робіт, надання послуг на базі заданої технологічної системи. Практично при виробництві будь-якого виду продукції витрачаються ПЕР, і для кожного з видів продукції існує відповідна енергоємність технологічних процесів їх виробництва. При цьому енергоємність технологічних процесів виробництва одних і тих же видів виробів, що випускаються різними підприємствами, може бути різною.

Споживач паливно-енергетичних ресурсів – фізична або юридична особа, яка здійснює користування паливом і (або) тепловою енергією.

1.2. Стан енергоспоживання та енерговикористання в Україні

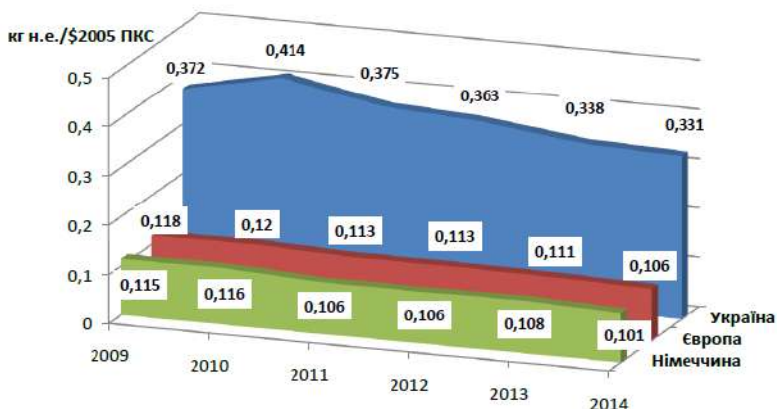
За результатами реалізації завдань ЕСУ планується досягнути зниження енергоемності ВВП більш ніж у два рази до 2035 року.

Порівняно з іншими країнами світу енергоемність ВВП України на сьогодні є досить високою, що визначає низьку конкурентоспроможність економіки. За даними Держенергоефективності енергоемність ВВП України з 2008 по 2012 рік змінювалася в незначній мірі (від 0,635 кг у.п./грн. у 2008 р. до 0,621 кг у.п./грн. у 2012 р., тобто зменшення всього на 2,2 %), що свідчить про недостатню ефективність реалізації політики енергоефективності.

Починаючи з 2014 р., енергоефективність та енергозаощадження стали пріоритетними напрямками подальшого функціонування вітчизняної економіки, проте рівень енергоемності ВВП України за даними Світової енергетичної ради – WEC лишається у 2,5–3 рази вищим, ніж у більшості європейських країн (рис. 1.1).

Рівень енергоемності ВВП України у 2014 році за ПКС у цінах 2005 р. (кг нафтового еквіваленту на 1 дол. США – кг н.е./\$2005): Німеччина – 0,1; Угорщина – 0,12; Польща – 0,13; Чехія – 0,16; Україна – 0,33, що зумовлено переважанням галузей первинної переробки, техніко-технологічною відсталістю основних засобів найбільш енергоемних галузей промисловості.

Порівняльна оцінка показників функціонування енергетичного сектору та інших галузей економіки України й держав Європейського Союзу також свідчить про значне відставання нашої держави у сфері енергетичної ефективності. Наприклад, енергоемність виробництва сталі на українських металургійних комбінатах сягає 518 кг н.е./т, а на меткомбінатах ЄС – у 1,8 разів менше (285 кг н.е./т).



(кг н.е./\$2005 ППС) (* $т н.е. = 4,187 \cdot 10^7 \text{ кДж} = 10 \text{ Гкал} = 1,4286 \cdot 10^3 \text{ кг у.н.}$)

Рисунок 1.1 – Первинна енергоємність ВВП України, порівняно з Європою та Німеччиною, 2009-2014 рр.

До основних чинників, які обумовлюють високу енергоємність виробництва в Україні, слід віднести:

- неефективне й марнотратне споживання ПЕР, зокрема, внаслідок недотримання чинних вимог щодо технологій та обладнання;
- застарілість основних фондів і комунікацій та незадовільні темпи їх оновлення;
- значні втрати енергоресурсів, передусім природного газу, теплової та електроенергії під час їх транспортування, зберігання й розподілу;
- низький рівень впровадження енергоефективних технологій та обладнання (впровадження нових технологічних процесів, зокрема, маловідходних, ресурсозберігаючих і безвідходних, здійснюють не більше 3% загальної кількості промислових підприємств);
- суттєве технологічне відставання української промисловості від рівня розвинених країн;
- високий рівень зношеності основних фондів у економіці (74,9%) і відповідне підвищення питомих витрат ПЕР на

виробництво низки важливих видів продукції в найбільш енергоємних галузях;

- недостатнє використання промислового перероблення відходів, зокрема твердих побутових.

Раціональне споживання енергії, що пов'язане із енергозбереженням, з впровадженням нових технологій, що дозволяють знизити витрати енергії у порівнянні з існуючим рівнем, позитивно впливає одночасно на рішення екологічних проблем по скороченню викидів парникових газів, зниженню вірогідності і інтенсивності кислотних дощів, мінімізації загрози здоров'ю людей.

За індексом енергетичної стійкості Energy Trilemma Index, що розраховується Всесвітньою енергетичною радою (World Energy Council, WEC), Україна у 2015 р. зайняла 110 місце серед 129 країн світу. Індекс WEC присвоюється на основі порівняльного аналізу енергетичної ситуації в країні і ґрунтується на трьох факторах: енергетичної безпеки (Energy Security), доступності електрики для населення (Energy Equity) та екологічності енергетичної галузі (Environmental Sustainability). Найгірші справи в Україні з екологічністю, а також із загальною ефективністю галузі.

Основними чинниками, які перешкоджають на сьогодні зниженню енергоємності ВВП, є:

- високий ступінь фізичної зношеності основних фондів і технологічне відставання в найбільш енергоємних галузях і житлово-комунальній сфері;

- неефективність функціонування природних монополій;

- високий рівень втрат енергоресурсів при їх передачі та споживанні;

- обмеженість стимулів до зниження споживання енергоресурсів за відсутності приладів обліку;

- низький рівень впровадження у промисловості енергоефективних технологій і устаткування.

Таким чином, зниження енергоємності економіки повинно стати однією з пріоритетних цілей державної політики нашої країни.

1.3. Основні напрямки в галузі енергозбереження

1.3.1. Потенціал енергозбереження в Україні

Згідно з ЕСУ на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», яка окреслює стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу, фактор енергозбереження є одним із визначальних для ефективного функціонування національної економіки.

ЕСУ передбачає, що до 2025 року здебільшого буде завершено реформування енергетичного комплексу України, досягнуто першочергових цільових показників з безпеки та енергоефективності, забезпечено його інноваційне оновлення та інтеграцію з енергетичним сектором ЄС.

Виконання завдань ЕСУ у період після 2025 року вимагатиме дещо інших підходів до регулювання енергетики, заснованих на базових принципах, прийнятих країнами ЄС, до розроблення документів стратегічного планування та практичної діяльності з реалізації державної політики в енергетичній сфері.

Зниження енергоємності економіки, а також диверсифікація джерел і шляхів постачання енергоресурсів, нарощування вітчизняного виробництва сприятимуть підвищенню економічної, енергетичної та екологічної безпеки, що призведе до оптимізації енергетичного балансу та дозволить створити міцне підґрунтя для сталого енергетичного майбутнього країни.

Імплементацию ЕСУ передбачено здійснити у три основні етапи:

• **ЕТАП 1-й. Реформування енергетичного сектору (до 2020 року)**

До цього року головні акценти будуть зроблені на впровадженні реформ Реформування енергетичних компаній відповідно до зобов'язань України у межах Договору про заснування Енергетичного Співтовариства, збільшення видобутку газу, зниження енергоємності ВВП та подальший розвиток ВДЕ.

У сфері охорони довкілля має бути забезпечено дотримання високих екологічних норм виробництва, транспортування, трансформації та споживання енергії у рамках Національного плану

скорочення викидів від великих спалювальних установок відповідно до законодавства України та зобов'язань перед Енергетичним Співтовариством.

Очікується досягнути радикального прогресу у сфері ВДЕ через збільшення їх частки у кінцевому споживанні до 11% (8% від ЗППЕ) за рахунок проведення стабільної та прогнозованої політики у сфері стимулювання розвитку ВДЕ та у сфері залучення інвестицій.

• **ЕТАП 2-й. Оптимізація та інноваційний розвиток енергетичної інфраструктури (до 2025 року)**

Другий етап впровадження енергетичної стратегії буде орієнтований на роботу в умовах нового ринкового середовища та фактичної інтеграції ОЕС України з енергосистемою Європи, що суттєво вплине на обґрунтування вибору об'єктів для реконструкції або нового будівництва в енергетичній сфері та на підвищення енергоефективності.

Зокрема на цьому етапі має відбутися:

- формування місцевих систем теплопостачання на основі економічно обґрунтованого врахування потенціалу місцевих видів палива, логістики постачання, регіональної та загальнодержавної енергетичної інфраструктури;

- модернізація та вдосконалення систем обліку;

- розвиток розподіленої генерації.

• **ЕТАП 3-й. Забезпечення сталого розвитку (до 2035 року)**

Третій етап ЕСУ спрямований на інноваційний розвиток енергетичного сектору й будівництво нової генерації. Вибір типу генерації залежатиме від прогнозної цінової кон'юнктури на паливо й інтенсивності розвитку кожного типу генерації, що сприятиме підвищенню рівня конкуренції між ними; від впровадження smart-технологій для вирівнювання піків споживання.

У сфері енергоефективності та охорони довкілля передбачається досягнення цільових показників скорочення викидів SO₂, NO_x та пилу згідно з Національним планом скорочення викидів від великих спалювальних установок.

ВДЕ розвиватимуться найбільш динамічними темпами порівняно з іншими видами генерації, що дозволить збільшити їх частку у структурі ЗППЕ до 25 %.

Результатом виконання програм є досягнення цілей та кількісних і якісних показників, визначених ЕСУ (табл. 1.1, 1.2, 1.3).

Структура загального первинного постачання енергоресурсів

У 2015 році, за даними Державної служби статистики України, структура ЗППЕ характеризувалася високою часткою природного газу 28,9%, (26,1 млн т н.е.). Частка атомної енергетики становила 25,5% (23,0 млн т н.е.); вугілля – 30,4% (27,3 млн т н.е.); сировини нафти та нафтопродуктів – 11,6% (10,5 млн т н.е.); біомаси (біомаса, паливо та відходи) – 2,3% (2,1 млн т н.е.); ГЕС – 0,5% (0,5 млн т н.е.); термальної енергії (термальна енергія доквілля та скидні ресурси техногенного походження) – 0,5% (0,5 млн т н.е.) та ВЕС і СЕС разом – 0,1% (0,1 млн т н.е.). Сумарна частка всіх ВДЕ становила 3,6 млн т н.е., або лише 4%.

Таблиця 1.1 – Ключові показники ефективності ЕСУ у часі

Опис ключового показника ефективності	2015 р.	2020 р.	2025 р.	2030 р.	2035 р.
Підвищення енергоефективності					
Енергоємність ВВП, ЗППЕ у т н.е./тис. дол. ВВП (ПКС)	0,28	0,20	0,18	0,15	0,13
Питомі витрати при виробництві тепла котельнями, кг у.п./Гкал	165	160	155	150	145
Частка втрат у тепломережах, %	>20	<17	<13	<11	<10
Безпека і екологія					
Частка ВДЕ (включно з гідроенергуючими потужностями та термальною енергією) у ЗППЕ, %	4	8	12	17	25
Частка місцевих альтернативних видів палива в місцевих паливно-енергетичних балансах, % до загального споживання	-	10	15	18	20

продовження таблиці 1.1

Зниження викидів в CO ₂ екв. на кінцеве споживання палива, % від 2010 року	-	>5	>10	>15	>20
Частка потужностей у тепловій генерації, що відповідає екологічним вимогам ЄС (викиди SO ₂ , NO _x , золи), %	<1	<10	<40	85	100

Таблиця 1.2 – Структура ЗППЕ України, млн. т. н.е. / %

Найменування джерел первинного постачання енергії	2015 р.	2020 р. (прогноз)	2025 р. (прогноз)	2030 р. (прогноз)	2035 р. (прогноз)
Вугілля	27,3/30,4	18/22	14/16,1	13/14,3	12/12,5
Природний газ	26,1/28,9	24,3/29,3	27/31	28/30,8	29/30,2
Нафтопродукти	10,5/11,6	9,5/11,5	8/9,2	7,5/8,2	7/7,3
Атомна енергія	23,0/25,5	24/29,3	28/32,2	27/29,7	24/25,0
Біомаса, біопаливо та відходи	2,1/2,3	4/7,9	6/6,9	8/8,8	11/11,5
Сонячна та вітрова енергія	0,1/0,1	1/1,2	2/2,4	5/5,5	10/10,4
ГЕС	0,5/0,5	1/1,2	1/1,1	1/1,1	1/1,0
Термальна енергія*	0,5/0,6	0,5/0,6	1/1,1	1,5/1,6	2/2,1
Всього	90,1/100	82,3/100	87/100	91/100	96/100

Примітка: *Термальна енергія доквілля та скидні ресурси техногенного походження

Прогнозні рівні попиту на теплову енергію з урахуванням потенціалу теплозбереження наведено у таблиці 1.3.

З огляду на обмеженість природних ресурсів в Україні, у 2015 році показник імпортозалежності становив, з урахуванням постачання ядерного палива, 51,6%, що становить ризик для енергетичної безпеки. Питання зменшення імпортозалежності –

один із ключових пріоритетів ЕСУ. Прогнозується, що частка імпортованих компонентів у ЗППЕ знизиться до <50% вже до 2020 року та до < 33% у 2025-2035 рр., зокрема, завдяки розвитку ВДЕ; збільшенню власного видобутку природного газу; енергозбереженню та підвищенню енергоефективності з дотриманням високих екологічних стандартів.

Таблиця 1.3 – Прогнозні рівні попиту на теплову енергію та потенціал теплозбереження до 2040 р., млн. Гкал.

Укрупнені види економічної діяльності	Роки					
	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Україна (без населення)	52,2	57,5	65,5	76,4	89,1	98,1
Сільське господарство та складові	2,1	2,5	3,0	3,7	4,4	4,9
Промисловість, у тому числі	36,2	38,5	41,8	46,6	52,5	58,1
Транспорт та складові	1,3	1,5	1,9	2,5	3,1	3,4
Інші секції	12,6	15,0	18,8	23,6	28,6	31,6
Населення (за нормативами)	175,6	168,9	162,1	155,3	154,9	154,6
Україна, населенням	227,8	226,4	227,6	231,7	244,0	252,6
Сумарний потенціал енергозбереження, у т.ч.	0,0	3,4	9,1	15,4	21,7	27,4
-структурний	0,0	2,5	6,5	10,8	14,1	15,8
-технологічний	0,0	0,9	2,7	4,6	7,6	11,5

Головними напрямками підвищення енергоефективності економіки України до 2020 року мають стати:

- повнота та прозорість обліку всіх форм енергії та енергоресурсів;

- підвищення енергоефективності в секторі виробництва і трансформації енергії, насамперед у теплоелектроенергетиці та

централізованому теплопостачанні шляхом оптимізації використання потужностей, технічної та технологічної модернізації;

- скорочення витрат енергії у системах транспортування та розподілу електричної і теплової енергії шляхом технічної, технологічної модернізації та концептуального перегляду схем енергозабезпечення із врахуванням досягнень у сфері децентралізованого енергопостачання, зокрема за рахунок використання ВДЕ та управління енергоспоживанням;

- впровадження на рівні держави, міст, бюджетних та адміністративних будівель та підприємств системи енергетичного менеджменту.

Передбачається стале розширення використання всіх видів відновлюваної енергетики, яка стане одним з інструментів гарантування енергетичної безпеки держави. У коротко- та середньостроковому горизонті (до 2025 року) ЕСУ прогнозує зростання частки відновлюваної енергетики до рівня 12 % від ЗППЕ та не менше 25 % – до 2035 року (включаючи всі гідроенергуючі потужності та термальну енергію).

Зростатиме частка сектору тепло-електроенергетичної галузі, який використовує тверду біомасу та біогаз як енергоресурс, що зумовлюватиметься як відносною сталістю виробництва (за наявності ресурсної бази), так і тенденцією до формування локальних генеруючих потужностей.

Перевага віддаватиметься одночасному виробництву теплової та електричної енергії в когенераційних установках і заміщенню вуглеводневих видів палива.

Другий етап впровадження ЕСУ (до 2025 року) буде орієнтований на роботу в ринкових умовах з більш досконалим конкурентним середовищем, яке впливатиме на вибір типу генерації та на прийняття рішень щодо вибору об'єктів модернізації чи нового будівництва задля досягнення вищих показників енергоефективності. Цей етап передбачає повну інтеграцію ОЕС України з енергосистемою Європи.

У сфері енергоефективності та теплопостачанні планується:

- посилення вимог до обладнання та будівель (стандарти, регламенти, сертифікація тощо);

- запровадження механізмів стимулювання енергоефективності у промисловості і житловій сфері (енергетичний аудит, фінансові інструменти тощо);

- формування місцевих енергетичних систем на основі економічно ефективного врахування потенціалу місцевих видів палива, логістики постачання, регіональної та загальнодержавної енергетичної інфраструктури;

- сприяння реконструкції ділень у тепломережах з метою мінімізації втрат;

- підтримка реалізації проектів з когенерації на ТЕЦ і когенерації на біопаливі.

У сфері відновлюваних джерел енергії планується:

- стимулювання будівництва СЕС та ВЕС;

- уведення в експлуатацію нових агрегатів ГЕС та ГАЕС (за умови підтвердження екологічної безпеки проектів);

- збільшення використання гео- та гідротермальної енергії при генерації теплоенергії;

- збільшення використання біомаси у генерації електро- та теплоенергії;

- створення умов для формування системи з логістичного забезпечення та інфраструктури для збирання біологічної сировини та подальшого її транспортування;

- вивчення можливості та, за доцільністю, впровадження використання систем акумулювання для балансування енергетичної системи, у тому числі з метою нівелювання нерівномірної роботи генеруючих потужностей ВДЕ;

- удосконалення механізму стимулювання виробництва енергетичного устаткування в Україні.

Третій етап стратегії (до 2035 року) спрямований на інноваційний розвиток сектору і будівництво нової генерації. Окрім оптимізації та побудови додаткових потужностей генерації, в довгостроковій перспективі також очікується впровадження низки заходів з оптимізації структури споживання завдяки скороченню втрат у мережах, згладжуванню піків споживання шляхом впровадження smart-grids та використання нових технологій акумулювання енергії.

У сфері перероблення сировини передбачається перехід від «брудних» процесів до технологій, що відповідають принципам «зеленої хімії» та енергозбереження, а також надання переваги залучення побічної продукції та відходів інших галузей.

Передбачається збільшення використання ВДЕ до 25 % від обсягів ЗППЕ завдяки, зокрема, забезпеченню роботи систем теплопостачання на енергії з відновлюваних джерел (біопелети, побутове сміття тощо) та заміщенням вуглецевих видів палива іншими видами там, де це є економічно виправданим і технічно можливим.

1.3.2. Напрямки в галузі енергозбереження у теплотехнологіях

Енергозбереження у теплотехнологіях можна диференціювати за кількома напрямками: в системах електропостачання; у питаннях теплообміну, у теплогенеруючих установках, у теплотехнологіях, а також за рахунок використання вторинних ресурсів та альтернативних джерел енергії.

1. Енергозбереження в системах електропостачання включає системи освітлення, електротехніки і електроніки, електричні мережі, електричні машини і апарати, системи електрохімзахисту обладнання і трубопроводів промислових підприємств.

2. Енергозбереження у питаннях теплообміну базується на законах теплопровідності, конвективного, променевого і складного теплообміну. Теплотехніка – є галуззю знань, що вивчає теорію і технічні засоби перетворення енергії природних джерел у теплову, механічну і електричну енергії, а також теорію і засоби використання теплоти як для опалення, вентиляції, гарячого водопостачання, так і технологічних потреб промисловості. Енергозбереження охоплює питання інтенсифікації теплопередачі у теплообмінних апаратах, стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності при різних граничних умовах, при внутрішньому тепловиділенні і наявності фільтрації, теплообміну випромінюванням між тілами і у газах, при кипінні і конденсації. Вивчення законів перетворення теплоти в інші види енергії і теплообміну дозволяють опанувати основи роботи різних теплових,

теплогенеруючих і теплотехнологічних установок, теплових двигунів і нагнітачів.

3. Енергозбереження в теплогенеруючих установках розглядає питання розрахунку парових і водогрійних котельних агрегатів, геліоустановок, геотермальних установок, котлів-утилізаторів, теплонасосних установок. Розробка методик розрахунку теплогенеруючих установок, горіння, теплового балансу, топкових камер, конвективних поверхонь нагріву, витрати палива, дозволяють вибрати найбільш економічний і заощадливий варіант роботи теплогенератора.

4. Енергозбереження в теплових мережах стосується питань підвищення якості води для систем теплопостачання, використання сучасних теплообмінників на теплових пунктах, установки приладів витрати води і обліку теплоти, застосування сучасних технологій теплової ізоляції.

5. Енергозбереження у теплотехнологіях охоплює розробку критеріїв енергетичної оптимізації при виробництві, передачі або збереження теплової енергії, балансу теплоти, інтенсифікації процесів теплопередачі, сучасних способів спалювання палива, використання паротурбінних, газотурбінних, холодильних установок, теплових насосів і теплових труб, ефективної теплової ізоляції, розробку методик розрахунку техніко-економічних показників.

6. Енергозбереження в будинках і спорудах будується на збереженні теплоти у системах опалення, вентиляції і кондиціонування повітря. Енергозбереження в будинках і спорудах охоплює різні пристрої: тришарове або тепловідбивне (в інфрачервоному випромінюванні) осклінні, додаткового утеплення зовнішніх огорожень, теплоізоляції стін за опалювальним приладом. Крім того, для енергозбереження в будинках і спорудах можливе застосування повітряного опалення від геліоустановок, а також з використанням теплонасосних установок і енергії низького потенціалу (конденсату, води, повітря).

В промислових будинках і спорудах в додаток до цього можливе застосування газових інфрачервоних випромінювачів, періодичного режиму опалення, локального обігріву робочих

площадок теплою рециркуляційного повітря з верхньої зони приміщення.

7. Енергозбереження за рахунок використання альтернативних (нетрадиційних і відновлюваних) джерел енергії охоплює застосування сонячних колекторів і електростанцій, теплових насосів, геліоустановок, фотоелектричних і вітроенергетичних установок.

8. Енергозбереження за рахунок використання ВЕР потребує застосування паливних, теплових і ВЕР надлишкового тиску. Паливні ВЕР – відходи технологічних процесів термічної переробки сировини, горючі міські і сільськогосподарські відходи. Теплові ВЕР – теплоносії, що здатні при певних умовах виділяти тепло. ВЕР надлишкового тиску – гази і рідини, що залишають технологічні апарати з надлишковим тиском і здатні передати іншому теплоносію частину накопиченої потенційної енергії перед скиданням в навколишнє середовище. Енергозбереження за рахунок використання ВЕР включає утилізацію теплоти відхідних топкових газів і повітря, установок контактних теплообмінників, використання холодильних установок як нагрівачів води, використання теплоти сепараторів пари і пари вторинного кипіння конденсату, рециркуляції сушильного агента.

Особливо важливе місце у питаннях енергозбереження належить проведенню енергетичного аудиту (ЕУ) та впровадження енергетичного менеджменту (ЕМ) на підприємствах.

1.4. Енергетичний аудит і енергетичний менеджмент

1.4.1. Енергетичний аудит і методи його проведення

Кінцева мета підвищення енергетичної ефективності будь-якого виробництва (підприємства) – знизити рівень споживання енергії за умови зберігання обсягів виробництва з одночасним скороченням негативного впливу на навколишнє середовище. Для цього треба прийняти відповідні рішення щодо стратегії використання різних ресурсів на підставі ЕУ та ЕМ.

ЕУ – це технічне інспектування підприємств (виробництв) з погляду їх енергоспоживання з метою визначення можливої

економії енергії і допомоги підприємству (виробництву) в економії енергії на практиці завдяки механізмам енергетичної ефективності, а також з метою впровадження на підприємстві енергетичного менеджменту. Проведення ЕУ є початковою фазою впровадження на підприємстві системи енергетичного менеджменту.

ЕУ та енергетичному обстеженню підлягають всі підприємства, організації і фірми незалежно від організаційно-правових форм і форм власності. Практика проведення ЕУ показує, що при вирішенні проблем енергозбереження та ліміту споживання енергоресурсів ЕУ достатньо проводити в два етапи: експрес-обстеження і поглиблені енергетичні обстеження. При цьому попередньо складається програма ЕУ, для чого збирають основні характеристики обстежуваного підприємства: загальні відомості, організаційна структура; схема і склад основних споживачів (будівель) за видами енергоресурсів; встановлені потужності підрозділів, асортимент продукції, що випускається або продукції, що продається (пари, електроенергії, гарячої води); ціни (тарифи) на енергоресурси.

За результатами експрес-обстеження визначають стан енергетичного господарства підприємства і нераціональні втрати енергії, оцінюють за укрупненими показниками енергетичний баланс підприємства, визначають основні напрямки зниження енергетичних витрат.

При проведенні поглиблених обстежень крім зазначеного вище проводять порівняння фактичних і нормованих витрат енергії на технологію, опалення, вентиляцію, гаряче водопостачання, власні потреби, оцінюють можливий потенціал енергозбереження при використанні різних енергозберігаючих заходів.

Мета ЕУ: визначення ефективності використання теплової і електричної енергії, оцінка потенціалу підприємств, розробка ефективних схем та заходів раціонального і ефективного використання енергетичних ресурсів. ЕУ дозволяє зробити висновок про ефективність використання різних видів енергії, контролювати або лімітувати потреби в паливно-енергетичних ресурсах підприємств і організацій і тим самим реалізує ідею енергозаощадження.

ЕУ передбачає наступні методологічні етапи:

1) первинний огляд статистичної, документальної та технічної інформації за всіма видами енергетичної діяльності підприємства і складання програми ЕУ;

2) метрологічне (інструментальне) і термографічне обстеження всіх споживачів теплової та електричної енергії;

3) дослідження енергетичного балансу підприємства;

4) обробка отриманої або зібраної інформації і аналітичний огляд за всіма видами енергетичної діяльності підприємства;

5) оцінка енергоефективності теплотехнічного, теплоенергетичного і теплотехнологічного устаткування, теплогенеруючих установок, систем опалення та вентиляції, гарячого водопостачання, паропостачання, збору і повернення конденсату, холодопостачання, електропостачання, використання вторинних енергоресурсів;

6) розробка основних рекомендацій і заходів щодо енергозбереження, обліку палива, води, електричної та теплової енергії;

7) оформлення звіту і складання енергетичного паспорта.

Енергоефективність теплотехнологій охоплює розробку критеріїв енергетичної оптимізації при виробництві, передачі або заощадженні теплової енергії, балансу теплоти, інтенсифікації процесів теплопередачі, сучасних способів спалювання палива, використанні холодильних установок, теплових насосів і теплових труб, ефективної теплової ізоляції.

Енергоефективність відновлюваних джерел енергії спирається на застосуванні сонячних колекторів, теплових насосів, геліоустановок, фотоелектричних і вітроенергетичних установок.

Енергоефективність ВЕР вимагає використання паливних, теплових і ВЕР надлишкового тиску. Енергозбереження за рахунок використання ВЕР включає утилізацію теплоти відхідних топкових газів і повітря, установки контактних теплообмінників, використання теплоти конденсації холодильних установок, використання теплоти сепараторів пари і пари вторинного скипання конденсату, рециркуляцію сушильного агенту.

Енергоефективність систем стисненого повітря на підприємствах оцінюється відношенням потужності компресора, необхідної для підтримання тиску в системі стисненого повітря в

період, коли підприємство не працює, до середньої потужності компресора в період його роботи. Енергоефективність оцінюється за обсягами споживання стисненого повітря і можливих місць витоків, роботою клапанів на компресорах, систем охолодження компресорів, систем регулювання подачі повітря в залежності від навантажень, температури всмоктуваного повітря і температури стисненого повітря.

Енергоефективність холодильних установок на підприємствах оцінюється шляхом дослідження: характеристик електроприводів компресорів, вентиляторів і насосів (ККД, коефіцієнт завантаження, $\cos \phi$), системи регулювання температури у споживача, дотримання параметрів холодильного агенту, стану теплоізоляції трубопроводів і камер, витрати охолоджуючої води і її температури на вході і виході.

1.4.2. Енергетичний менеджмент та його зв'язок з енергоаудитом

Проведення ЕА повинно бути початком впровадження на підприємстві енергетичного менеджменту ЕМ. ЕМ – це методологічна наука з практичним інструментарієм для здійснення процесу управління використанням енергії, тобто планування, організації (впровадження), мотивації, контролю оптимального використання всіх видів і форм енергії при доцільному задоволенні потреб людини (організації) і мінімальному негативному впливі на навколишнє середовище. ЕМ є ефективною системою, яка побудована відповідно циклового принципу. Вона складається з наступних етапів:

- Перший етап – запуск системи, що звичайно є проведення ЕА, в результаті якого керівництво підприємства матиме уяву про ситуацію, яка склалася в енергетичному секторі підприємства.

- Другий етап – порівняльний аналіз рівнів споживання енергоресурсів з ключовими цифрами з довідкової літератури, даними інших підприємств тощо.

- Третій етап – визначення фактичного стану. На цьому етапі отримуються результати аналізу, які дозволяють вибрати пріоритети у використанні проектів зі збереження енергії.

- Четвертий етап – розробка бюджету використання обраних проєктів. Цей бюджет будується на відомих цифрах питомого споживання енергії на підприємстві.

- П'ятий етап – контроль за реалізацією тих рівнів споживання енергоресурсів, які вказані у бюджеті. На даному етапі виявляють додаткові споживачі енергії і проводять аналіз причин, через які вони виникають.

На цьому цикл замикається і може починатися наступний, тобто відбувається аналогічна процедура знову.

Такі системи енергетичного аудиту та менеджменту працюють на більшості підприємств, які випускають конкурентоздатну продукцію в країнах ЄС.

В процесі впровадження ЕМ визначають потоки матеріалів у різних виробничих процесах, особливо з точки зору споживання енергії (матеріали можуть бути розігрітими, охолодженими тощо) і створюють карту споживання енергії в різних виробничих процесах підприємства, а також в різних допоміжних установках і системах. Ця робота починається з основних найбільш енергоємних виробничих процесів, а потім переходить до створення детальної карти виробничих процесів і використання в них енергії.

Контрольні питання

1. Чинники високої енергоємності виробництва в Україні.
2. Що охоплює зміст енергозбереження у теплотехнологіях?
3. Що охоплює зміст енергозбереження з використання відновлюваних джерел енергії?
4. Що охоплює зміст енергозбереження з використанням ВЕР?
5. Яке місце у питаннях енергозбереження належить проведенню енергетичного аудиту?
6. Яка мета енергетичного аудиту?
7. Які методологічні етапи передбачає проведення енергетичного аудиту?
8. Як пов'язаний енергоаудиту з енергетичним менеджментом?

2. НАПРЯМКИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ І ОЦІНКА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

2.1. Пріоритетні напрямки енергозбереження у промислових галузях

У промисловості більше 2/3 потенціалу енергозбереження знаходиться у сфері споживання найбільш енергоємними галузями – хімічної і нафтохімічної, паливної, будівельних матеріалів, машинобудування, чорної металургії, лісової, деревообробної і целюлозно-паперової, харчової і легкої промисловості.

Значні резерви економії ПЕР у цих галузях обумовлені недосконалістю технологічних процесів і обладнанням, схем енергоспоживання, недостатнім впровадженням нових енергозберігаючих і безвідходних технологій, рівнем утилізації ВЕР, неефективним завантаженням енергообладнання, низьким оснащенням приладами обліку, контролю і регулювання технологічних і енергетичних процесів, низьким рівнем експлуатації обладнання, будинків і споруд.

Важливим резервом економії палива для теплотехнологічних процесів є підвищення ефективності роботи котельних і ТЕЦ. Основними шляхами підвищення ефективності є: поліпшення водного режиму котлів, головним чином в результаті повного повернення з виробництва конденсату і поліпшення його якості; встановлення палиникових пристроїв у відповідності з паропродуктивністю котлів; забезпечення безаварійної роботи систем автоматики; технічне переоснащення котельних на основі впровадження сучасних котлів, зокрема біокотлів, оснащених системою автоматики живлення і горіння.

Машинобудівництво і металургія

Приблизно третина всього котельно-пічного палива, що використовується у машинобудівництві, використовується на потреби ливарного, ковальсько-пресового і термічного виробництва. На технологічні потреби використовується близько половини всієї споживаної теплоти.

Основними споживачами енергоресурсів у машинобудівництві є мартенівські печі, вагранки, плавильні печі,

тягодуттєві машини (вентилятори і димососи), нагрівальні печі, сушарки, прокатні стани, гальванічне обладнання, пресове господарство.

Причинами малої ефективності використання палива і енергії у галузях машинобудування є низький технічний рівень пічного господарства, висока металоємність виробів, великі відходи металу при його обробці, незначний рівень рекуперації скидної теплоти, нераціональна структура енергоносіїв.

Більше половини резервів економії енергоресурсів може бути реалізовано у процесі плавки металів і ливарного виробництва. Решта економії пов'язана з удосконаленням процесів металообробки, в тому числі за рахунок розширення використання менш енергоємних у порівнянні з металом полімерів та інших конструкційних матеріалів.

Частка затрат на паливо і енергію у загальних затратах на виробництво продукції чорної металургії складає близько третини. Найбільш крупними споживачами палива у галузі є доменне і прокатне виробництво, найбільш енергоємними – феросплавне, гірськорудне, прокатне, найбільш теплоємним – коксохімічне виробництво.

Основними напрямками енергозбереження у цих галузях є:

- застосування ефективних футеровочних і теплоізоляційних матеріалів у пічах, сушарках і теплопроводах;
- впровадження енергозберігаючих лакофарбувальних матеріалів (зі зниженою температурою сушіння);
- зниження енерговитрат при металообробці;
- зниження енергоємності литва за рахунок зменшення браку.

Хімічна і нафтохімічна промисловість

В цих галузях промисловості існує різновид технологічних процесів, при яких споживається або виділяється велика кількість теплоти. Вугілля, нафта і газ використовуються як паливо, так і як сировина.

Основними напрямками енергозбереження в цих галузях є:

- застосування високоефективних процесів горіння у технологічних печах і апаратах;
- встановлення рекуператорів для підігріву рідини;

- застосування заглибних газових пальників для заміни парового розігріву негорючих рідин;
- підвищення ефективності процесів ректифікації (оптимізація технологічного процесу з використанням теплових насосів, підвищення активності і селективності каталізаторів);
- зниження втрат палива і сировини у низькотемпературних процесах.

Значним резервом економії енергоресурсів у нафтохімічній промисловості є утилізація ВЕР, в тому числі впровадження котлів-утилізаторів для виробництва пари і гарячої води з метою утилізації теплоти високопотенційних газових викидів.

Серед промислових виробництв випуск мінеральних добрив є одним з найбільш енергоємних. Енергетичні затрати у собівартості окремих видів продукції цієї галузі складають приблизно третю частину. Підвищення енергетичної ефективності пов'язано з необхідністю розробки принципово нових видів обладнання, заснованих на застосуванні фізико-хімічних і фізико-механічних впливів на технологічні процеси, в тому числі тепломасообмінних апаратів.

Виробництво будівельних матеріалів

Виробництво високоякісних будівельних матеріалів засновано на вогневих процесах, що пов'язані з витратою значної кількості різного палива. При цьому коефіцієнт корисного використання палив у галузі не перевищує 40 %.

Найбільша кількість енергоресурсів всередині галузі будівельних матеріалів споживається при виробництві цементу. Найбільш енергоємним процесом у виробництві цементу є відпал клінкера.

У виробництві бетону енергоощадним впровадженням є застосування теплогенераторів для тепловологісної обробки залізобетону; у виробництві цегли – впровадження методу вакуумованих автоклавів на цегляних заводах, а також обпалювальних печей панельних конструкцій для виробництва цегли.

Необхідні організація випуску будівельних та ізоляційних матеріалів і конструкцій, що знижують тепловтрати через огорожувальні конструкції, і розробка та впровадження системи

заходів по використанню потенціалу місцевих видів палива для обпалу кераміки.

У скляній промисловості тепловий ККД полум'яних скловарних печей, які є основними споживачами палива, не перевищує 20-25 %. Найбільші енергетичні втрати відбуваються через огорожувальні конструкції печей (30-40 %) і з відхідними газами (30-40 %). Головні задачі у галузі енергозбереження скляної промисловості полягають у підвищенні ККД скловарних печей, заміщенні дефіцитних видів органічного палива і в утилізації ВЕР.

У лісовій, паперовій і деревообробній промисловості основними напрямками енергозбереження є:

- впровадження економічних агрегатів для сушки тріски і виробництва плит з деревинної тріски;

- розробка і впровадження нових економічних способів виробництва паперових виробів, включаючи виробництво паперу із синтетичним волокном;

- збільшення виробництва меблів менш енергоємними способами із застосуванням нових видів матеріалів;

- утилізація теплоти вентиляційних викидів та низькопотенційної теплоти пароповітряних сумішей;

- розробка і впровадження обладнання по виробництву і використанню генераторного газу з деревинних відходів для одержання теплової і електричної енергії;

- переобладнання сушильних камер із живленням від електричної енергії на застосування деревинних та інших відходів.

Основні напрямки енергозбереження у *легкій промисловості*:

- удосконалення технологічних процесів обпалу виробів;

- впровадження теплообмінників-утилізаторів, що використовують теплоту сушильного агенту від обладнання підприємств легкої промисловості.

У сільському господарстві близько половини економії енергії може бути забезпечено в результаті впровадження енергозберігаючих машин, технологічних процесів і обладнання.

Переважна частка потенціалу енергозбереження приходить на підвищення економічності роботи сільськогосподарської техніки, скорочення споживання ПЕР тваринницькими фермами і тепличними господарствами за рахунок поліпшення теплофізичних

характеристик огорожувальних конструкцій, утилізації низькопотенційних ВЕР, оптимізації енергобалансів у сполученні з використанням нетрадиційних джерел (біогаз тощо), зниження витрати палива на сушку зерна, застосування економічних котлів замість електричних, застосування відходів (соломи тощо) замість традиційних видів палива.

Основні напрямки енергозбереження у сільському господарстві поряд із створенням нової техніки наступні:

- удосконалення технології сушки зерна і кормів, методів застосування мінеральних і органічних добрив;

- розробка і впровадження систем використання відходів рослинництва і тваринництва в енергетичних цілях, а також для виробництва добрив і кормових добавок;

- використання теплоти вентиляційних викидів тваринницьких приміщень для підігріву води і обігріву приміщень для молодняка (із застосуванням пластинчастих рекуператорів);

- забезпечення оптимальних температурних режимів і секціонування системи опалення тваринницьких приміщень;

- застосування теплових насосів в системах теплохолодозабезпечення;

- будівництво біогазових установок.

У харчовій промисловості до числа найбільш енергоємних відноситься виробництво цукру і спирту. Основна економія енергоресурсів у цукровому виробництві може бути досягнута в результаті удосконалення технологічних схем і цілеспрямованого впровадження енергозберігаючого обладнання, використання низькопотенційної теплоти вторинної пари випарних і вакуум-кристалізаційних установок і конденсатів у теплових схемах.

Заходи по зниженню витрати палива та енергії у хлібопекарській промисловості в основному спрямовані на удосконалення печей. При цьому одним з перспективних напрямків у розвитку пічної техніки є застосування рециркуляції продуктів згоряння у каналній системі обігріву хлібопекарських печей. Встановлено, що у системах обігріву хлібопекарських печей з рециркуляцією продуктів згоряння частка тепла, що передається випромінюванням, складає від 10 до 50% всієї переданої теплоти.

Тому зростає роль конвективного теплообміну у каналах, вибору оптимального коефіцієнта рециркуляції і конструкції каналів.

Одним з ефективних рішень задачі зниження питомих витрат палива є застосування розвинених поверхонь теплообміну (трубчастих) у каналах, що обігріваються, та інтенсифікації конвективного теплообміну у пекарній камері.

З підвищенням поверхні каналів, що обігріваються, зростає передача теплоти від теплоносія у камеру пекарні, знижується температура і втрати теплоти з відхідними газами.

З підвищенням площі теплопередавальної поверхні каналів, що обігріваються, знижується температура поверхні каналів і температура середовища, при якій відбувається випічка хліба. Все це приводить до зниження втрат теплоти у пекарній камері печі. Таким чином, у печах з каналами, що мають розвинену поверхню, суттєво знижується питома витрата палива у зв'язку зі зниженням втрат теплоти з відхідними газами у пекарній камері.

2.2. Енергетична ефективність теплотехнологічної установки

Промисловий теплотехнологічний комплекс є одним з основних споживачів паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) країни. Одні тільки високотемпературні теплотехнологічні системи, за рівнем прямого споживання палива, конкурують з ТЕС країни.

Теплотехнологічні системи мають низький ККД використання палива (не більше 15 ... 35%), але в той же час мають великий потенціал в економії палива. Так, підвищення середнього ККД паливних печей у 2 рази призведе до річної економії палива, що приблизно у 35-40 раз перевищує планову економію палива у виробництві електроенергії на ТЕС.

Недоліки промислових теплотехнологічних систем:

- низька інтенсивність процесів тепло- і масообміну і ефективність застосовуваних теплотехнічних принципів;
- значні матеріальні втрати через недосконалість теплових схем;
- недосконалість конструктивних схем огорожі технологічних камер і установок;

- обмеженість застосування прогресивних джерел енергії;
- відсутність органічного ув'язування технологічного, енергетичного, експлуатаційного аспектів теплотехнологічних систем з завданнями охорони довкілля.

Подолання перерахованих недоліків можливо тільки шляхом розробки нових науково-методологічних, науково-організаційних, технологічних, енергетичних основ. Це особливо актуально при реалізації нових і докорінної модернізації діючих теплотехнологічних систем.

Ідеальною теплотехнологічною системою може бути установка, в основі якої лежить повна і одночасна реалізація принципів безвідходної технології, яка характеризується:

- економним і високоефективним використанням ПЕР;
- застосуванням замкнутих циклів промислового використання води, пара, конденсату;
- забезпеченою охороною навколишнього середовища.

Вибір ефективних напрямків енергетичної модернізації діючих установок істотно залежить від значення відношення потоку теплоти через огороження технологічної камери до потоку теплоти, що поглинається оброблюваним матеріалом у цій камері. Найвищий результат по економії палива і підвищенню ККД може мати місце тільки при одночасному зниженні цього відношення і найбільш повної регенерації теплоти відхідних газів.

2.3. Показники ефективності роботи теплотехнологічних установок

2.3.1. Нормалізація енергоспоживання

Одне з головних питань, яке виникає в практичній роботі з енергозбереженням на будь-якому промисловому об'єкті (підприємстві, підрозділі або окремій енергоустановці) – це питання про те, чи раціонально використовується енергія на даному об'єкті.

Щоб відповідь на питання, що цікавить нас, була об'єктивною, очевидно, необхідно ґрунтуватися на використанні конкретних кількісних показників. Узагальнено їх можна назвати показниками ефективності енергопостачання-енергоспоживання. Такі показники

повинні відображати корисну витрату і втрати одного або декількох видів енергії як при здійсненні виробничих процесів, так і в процесах перетворення, передачі й розподілу енергії.

Наявність таких показників дає можливість зіставляти їх з аналогічними величинами, досягнутими на подібних вітчизняних або зарубіжних підприємствах. Таке порівняння дозволяє робити висновки про те, чи раціонально використовується енергія на тому або іншому промисловому об'єкті, а також зробити попередній висновок про можливість і економічну доцільність вирішення завдань енергозбереження на даному об'єкті.

Наявність відповідних показників повинна дозволити контролювати енергетичну ефективність кожної зі стадій процесу енергопостачання-енергоспоживання.

Для оцінки енергетичної ефективності таких процесів повинні бути показники ефективності перетворення енергії (наприклад, ККД теплотехнологічної установки, питома витрата палива на вироблення одиниці продукції тощо). Ці показники характеризують частину перетворюваної енергії, яка зберігається в перетвореному енергоносії. Їх завдання полягає у виразі співвідношення між вхідною енергією, що виходить, а також в оцінці втрат перетворення.

Подібно до показників перетворення енергії повинні бути показники: передачі, що характеризують ефективність і розподіл енергії. Такі показники можуть бути названі показниками ефективності розподілу енергії. Їх зміст аналогічний до показників ефективності перетворення енергії (наприклад, ККД, коефіцієнт питомих втрат у мережах тощо).

Для всіх основних і допоміжних виробничих процесів, де спожита енергія перетворюється на корисну енергію, використану для зміни форми або стану предмета праці, необхідно визначати показники ефективності використання енергії (наприклад, ККД агрегату, питома витрата енергії тощо.). Показники ефективності використання енергії служать для контролю за раціональністю споживання енергії і дотриманням оптимальних параметрів технологічного процесу. Крім того, вони також утворюють основу для планування енергоспоживання промислових підприємств, їх підрозділів, окремих потужних агрегатів.

В процесі вирішення завдань енергозбереження, крім визначення показників ефективності використання енергії для здійснення

практичного енергозбереження на будь-якому промисловому підприємстві дуже важливо оцінювати також енергетичну ефективність перетворення і розподілу енергії.

Таким чином, коло показників ефективності енергопостачання-енергоспоживання, що реально використовуються на цей час, досить обмежене. Фактично можна виділити усього два різновиди таких показників:

- показники типу ККД (ККД, коефіцієнт питомих втрат);
- показники питомої витрати енергії.

Проте ні перша, ні друга групи показників не дозволяють дати однозначну відповідь на запитання про ефективність використання енергії на певному промисловому об'єкті. Для цього необхідна ще наявність якогось еталона, з яким можна було б порівнювати фактичні значення відповідних показників. Для показників типу ККД існує принаймні ідеальне їх значення, з яким можна зіставити реальні їх величини. Проте таке порівняння практично нічого не дає з погляду оцінки резервів економії енергії, оскільки повна відсутність втрат, відповідна ідеальному значенню ККД, просто неможливе. Ще гірша справа з показниками питомої витрати енергії – вони не мають ідеального значення. Однак, для цих показників також необхідно встановити еталон, тобто деяке значення, порівнюючи з яким фактичні величини відповідних показників, можна було б говорити про рівень ефективності енерговикористання на даному об'єкті. Для цього існує третій різновид показників ефективності енергопостачання-енерговикористання, який називається «нормою питомої витрати енергії». Процес встановлення таких норм називається нормалізацією енергоспоживання.

Під нормалізацією витрати енергії розуміють процес встановлення планової величини її витрати на одиницю продукції або виконання одиниці роботи (тобто встановлення планової величини питомої витрати енергії).

Значення нормалізації енергоспоживання в промисловості дуже велике. По-перше, визначаючи науково обґрунтовані норми питомої витрати енергії, ми створюємо базу для розрахунку потреби в енергії різних виробничих об'єктів: підприємств, їх підрозділів, окремих агрегатів і технологічних процесів. З іншого боку, норми питомої витрати енергії дозволяють об'єктивно оцінювати ефективність

енерговикористання в умовах обсягу, що змінюється, і асортименту продукції, що випускається окремими агрегатами, цехами або підприємствами.

Таким чином, метою нормалізації споживання енергії в промисловості є:

- забезпечення раціонального й економного витрачання енергії у виробництві;
- встановлення початкових величин для планування енергоспоживання.

При цьому основним завданням нормалізації енергоспоживання (тобто способом досягнення поставлених цілей) є розроблення і використання у виробництві технічно і економічно обґрунтованих, прогресивних норм питомої витрати енергії.

Під нормою питомої витрати енергії розуміють об'єктивно необхідну величину її споживання на виробництво одиниці продукції, або виконання одиниці роботи встановленої якості в конкретних, прогресивних умовах виробництва. Іншими словами, норма питомої витрати енергії є максимально допустимою величиною споживання енергії в даних умовах виробництва. Приклад норм питомих витрат ПЕР та теплової енергії при виробництві продукції та їх методика розрахунку наведені у додатку А.

Нормалізація енергоспоживання органічно пов'язана з удосконаленням як виробництва, так і самого енергогосподарства підприємства. Разом з тим встановлення норм питомої витрати енергії засноване також на енергетичному обліку, контролі та аналізі енерговикористання, і утворює спільно з ними планову комплексну систему робіт, що систематично проводяться, забезпечують ефективне використання енергоресурсів.

Досвід виробництва показує, що без вирішення завдання нормалізації енергоспоживання, практичне енергозбереження неможливе.

Класифікація норм питомої витрати енергії може бути зображена у вигляді схеми, наведеної на рисунку 2.1.

Незважаючи на різноманітність видів норм витрати енергії, до всіх без винятку норм ставляться практично однакові вимоги. Основні з цих вимог свідчать, що норми питомої витрати енергій повинні:

- бути технічно й економічно обґрунтованими;

- розроблятися на єдиній методичній основі для всіх рівнів планування і для всієї номенклатури виробленої продукції, видів робіт, що виконуються в тій або іншій галузі;
- враховувати конкретні умови виробництва, досягнення науково-технічного прогресу, а також плани організаційно-технічних заходів, спрямованих на підвищення ефективності використання енергії;
- систематично переглядатися з урахуванням зміни техніки, технології та організації виробництва, технічного стану технологічного й енергетичного обладнання та інших чинників, що впливають на споживання енергії;
- сприяти максимальній мобілізації внутрішніх резервів економії енергії і підвищення ефективності її використання.

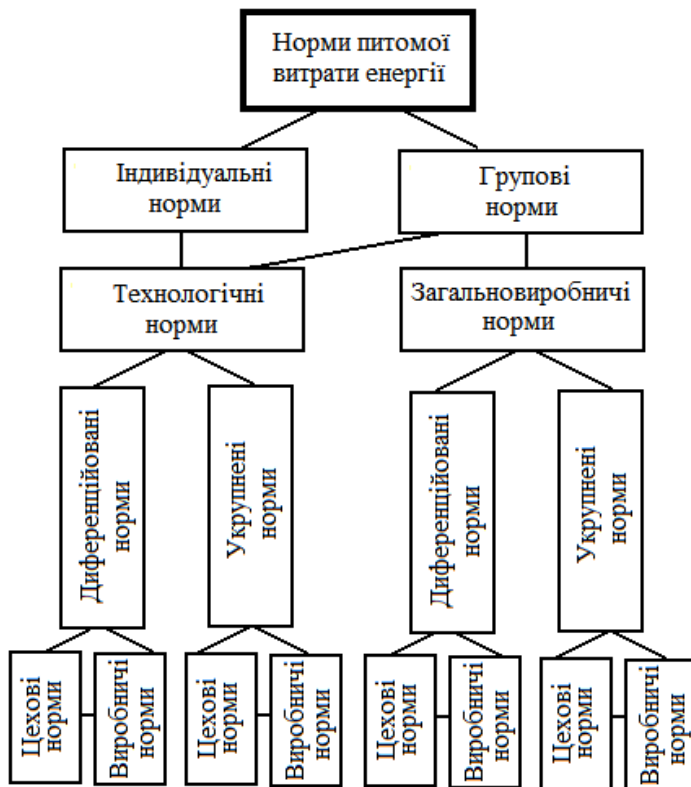


Рисунок 2.1 - Види норм питомої витрати енергії

2.3.2. Енергетичні баланси та їх різновиди

Основним методом планування та аналізу енерговикористання в промисловості є енергетичні баланси. Вони дозволяють встановлювати необхідні величини і співвідношення між споживанням, виробництвом і отриманням енергоресурсів.

Під енергобалансом розуміють систему взаємозв'язаних показників, які відображають кількісну відповідність між надходженням і використанням всіх видів енергетичних ресурсів. Він є основним узагальненим документом для комплексного аналізу використання енергоресурсів і планування заходів щодо підвищення ефективності енергоспоживання. Таким чином, розроблення енергобалансів дозволяє створити науково-технічну основу для нормалізації енергоспоживання в промисловості.

Існує декілька різновидів енергобалансів. Класифікують їх за двома основними ознаками.

Залежно від масштабу вирішення завдань, від об'єктів складання енергетичні баланси підрозділяються на баланси окремих агрегатів, груп агрегатів або установок і баланси окремих технологічних процесів, ділянок, цехів, промислових підприємств.

Баланси агрегатів і установок складаються з метою аналізу ефективності енерговикористання у виробництві, встановлення раціональних режимів їх роботи, а також для розроблення обґрунтованих, прогресивних норм питомої витрати енергії на одиницю продукції, яка випускається відповідними агрегатами.

За своїм призначенням енергобаланси підрозділяються на фактичні і планові. Фактичні баланси є звітними і відображають існуючий стан використання енергії зі всіма виправданими і невинуватими її витратами і втратами при реально досягнутих значеннях питомої витрати енергії.

Планові (перспективні) показники енергобалансу, у свою чергу, необхідно підрозділити на нормалізовані і раціональні. Нормалізовані енергобаланси розробляються на основі фактичних балансів з урахуванням прогресивних норм і нормативів втрат і корисного використання енергії. Такі енергобаланси відображають потенційно можливий рівень ефективності енергоспоживання, щодо якого

виявляються резерви і намічаються заходи щодо економії енергоресурсів.

Раціоналізовані енергобаланси також складаються на основі фактичних балансів, але з урахуванням проведення всіх реально можливих у даних умовах виробництва заходів щодо зниження корисної витрати та інших втрат енергії.

Енергетичний баланс будь-якого вигляду містить дві частини: прибуткову і витратну. Кожна з частин балансу полягає, у свою чергу, з однієї або декількох статей. Статті прибуткової частини балансу відображають види енергоресурсів і джерела їх надходження (від енергозабезпечувальної організації, від власної генеруючої установки і таке інше). Статті витратної частини балансу відображають об'єкт або напрям використання енергії, а також види її втрат. При цьому питома вага статей у загальній величині надходження або витрати енергії, виражена у відсотках, характеризує структуру відповідно прибутковій або витратній частині енергобалансу.

Таким чином, енергетичні баланси агрегатів і установок є одним з основних інструментів вирішення завдань енергозбереження. Зокрема, складання і аналіз енергобалансів дозволяють:

- виявити зайві втрати енергії і розробити заходи щодо їх усунення;
- визначити напрямки реконструкції морально і фізично застарілого обладнання;
- обґрунтувати вибір найбільш економічних видів і параметрів енергоносіїв, використаних у виробничих процесах;
- обґрунтувати величину і режими енергоспоживання;
- вибрати раціональні схеми енергопостачання установок.

2.3.3. Енергобаланси агрегатів і форми їх подання

Первинною ланкою у виробництві та енергопостачанні на промислових підприємствах є технологічна операція (простий технологічний процес), здійснюваний на певному агрегаті (приймачі, перетворювачі або генератори енергії). Тому складання та аналіз енергобалансів окремих агрегатів мають дуже важливе значення для вирішення завдання підвищення ефективності енерговикористання на підприємстві.

У прибутковій частині енергобалансу агрегату показується енергія, що підводиться до нього одним або декількома енергоносіями, а у витратній частині - корисна енергія, її втрати і вихід вторинних енергоресурсів. При цьому під корисною розуміють ту частину енергії, яка витрачається на основній, і неминуче пов'язані з ним побічні фізико-хімічні процеси. Виняток становлять перетворювачі і генератори енергії, для яких корисна енергія є відповідно перетвореною або виробленою енергією.

Втрати енергії в балансах енергоустановок показуються у вигляді окремих їх елементів. Це поліпшує аналіз енергобалансу і пошук шляхів скорочення втрат. Для зручності аналізу втрати енергії доцільно групувати не за їх фізичним значенням (втрати на нагрівання тощо), а за місцем їх виникнення.

Розповсюдженим способом визначення енергетичних затрат на виробництво будь-якої продукції є розрахунок годинної витрати теплоти, або потужності за рівнянням теплового балансу такого виду, кДж/кг:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q'_1 + Q'_2 + \dots + Q'_n, \quad (2.1)$$

де Q_1, Q_2, \dots, Q_n – джерела надходження теплоти в установку; Q'_1, Q'_2, \dots, Q'_n – втрати теплоти установкою.

Ліва частина останнього рівняння відповідає кількості теплоти, що надходить в установку від різних джерел енергії, а права частина цього рівняння виражає витрату теплоти, що виноситься з установки. З рівняння витікає основне визначення теплового балансу – скільки теплоти ввійшло в установку, стільки ж теплоти з неї і вийде.

Рівняння теплового балансу тепломасообмінної установки, що виражено у відсотках, має вид:

$$\begin{aligned} 100\% &= \frac{Q'_1}{\sum_1^n Q_n} 100\% + \frac{Q'_2}{\sum_1^n Q_n} 100\% + \dots + \frac{Q'_n}{\sum_1^n Q_n} 100\% = \\ &= q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n. \end{aligned} \quad (2.2)$$

У промисловості найбільш розповсюдженою є оцінка витрати теплової енергії за затратами теплоти, віднесеними до одиниці продукції, що випускається. Рівняння при цьому має наступний вид:

$$\frac{Q_1}{G_M} + \frac{Q_2}{G_M} + \dots + \frac{Q_n}{G_M} = \frac{Q'_1}{G_M} + \frac{Q'_2}{G_M} + \dots + \frac{Q'_n}{G_M}, \quad (2.3)$$

де G_M – продуктивність тепломасообмінної установки по продукції, яка випускається, кг/год.

Останнє рівняння, що виражене в питомих затратах теплоти на одиницю виробленої продукції має вид:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n, \quad (2.4)$$

Для сушильних установок характерна оцінка ефективності їх роботи по питомим витратам теплоти, віднесених до годинної витрати вологи, що випаровується. Рівняння при цьому має вид:

$$\frac{Q_1}{M} + \frac{Q_2}{M} + \dots + \frac{Q_n}{M} = \frac{Q'_1}{M} + \frac{Q'_2}{M} + \dots + \frac{Q'_n}{M}, \quad (2.5)$$

де Q_1, Q_2, \dots, Q_n – приходні статті теплового балансу, кДж/год; Q'_1, Q'_2, \dots, Q'_n – витратні статті теплового балансу, кДж/год; M – витрата вологи, що випаровується у сушильній установці, кг/год.

Більшість технологічних операцій і простих технологічних процесів у промисловості є процеси перетворення енергії одного вигляду в інший. Тому при складанні енергобалансів агрегатів, як правило, виникає необхідність порівняння різних видів енергії, їх приведення до однієї одиниці вимірювання.

Енергобаланси агрегатів оформляють у вигляді таблиць (табл. 2.1) або діаграм (рис. 2.2). Причому цифри балансу відносять або до певної продуктивності агрегату (його навантаження), або до одиниці продукції, що виробляється ним (основної сировини, що витрачається). Цифри енергобалансу можуть бути віднесені також до деякого періоду часу (змiна, доба і таке iнше).

Визначення числових значень статей енергобалансу, що входять в його прибуткову частину, як правило, не становить труднощів.

Таблиця 2.1 – Енергобаланс агрегату в табличній формі

№ п/п	Статті енергобалансу	Енергія	
		кДж/кг	%
1	Надходження енергії		
	Підведена енергія	300	100
	Разом	300	100
2	Витрата енергії		
	Корисна енергія	120	40
3	Втрати енергії, зокрема:	180	60
	а) з відхідними газами	100	33,3
	б) у зовнішнє середовище	80	26,7
	Разом	300	100

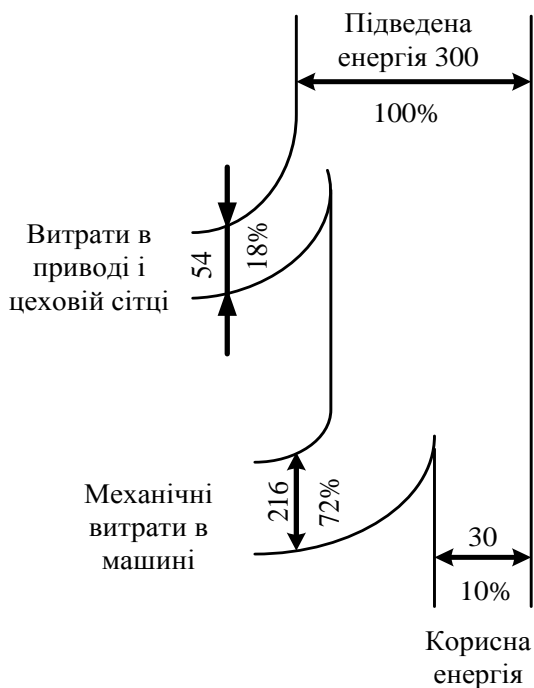


Рисунок 2.2 - Енергобаланс агрегату у вигляді діаграми

Надходження енергії в агрегат найчастіше здійснюється від якогось одного джерела і враховується за допомогою відповідних вимірювальних приладів. Значно складніше зі встановленням числових значень статей витратної частини енергобалансу. Тут можливі два шляхи: визначити тим або іншим способом величину корисної витрати енергії, а її втрати встановлювати як різницю між підведеною енергією і її корисною витратою, або навпаки, знайти способи визначення величини втрат енергії, а через неї обчислювати корисну витрату енергії в агрегаті. Кориснішим є другий шлях, оскільки для аналізу енерговикористання і підвищення його ефективності необхідно знати, перш за все, величину втрат енергії в агрегаті за окремими їх складовими. Крім того, другий спосіб складання енергобалансу є найбільш можливим, оскільки далеко не завжди можна знайти способи безпосереднього визначення корисної витрати енергії в агрегаті. У зв'язку з цим для складання енергобалансів агрегатів дуже важливо знати, які існують види втрат енергії в енергоустановках, які причини викликають їх появу і як величина втрат енергії залежить від навантаження агрегату.

Втрати енергії в устаткуванні можуть бути найрізноманітнішими, але за причинами, що їх викликають, за характером їх залежності від навантаження агрегатів втрати енергії можна розділити на чотири групи (рис. 2.3).

Першу групу утворюють втрати розсіяння енергії, обумовлені перебуванням обладнання у ввімкненому стані. Втрати цієї групи не залежать від навантаження і можуть бути названі умовно постійними (наприклад, втрати енергії в навколишнє середовище, окремі різновиди втрат механічної енергії в устаткуванні тощо). При незмінних технологічних параметрах операції постійні втрати енергії в устаткуванні залежать, в основному, від його технічного стану, тобто від справності обладнання, ступеня його зносу, чистоти тощо.

Таким чином, зниження постійних втрат енергії може бути досягнуте шляхом поліпшення технічного стану обладнання, підвищення якості його ремонтного обслуговування.

Другу групу втрат утворюють втрати розсіяння енергії, що обумовлені ходом операції і залежать від її інтенсивності (тобто від навантаження обладнання).

До третьої групи входять втрати, обумовлені фізичними особливостями технологічних операцій і ступенем недосконалості обладнання. Ці втрати також залежать від навантаження агрегату, тобто це теж втрати навантажень (вони характерні в основному для теплоенергетичного обладнання і практично завжди пов'язані з виходом вторинних енергетичних ресурсів). Втрати енергії другої і третьої груп можуть мати як близький до лінійного, так і складніший характер залежності від навантаження обладнання.

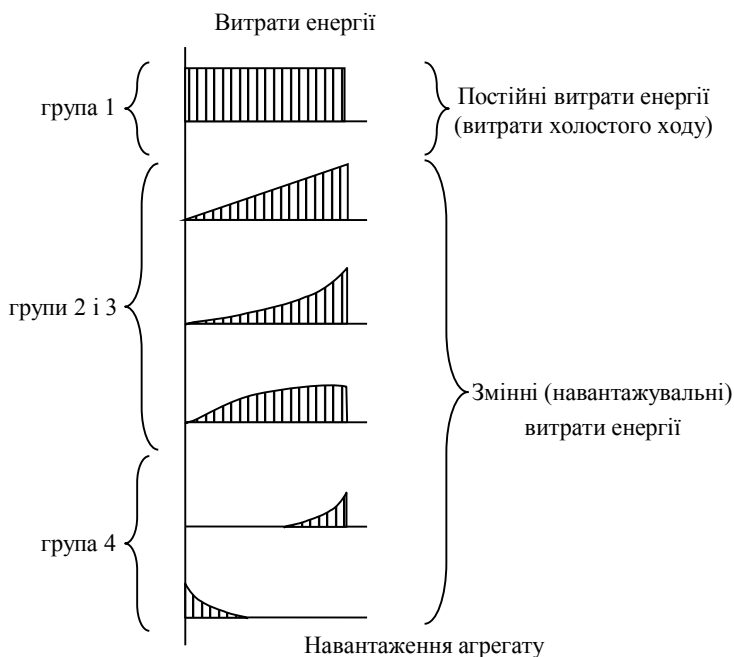


Рисунок 2.3 – Види втрат енергії в агрегатах та їх залежність від навантаження обладнання

До четвертої групи входять додаткові втрати енергії, пов'язані з неможливістю забезпечення нормального ходу технологічного процесу в зонах малого навантаження і зонах форсованого режиму роботи обладнання. Це також змінні або навантажені втрати енергії.

З рисунку 2.3 видно, що всі види втрат енергії в агрегатах, окрім втрат першої групи, є змінними. Величина таких втрат енергії залежить від технологічних параметрів операції, від технічного стану обладнання,

від енергетичної ефективності технологічного процесу, а також від якості експлуатаційного обслуговування агрегатів.

Таким чином, одним із найбільш важливих питань під час складання витратної частини енергобалансу будь-якого агрегату є вивчення всіх видів втрат енергії, які мають місце у даному обладнанні або технологічному процесі, а також знаходження методів і способів визначення їх величини.

2.3.4. Показники енергоефективності агрегатів

ККД енергетичної установки можна виразити через відношення корисно використаної теплоти $Q_{кор}$ до всієї підведеної теплоти $Q_{під}$:

$$\eta = \left(\frac{Q_{кор}}{Q_{під}} \right) 100\%, \quad (2.6)$$

Для нагріву матеріалу без зміни його фазового стану корисно витрачена теплота розраховується за формулою

$$Q_{кор} = G_m c_m (t_1 - t_0), \quad (2.7)$$

де G_m – продуктивність тепломасообмінної установки, кг/год;
 c_m – теплоємність матеріалу, кДж/(кг·К); t_0 , t_1 – початкова і кінцева температури матеріалу, К.

Для газоподібних середовищ корисна теплота визначається:

$$Q_{кор} = L(H_1 - H_0), \quad (2.8)$$

де L – масова витрата газоподібного середовища, кг/год; H_0, H_1 – початкова і кінцева ентальпії середовища, кДж/кг.

Підведена теплота розраховується за формулою

$$Q_{під} = B_n Q_p = B_n (Q^H + c_n t_n + \alpha V_n^0 c_n t_n), \quad (2.9)$$

де B_n – витрата палива, кг/год; Q_p – розрахункова теплота згоряння палива, кДж/кг; Q'' – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг; c_n – теплоємність палива, кДж/(кг·К); t_n – температура палива, °С; α – коефіцієнт надлишку повітря; V_n^0 – теоретичний об'єм повітря, м³/кг; c_n – теплоємність повітря, кДж/(м³ · К) t_n – температура повітря, °С.

Для оцінки ефективності роботи теплотехнологічних установок, як і для енергетичних, може застосовуватись ККД, який дорівнює відношенню корисно використаної теплоти до всієї підведеної.

На підставі рівняння теплового балансу вираз для ККД теплотехнологічної установки запишеться у виді:

$$\eta = \frac{Q_{кор}}{\sum_1^n Q_{ндо}} 100\% = \frac{(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n) - (Q'_1 + Q'_2 + \dots + Q'_n)}{\sum_1^n Q_{ндо}} 100\% \quad (2.10)$$

Якщо у тепловій схемі теплотехнологічної установки передбачені пристрої для рекуперації теплоти, то тоді коефіцієнт використання підвищується за рахунок зниження втрат теплоти в навколишнє середовище.

На підставі виконаного аналізу теплового балансу теплотехнологічної установки розроблюються інженерні заходи по скороченню втрат теплоти, а також поверненню в теплову схему установки частини відпрацьованої теплової енергії.

Розрахунки переважно зводяться до визначення економії палива ΔB , яка розраховується за формулою, кг/год:

$$\Delta B = \left(\frac{\Delta Q}{Q'' \cdot \eta} \right) 100\%, \quad (2.11)$$

де ΔQ – економія теплової енергії за рахунок впровадження енергозберігаючих технологій, кДж/год; η – ККД вироблення теплової енергії.

Для паливних енергетичних і теплотехнологічних апаратів ефективність спалювання палива при заданих умовах характеризується коефіцієнтом використання палива $k_{ен}$, який

дорівнює відношенню максимально можливого використання теплоти до всієї теплоти, яка виділяється при його спалюванні:

$$k_{\text{вп}} = \frac{Q^{\text{н}} + Q_{\text{фп}} + Q_{\text{ф.пов}} - (Q_{\text{відх}} + Q_{\text{хм}} + Q_{\text{навк}})}{Q^{\text{н}} + Q_{\text{фп}} + Q_{\text{ф.пов}}} 100\%, \quad (2.12)$$

де $Q_{\text{фп}}$ – фізична теплота палива, кДж/кг; $Q_{\text{ф.пов}}$ – фізична теплота повітря, кДж/кг; $Q_{\text{відх}}$ – теплота відхідних газів, кДж/кг; $Q_{\text{хм}}$ – втрати теплоти від хімічної і механічної неповноти згоряння, кДж/кг; $Q_{\text{навк}}$ – втрати теплоти в навколишнє середовище, кДж/кг.

Енергозбереження також може характеризуватися витратами теплової і електричної енергії на одиницю продукції, що виробляється, кВт/кг:

$$q = \frac{N_e}{G}, \quad (2.13)$$

де N_e – витрата енергії, кВт·год;

G – кількість продукції, що виробляється, кг/год.

Для оцінки енергетичної ефективності промислових установок часто користуються питомою витратою умовного палива ϵ_n , який дорівнює відношенню витрати палива B_n до продуктивності установки G_y , кг палива/кг продукції:

$$\epsilon_n = \frac{B_n}{G_y}, \quad (2.14)$$

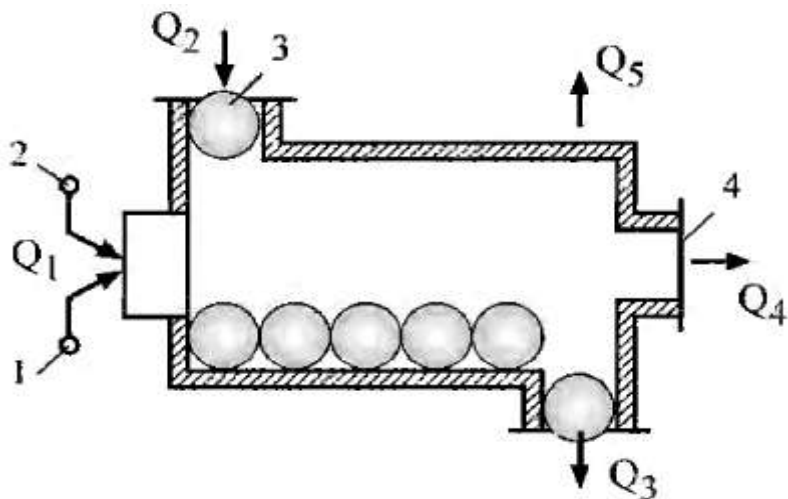
На рисунку 2.4 наведена схема розподілу теплових потоків для нагріву заготовок у тепломасообмінній установці, на прикладі роботи якої показано розрахунок показників використання теплоти.

Рівняння теплового балансу для даної установки має вид, кДж/год:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (2.15)$$

де Q_1 – теплота, що надходить у робочу камеру з паливом і повітрям; Q_2 – теплота, що надходить в робочу камеру з матеріалом; Q_3 – теплота нагрітого матеріалу; Q_4 – тепловтрати з відхідними газами; Q_5 – тепловтрати в навколишнє середовище.

Технологічний ККД для даної установки дорівнює відношенню теплоти, що витрачається на нагрівання виробу, до підведеної в установку:



1 – подача повітря; 2 – подача палива; 3 - заготовка; 4 – відхідні гази

Рисунок 2.4 – Схема тепломасообмінної установки для нагріву виробів.

$$\eta_m = \frac{Q_3 - Q_2}{Q_1 + Q_2} 100\%. \quad (2.16)$$

Енергетичний ККД являє собою відношення використаної теплоти продуктів згоряння до всієї підведеної в установку теплоти:

$$\eta_e = \frac{Q_1 - (Q_4 + Q_5)}{Q_1 + Q_2} 100\%. \quad (2.17)$$

Відносні втрати з відхідними газами – це відношення втрат теплоти з відхідними газами до всієї затраченої теплоти, що підведена в установку:

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_1 + Q_2} 100\%. \quad (2.18)$$

Відносна витрата теплоти з нагрітим матеріалом – це відношення втрат теплоти з нагрітим матеріалом до всієї підведеної в установку теплоти:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_1 + Q_2} 100\%. \quad (2.19)$$

Відносні втрати теплоти в навколишнє середовище – це відношення втрат теплоти в навколишнє середовище через стінки установки до всієї підведеної в установку теплоти:

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_1 + Q_2} 100\%. \quad (2.20)$$

Контрольні питання

1. Основні напрямки енергозбереження у машинобудівництві і металургії, агропромислового комплексу.
2. Які основні недоліки у теплотехнологічних установках?
3. Назвіть заходи, що сприяють досягненню високих енергоекономічних показників теплотехнологічних установок.
4. На чому засновано принцип складання теплового балансу будь-якої теплотехнологічної установки?
5. Назвіть втрати теплоти у теплотехнологічній установці?
6. Як визначається ККД енергетичної установки?
7. Як визначається ефективність спалювання палива?
8. Як визначається питома витрата умовного палива для теплотехнологічних установок?

3. ЗАГАЛЬНІ ЗАХОДИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ У ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВКАХ

3.1. Використання вторинних енергетичних ресурсів

Глибока і повна утилізація ВЕР в даний час є одним з найбільш ефективних шляхів підвищення рентабельності енергогосподарств промислових підприємств, оскільки в деяких галузях економіки (хімічна, целюлозно-паперова, м'ясна, молочна промисловість, машинобудування, чорна металургія тощо) ВЕР складають від 20 до 70% обсягів енергії, що споживаються. При існуючому рівні цін на енергоресурси витрати на створення установок по використанню ВЕР у 2-3 рази менше витрат на закупівлю еквівалентного за енергетичним потенціалом палива. Раціональне використання ВЕР зменшує розміри енергоспоживання, що призводить до зниження вартості основної технологічної продукції.

Під ВЕР розуміють енергетичний потенціал відходів продукції, побічних і проміжних продуктів, що утворюються у теплотехнологічних установках, який може бути частково або повністю використаний для енергопостачання інших установок або у агрегаті, який його створив.

Економія ПЕР може бути реалізована в двох напрямках. По-перше, за рахунок удосконалення технологічних процесів і апаратів (нових енергозберігаючих технологій), завдяки чому досягається підвищення ККД і знижується витрата палива і енергії. По-друге, за допомогою утилізації ВЕР, які неминуче виникають при виробництві, і за рахунок яких можна отримати 30 - 35% заощадження ПЕР.

Енергетичні відходи, які повертаються назад на вхід в технологічний агрегат, називаються ВЕР внутрішнього використання, а ВЕР, що утилізуються в інших установках – зовнішнього використання. Сам технологічний агрегат, який є джерелом енергетичних відходів, називається джерелом ВЕР.

ВЕР поділяються на три види:

1. *Горючі ВЕР* – ресурси, що мають хімічну енергію, які можуть бути використані як паливо. До них відносять відходи:

промисловості, побутові відходи (в тому числі каналізаційні стоки); лісового та сільського господарства (деревина, залишки рослинного і тваринного походження, агропромислові стоки).

2. *Теплові ВЕР* – ресурси, що мають фізичну теплоту (відхідні гази технологічних агрегатів; нагріта основна, побічна і проміжна продукція; робочі теплоносії систем охолодження; відпрацьовані у технологічних і силових установках гаряча вода і пара).

3. *ВЕР надлишкового тиску* – ресурси, що мають потенціальну енергію (гази і рідини, що залишають технологічні агрегати з надлишковим тиском).

ВЕР можуть використовуватися за такими напрямками:

- паливному – з використанням непридатних до подальшої переробки горючих відходів як паливо;
- тепловому (холодильному) – при використанні або генеруванні в утилізаційних установках теплоти;
- силовому – з використанням механічної і електричної енергії, що виробляється за рахунок ВЕР;
- комбінованому – для виробництва теплоти (холоду), електричної або механічної енергії.

Широке застосування теплоти ВЕР знаходить для процесів, що протікають в основних технологічних установках всередині цеху або підприємства.

Всі теплові процеси представляють собою передачу теплоти від теплоносія з більш високою температурою до теплоносія з меншою температурою, що супроводжується зниженням «якості» теплової енергії, яка відводиться. Не можна стверджувати про рівність потенціалів двох потоків теплоносія з однаковою тепловою потужністю Q , але різними температурами.

Для більш ефективного використання теплових ВЕР доцільно застосовувати метод термодинамічного аналізу (другого закону термодинаміки), що дозволяє виявляти в будь-якій системі вузли з найбільшою необоротністю теплових процесів. Найбільшого поширення набув ексергетичний метод термодинамічного аналізу, який враховує не тільки кількість, але і якість енергоносіїв (температуру, тиск тощо), що використовуються в системі.

Згідно другому закону термодинаміки, теплота не може повністю перетворюватися в роботу. Тоді якість теплових ВЕР

визначається ексергією E - максимальною кількістю теплоти, яка може бути перетворено в роботу:

$$E = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q, \quad (3.1)$$

де T_0 - температура навколишнього середовища, К; T - температура теплових ВЕР, К; Q - потужність теплових ВЕР, Дж.

Ексергетичний ККД утилізації теплових ВЕР приблизно можна визначити за формулою:

$$\eta_{екс} = \frac{1 - T_0 / T_2}{1 - T_0 / T_1}, \quad (3.2)$$

де T_1 - температура теплових ВЕР на вході в утилізатор, К; T_2 - температура одержаного теплоносія на виході з утилізатора, К.

Використання представленої вище формули для визначення ексергії теплових ВЕР допустимо, якщо температура процесу не змінювалась. Тому для більшості процесів в схемах утилізації теплоти питома ексергія потоку речовини визначається за формулою:

$$e = \frac{E}{G} = \Delta h - T_0 \Delta S, \quad (3.3)$$

де G - масова витрата речовини, кг/с; Δh і ΔS - зміна ентальпії і ентропії речовини при охолодженні його від температури T до температури навколишнього середовища T_0 .

З ексергетичного методу впливають правила підвищення термодинамічної ефективності утилізації теплових ВЕР, а саме, необхідно:

- 1) прагнути до зниження різниці температур між середовищами;
- 2) уникати проміжних ступенів перетворення теплоти;
- 3) уникати змішування середовищ з різними температурами і організовувати двоступеневу схему підігріву.

З першого правила випливає висновок, що при розробці ефективних систем необхідно прагнути до збільшення коефіцієнта теплопередачі і поверхні теплообміну. Деякі процеси мають дуже низький ексергетичний ККД навіть при сучасних технічних рішеннях. Так, низьке значення ексергетичного ККД парового котла викликано, перш за все, необоротністю процесів горіння і низькою ефективністю теплообміну між продуктами згорання та водою, що нагрівається.

Друге правило випливає з того, що в кожному теплообмінному процесі незворотно втрачається ексергія, і чим таких процесів більше, тим більше втрати і матеріальні витрати.

Згідно з третім правилом, при використанні теплоти двох потоків газів з різними температурами неприпустимо їх попереднє змішування (рис. 3.1, а) перед подачею в теплообмінник. При змішуванні потоків з різною температурою відбувається незворотний процес передачі теплоти від потоку з високою ексергією до потоку з нижчою ексергією, тобто знижується загальний ексергетичний потенціал потоків.

Якщо змішуються робочі тіла мають різні температури, тиску, складу або концентрації, то процеси змішування супроводжуються втратами ексергії, які складаються з втрат по кожному параметру. Змішування робочих тіл, які відрізняються лише температурами, широко застосовується в промислових установках.

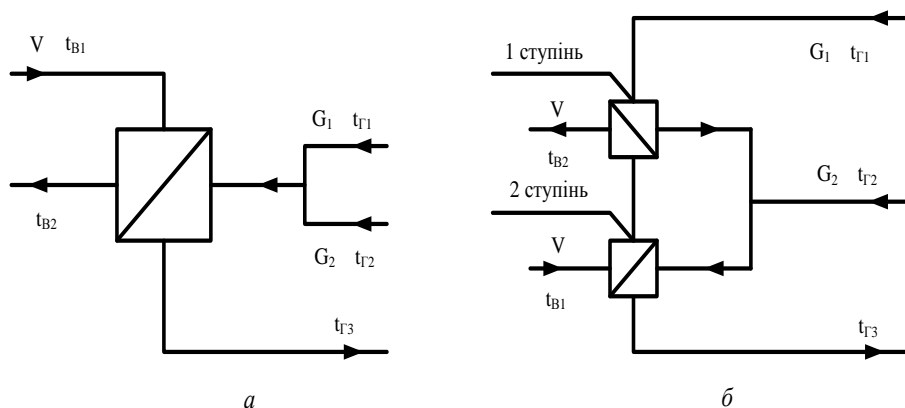


Рисунок 3.1 - Одноступенева (а) і двоступенева (б) системи утилізації теплоти

У розглянутому випадку використання теплоти двох потоків відхідних газів з різними температурами більш ефективнішим є застосування двоступеневого теплоутилізатора (рис. 3.1, б).

У першій ступені теплоутилізатора відбувається попереднє охолодження потоку відхідних газів з більш високою температурою ($t_{21} > t_{22}$), а у другій – охолодження суміші потоків відхідних газів. Величина поверхні теплообміну першої ступені визначається температурою охолодження високотемпературного потоку газів до температури другого потоку газів t_{22} .

3.2. Організація систем рециркуляції

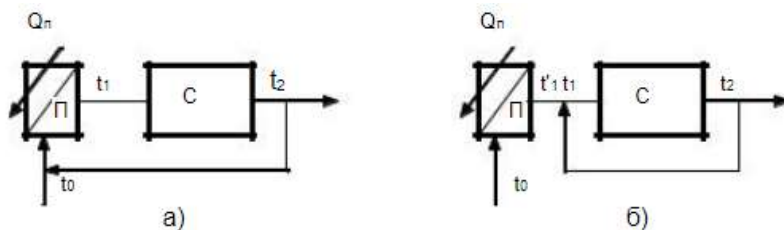
Ще одним засобом економії енергоресурсів і підвищення енергетичного ККД теплотехнологічних установок є застосування систем рециркуляції. Наприклад, при застосуванні рециркуляції у промислових печах частина відпрацьованих паливних газів безперервно відсмоктується вентилятором з робочої камери і через димохід направляється на змішування з димовими газами, що виходять з топки.

Таки чином можна забезпечити регулювання температури топкових газів печі або усунути негативний вплив надлишку або нестачі подачі повітря.

Перспективним напрямком в економії палива і енергії при зневодненні вологих матеріалів є не раціональне використання теплоти відхідного сушильного агенту у різних утилізаційних установках, а скорочення цього виду втрат. Останнє може бути досягнуто за рахунок рециркуляції частини відпрацьованого сушильного агенту, що скорочує його витрату у десятки разів.

Так, на рисунку 3.2 показані можливі схеми організації рециркуляції повітря як сушильного агенту в сушильній установці.

При застосуванні варіанту *а* частина відпрацьованого повітря повертається в зону перед підігрівником так, що весь сушильний агент (свіже і відпрацьоване повітря) підігрівається до температури на вході до сушарки. При застосуванні варіанту *б* частина відпрацьованого повітря подається в зону після підігрівника, змішується з нагрітим свіжим повітрям і далі подається безпосередньо на сушіння.



Π – підігрівник; C – сушильна камера

Рисунок 3.2 – Принципові схеми конвективних сушильних установок з регенерацією (сушильний агент – повітря).

Найбільше розповсюдження одержала схема *a*, яка на відміну від схеми *б* дозволяє підігрівати весь сушильний агент до більш низьких температур.

3.3. Пасивні методи енергозбереження

При транспортуванні теплоносія втрачається значна кількість його теплоти. В окремих випадках ці втрати досягають 50%. Це пов'язано з незадовільною тепловою ізоляцією і витокм теплоносія.

Втрати теплоти при транспортуванні теплоносіїв пов'язані з їх охолодженням, а при використанні пари з'являються додаткові втрати, зумовлені конденсацією. У загальному випадку при транспортуванні втрати теплоти в навколишнє середовище можна розрахувати за даними вимірів на основі рівняння теплового балансу:

$$Q = Gc_p(t_1 - t_2) = rG_k, \quad (3.4)$$

де G - масова витрата однофазного енергоносія (пара або рідина), кг / с; c_p - питома теплоємність теплоносія при постійному тиску, Дж / (кг·К); t_1 і t_2 - температура теплоносія відповідно на вході і виході розглянутої ділянки мережі; r - теплота конденсації, Дж/кг; G_k - витрата сконденсованого теплоносія, кг/с.

Втрати теплової енергії надземним теплопроводом в навколишнє середовище можна оцінити на підставі рівняння

теплопередачі. При цьому тепловий потік зручно віднести до довжини теплопроводу l . Тоді:

$$Q = q_l \cdot l = k_l \cdot \Delta t \cdot l, \quad (3.5)$$

де q_l - лінійна щільність теплового потоку, Вт/(м·К); k_l - лінійний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·К); $\Delta t \approx t_T - t_{nc}$ температурний напір, °С; t_T - середня температура теплоносія на досліджуваній ділянці теплопроводу, °С; t_{nc} - температура навколишнього середовища, °С.

Теплоізоляційними називають матеріали, коефіцієнт теплопровідності яких при $T = +50 \dots 100$ °С менше 0,23 Вт / (м · К). До них відносять: шлакову вату, совеліт, вермекуліт, азбест та інші. При виборі ізоляції необхідно враховувати механічні властивості (щільність, міцність), здатність поглинати вологу, витримувати високу температуру, а також вартість теплоізоляційного матеріалу.

Припустимо, що гаряча рідина (всередині трубопроводу) має температуру T_{f1} і коефіцієнт тепловіддачі α_1 , а холодна рідина (навколишнє середовище) зовні трубопроводу - температуру T_{f2} і коефіцієнт тепловіддачі α_2 . Коефіцієнти теплопровідності матеріалу стінки та ізоляції відповідно рівні - λ_m та λ_{iz} . Діаметри двошарової циліндричної системи - d_1 , d_2 і d_3 , а товщина шару теплоізоляції - δ_{iz} . Відповідно співвідношення: $d_3 = d_2 + 2\delta_{iz}$ або $d_3 - d_2 = 2\delta_{iz}$.

Теплопередача і термічні опору циліндричних систем в зоні ізольованого трубопроводу II і голого трубопроводу I визначаються за відомими формулами:

$$Q_{II} = \frac{\pi L (T_{f1} - T_{f2})}{R_{II}}, \quad (3.6)$$

$$Q_I = \frac{\pi L (T_{f1} - T_{f2})}{R_I}, \quad (3.7)$$

$$R_{II} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{gum}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}, \quad (3.8)$$

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}, \quad (3.9)$$

Різниця термічних опорів ізолюваного II і голого I трубопроводів дозволяє отримати вираз:

$$R_{II} - R_1 = \frac{1}{2\lambda_{вим}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3} - \frac{1}{\alpha_2 d_2}, \quad (3.10)$$

В отриманій формулі приведемо до спільного знаменника останні два доданки і з урахуванням цього отримаємо різницю термічних опорів:

$$\begin{aligned} \Delta R = R_{II} - R_1 &= \frac{1}{2\lambda_{вим}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \left(\frac{d_2 - d_3}{\alpha_2 d_2 d_3} \right) = \\ &= \frac{1}{2\lambda_{вим}} \ln \frac{d_3}{d_2} - \frac{2\delta_{вим}}{\alpha_2 d_2 d_3} = A - B. \end{aligned} \quad (3.11)$$

З отриманого співвідношення випливає, що різниця термічних опорів ΔR ізолюваного і голого трубопроводу може бути зі знаком (+) або (-). Це означає, що ізолюваний трубопровід при певних фізичних умовах може втрачати теплоти менше або більше, ніж у цих же умовах втрачає гола труба. При великих значеннях добутку $\alpha_2 \cdot d_3 \cdot d_2$ накладання ізоляції сприяє зменшенню втрат теплоти. І навпаки, при малих значеннях добутку $\alpha_2 \cdot d_3 \cdot d_2$ накладання ізоляції призводить до збільшення втрат теплоти у порівнянні з неізолюваним трубопроводом.

В дійсності діаметр d_3 завжди більше d_2 , комплекс А і В змінюється від нуля до нескінченності, а значення товщини ізоляції $\delta_{из}$, діаметрів d_3 і d_2 впливають на зміну і комплексу А, і комплексу В. Знайти значення товщини ізоляційного шару, відповідного критичної точки, коли $A = B$, можна, прирівнявши вираз (а) до нуля.

Очевидно, що для зниження теплових втрат потрібно, щоб термічний опір R_{II} ізолюваного трубопроводу був вище, ніж

неізолюваного RI , тобто має виконуватися нерівності $\Delta R > 0$ або $A > B$.

Підставляючи (а) в нерівність $\Delta R > 0$ і вирішуючи його відносно значення λ_{i3} , d_2 і α_2 , отримаємо:

$$\lambda_{i3} < \frac{\alpha_2 d_2}{2}. \quad (3.12)$$

Якщо коефіцієнт теплопровідності теплової ізоляції λ_{i3} , що застосовується, задовольняє нерівності (б), то матеріал обраний правильно і ізоляція рентабельна. Якщо умова (б) не виконані і обраний матеріал теплоізоляції з $\lambda_{i3} > \alpha_2 \cdot d_2 / 2$, то при його нанесенні на трубопровід теплові втрати будуть не знижуватися, а навпаки, збільшуватися.

При неправильному виборі матеріалу ізоляції λ_{i3}^* найбільші теплові втрати мають місце при значенні діаметра ізоляції

$$d_{3кр} = d_{i3}^* = d_{кр} = 2 \frac{\lambda_{i3}^*}{\alpha_2}. \quad (3.13)$$

Останнє співвідношення називають критичним діаметром теплової ізоляції. Критичний діаметр теплової ізоляції d_{i3}^* повинен бути якнайменше і тому як утеплювач, повинен застосовуватись матеріал, який має мінімальне значення коефіцієнта теплопровідності λ_{i3} . Однак теплоізоляція з малим значенням коефіцієнта теплопровідності зазвичай має високу вартість.

Найчастіше для зниження теплопередачі через конструкції використовують менш ефективну і дешеву ізоляцію, а її якість компенсують збільшенням товщини шару δ_{i3} . Це є абсолютно незаощадливим кроком, оскільки при певній товщині шару недорогої і малоефективної теплоізоляції втрати теплоти досягнуть максимуму і лише тільки при ще більш товстому шарі ізоляції почнуть поступово знижуватися. Ізолювання об'єкта (трубопроводів) таким матеріалом слід вважати нерентабельним, а ізоляцію з більш товстим шаром – абсурдним.

Слід зазначити, що в структуру критичного діаметра теплової ізоляції d_{iz}^* входять тільки коефіцієнт теплопровідності ізоляції λ_{iz} і коефіцієнт тепловіддачі α_2 , без впливу трубопроводу (голого або ізольованого) і його діаметра d_2 . Це положення не завжди і не відразу сприймається і тому замість поняття «критичний діаметр» для тих же цілей можна використовувати поняття «критична товщина шару» - $d_{кр}$, яке повинно бути пов'язана з діаметром d_2 неізольованого трубопроводу і коефіцієнтом тепловіддачі α_2 .

Очевидно, що якщо діаметр оголеного трубопроводу d_2 буде менше критичної товщини шару $d_{кр}$, даної ізоляції, то така ізоляція нерентабельна. Якщо ж діаметр оголеного трубопроводу d_2 дорівнює або більше критичної товщини шару $d_{кр}$ даної ізоляції, то така ізоляція рентабельна. Причому, чим більше діаметр трубопроводу d_2 , тим більше теплоізоляційних матеріалів, які будуть рентабельні для нього.

Навпаки, для трубопроводу малого діаметру важче знайти рентабельну ізоляцію, а трубопроводи дуже малих діаметрів, що віддають теплоту до нерухомого повітря (при природній конвекції), краще зовсім не ізолювати.

Один і той же теплоізоляційний матеріал може бути рентабельним для трубопроводу діаметром d_2 і виявитися зовсім нерентабельним для трубопроводу меншого діаметра d_2^* . Тому для розрахунків завжди необхідно порівнювати d_2 і $d_{кр}$.

Розглянемо приклад нанесення ізоляції з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{iz} = 0,2$ Вт / (м · К) на неізольований трубопровід з зовнішнім діаметром $d_2 = 0,025$ м при коефіцієнті тепловіддачі системи в навколишнє середовище $\alpha_2 = 8$ Вт / (м² · К).

Використовуючи умову рентабельності теплової ізоляції, маємо:

$$\frac{\alpha_2 \cdot d_2}{2} = \frac{0,025 \cdot 8}{2} = 0,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}. \quad (3.14)$$

Оскільки коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції $\lambda_{iz} = 0,2$ Вт / (м · К) більше, ніж $(\alpha_2 \cdot d_2) / 2 = 0,1$ Вт / (м · К), то використовувати таку ізоляцію недоцільно. У цьому випадку

необхідно застосовувати інші теплоізоляційні матеріали (з рентабельною ізоляцією), для яких $\lambda_{iz} < 0,1 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Критична товщина шару теплової ізоляції:

$$d_{кр} = \frac{2\lambda_{iz}}{\alpha_2} = \frac{2 \cdot 0,2}{8} = 0,05 \text{ м.} \quad (3.15)$$

Весь сортамент неізольованих трубопроводів з діаметром d_2 до 0,05 м і нанесенням на них пропонованої ізоляції, з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{iz} = 0,2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ буде нерентабельним. Причому, найбільші теплові втрати такого ізольованого трубопроводу (з будь-яким діаметром до 0,05 м) мають місце при значенні зовнішнього діаметра ізоляції $d_{3кр} = 0,05 \text{ м}$.

Очевидно, що якщо діаметр d_2 використовуваних неізольованих трубопроводів буде дорівнювати або більше критичної товщини шару ізоляції $d_{кр} = 0,05 \text{ м}$, то нанесена ізоляція, з $\lambda_{iz} = 0,2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ буде завжди рентабельна, при будь-якій товщині шару ізоляції.

Очевидно також, що тепла ізоляція з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{iz} = 0,2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$, нанесена на трубопровід діаметром $d_2 = 0,025 \text{ м}$, матиме найбільші теплові втрати при товщині ізоляції $\delta_{iz} = (d_{кр} - d_2) / 2 = (0,05 - 0,025) / 2 = 0,0125 \text{ м}$, а аналогічно з діаметром $d_2 = 0,02 \text{ м}$ матиме найбільші теплові втрати при товщині ізоляції $\delta_{iz} = (d_{кр} - d_2) / 2 = (0,05 - 0,02) / 2 = 0,015 \text{ м}$.

Для плоских систем будь-яка тепла ізоляція буде завжди рентабельна незалежно від коефіцієнта теплопровідності і товщини ізоляції.

Для зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище рекомендовано:

- застосовувати теплопроводи з високими теплоізоляційними властивостями;
- знижувати рівень температур теплоносія без шкоди для споживача;
- при можливості замінювати технологічну пару гарячою водою;

- своєчасно за допомогою конденсатовідвідників видаляти конденсат з паропроводів;
- ліквідувати витоку теплоносія;
- використовувати гнучкі системи регулювання відпустки і розподілу теплоти.

3.4. Інтенсифікація теплопередачі у теплотехнологічних установках

В деяких випадках на швидкість протікання технологічних процесів, а отже, продуктивність агрегату і праці впливає інтенсифікація процесів теплообміну. Інтенсифікація теплообміну призводить до зменшення габаритних розмірів установки і, як наслідок, до скорочення експлуатаційних і капітальних витрат. Тому в енергетичних установках часто виникає потреба у керуванні процесом передачі теплоти. Так, актуальним завданням у теплотехнологіях є інтенсифікація процесу теплообміну і створення високоефективних теплообмінних апаратів.

Як відомо теплопередача є результатом сукупної дії елементарних видів теплообміну і складається з трьох ланок. Перша ланка – перенос теплоти конвекцією від гарячого теплоносія до стінки, що характеризується коефіцієнтом тепловіддачі α_1 . Друга ланка – перенос теплоти теплопровідністю через стінку. Третя ланка – перенос теплоти конвекцією від другої поверхні стінки до холодного теплоносія, що характеризується коефіцієнтом тепловіддачі α_2 . Можливості інтенсифікації кожного з видів теплообміну визначаються фізичною сутністю явищ. Зокрема, зменшення термічного опору стінки можна досягнути або зменшенням її товщини, або заміною матеріалу стінки іншим з більшим коефіцієнтом теплопровідності. Конвективний теплообмін можна інтенсифікувати перемішуванням середовища і збільшенням її швидкості або зміною роду теплоносія; при променевому теплообміні – підвищенням ступеня чорноти і температури випромінювальної поверхні. В кожному окремому випадку тільки в результаті ретельного аналізу умов теплообміну можна намітити шляхи його інтенсифікації.

У будь-якому випадку значення коефіцієнта теплопередачі k завжди менше найменшого з діючих коефіцієнтів тепловіддачі α_1 і α_2 .

Якщо у виразі коефіцієнта теплопередачі знехтувати термічним опором самої стінки ($\delta/\lambda=0$), то формула набуде виду:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \alpha_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \alpha_1 \quad (3.16)$$

Вирази $\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$ та $\frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$ являють собою правильні дробі, оскільки знаменник кожного з них більше чисельника. Отже, значення коефіцієнта теплопередачі k_0 завжди менше найменшого з діючих коефіцієнтів тепловіддачі α_1 і α_2 .

Наведемо приклад. Для деяких значень α_1 і α_2 здійснимо розрахунок коефіцієнта теплопередачі за останньою формулою. Одержимо наступні результати (α_1 , α_2 і k_0 виміряні у Вт/(м²·К)):

	1	2	3	4	5	6
α_1	4000	8000	4000	20	20	30
α_2	20	20	40	40	60	40
k_0	19,9	19,95	39,6	13,3	15	17,2

Аналіз результатів показує, що якщо значення одного коефіцієнта теплопередачі значно більше другого, то збільшення більшого з них (α_1) майже не відбивається на значенні k_0 (стовпчики 1 і 2), зміна меншого (α_2) суттєво впливає на значення коефіцієнта теплопередачі (стовпчики 1 і 3), причому за величиною k наближається до α_2 , але завжди менше його. Таким чином, значної інтенсифікації процесу теплопередачі в даних умовах можна досягнути тільки збільшенням меншого коефіцієнта теплопередачі. Якщо $\alpha_1 \approx \alpha_2$, то інтенсифікувати теплопередачу можна збільшенням будь-якого з них (стовпчики 4 – 6).

Пояснити одержані результати можна наступним. Наприклад, для умов задачі першого стовпчика результат свідчить про те, що

квадратний метр зовнішньої поверхні стінки при різниці температур між середовищем і поверхнею в один градус пропускає тепловий потік у 4000 Вт, в той же час як внутрішня поверхня – тільки 20 Вт. Отже, кількість теплоти, що проходить через стінку, буде визначатися величиною 20 Вт, оскільки внутрішня поверхня більше теплоти не пропустить.

Значення коефіцієнта теплопередачі k зменшиться, якщо врахувати термічний опір стінки δ/λ :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{k_0} + \frac{\delta}{\lambda}}. \quad (3.17)$$

Якщо розділити ліву і праву частини останнього рівняння на k_0 одержимо

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{\lambda} k_0} \quad (3.18)$$

Якщо побудувати графічну залежність $k/k_0 = f(\delta/\lambda)$ і проаналізувати її, то виявиться, що коефіцієнт теплопередачі тим менше, чим більше початкове значення k_0 .

Наведемо приклад. Припустимо, що у заданому теплообміннику підігрівається вода. Коефіцієнт тепловіддачі з боку води $\alpha_2 = 5000$ Вт/(м²·К). Товщина сталеві стінки $\delta = 3$ мм, а коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 30$ Вт/(м·К). Тоді термічний опір $\delta/\lambda = 1 \cdot 10^{-4}$ (м²·К)/Вт.

У випадку підігріву газом, $\alpha_1 = 40$ Вт/(м²·К),

$$k_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{40} + \frac{1}{5000}} = 39.7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (3.19)$$

У випадку підігріву парою, що конденсується, $\alpha_1 = 10000$ Вт/(м²·К),

$$k_0 = \frac{1}{\frac{1}{10000} + \frac{1}{5000}} = 3300 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (3.20)$$

У випадку підігріву парою, що конденсується, а замість сталеві стінки буде використана мідна такої ж товщини ($\delta = 3$ мм), з $\lambda = 300$ Вт/(м·К), тоді $\delta/\lambda = 1 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт; $k_0 = 3300$ Вт/(м²·К), а

$$k = \frac{1 \cdot k_0}{1 + \frac{\delta}{\lambda} k_0} = \frac{3300}{1 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot 3300} = 3240 = 0,97 k_0 \quad (3.21)$$

З розглянутих прикладів випливає, що за великих значень k_0 не доцільно нехтувати термічним опором стінки, що особливо важливо для випадків, коли стінка має малий коефіцієнт теплопровідності (наприклад, наявність відкладень накипу, сажі тощо).

Таким чином, для інтенсифікації процесу теплопередачі необхідно знати закономірності зміни певних термічних опорів. Якщо вони відрізняються один від одного, то достатньо зменшити найбільший з них, щоб підвищити теплопередачу. Якщо всі величини термічного опору одного порядку, то збільшити коефіцієнт теплопередачі можна за рахунок зменшення одного із опорів.

Проблему інтенсифікації роботи теплообмінників через збільшення коефіцієнта тепловіддачі можна вирішити шляхом раціонального підбору гідродинаміки теплоносія. Останнє повинно призводити до вирівнювання швидкостей і температур по перетину потоку теплоносія і, отже, до зменшення термічного опору його примежового шару. Дослідження показують, що саме опір примежового шару є головним чинником, що знижує інтенсивність теплопередачі.

Теплообмін значно поліпшується також при ліквідації застійних зон в міжтрубному просторі теплообмінників. Особливо часто такі зони утворюються поблизу трубних решіток, оскільки штуцера введення та виведення теплоносія з міжтрубного простору

розташовані на деякій відстані від них. Найбільш радикальний спосіб запобігання утворенню таких зон – установка розподільних камер на вході і виході теплоносія з міжтрубного простору.

Ефект тепловіддачі на зовнішній поверхні труб суттєво підвищують кільцеві канавки, що інтенсифікують теплообмін у міжтрубному просторі приблизно у 2 рази шляхом турбулізації потоку в примежовому шарі.

У теплообмінниках з передачею теплоти від рідини в трубному просторі до в'язкої рідини або газу у міжтрубному просторі коефіцієнти тепловіддачі із зовнішньої сторони труб приблизно на порядок менше, ніж з внутрішньої сторони. Наприклад, в газорідинних теплообмінниках коефіцієнт тепловіддачі з боку рідини (α_p) може досягати 6 кВт/(м²·К), а з боку газу (α_z) не перевищує 0,1 кВт / (м²·К). Природно, що застосування гладких труб в таких теплообмінниках призводить до різкого збільшення їх маси і розмірів. Прагнення інтенсифікувати тепловіддачу з боку малоефективного теплоносія (гази, в'язкі рідини) сприяло розробці різних конструкцій оребрених труб (рис. 3.3).

Встановлено, що оребрення труб збільшує не тільки теплообмінну поверхню, але і коефіцієнт тепловіддачі від оребреної поверхні до теплоносія внаслідок турбулізації потоку ребрами. При цьому, однак, треба враховувати зростання витрат на прокачування теплоносія. Застосовують труби з поздовжніми (рис. 3.3 а) і розрізними (рис. 3.3 б) ребрами, з поперечними ребрами різного профілю (рис. 3.3 в). Оребрення на трубах можна виконати у вигляді спіральних ребер (рис. 3.3 г), голок різної товщини тощо. Оребрення найбільш ефективно, якщо забезпечується співвідношення $\alpha_z F_z / \alpha_p F_p$, де F_z і F_p – поверхні теплообміну з боку відповідно газу і рідини.

Ефективність ребра, яке можна характеризувати коефіцієнтом тепловіддачі, залежить від його форми, висоти і матеріалу. Якщо потрібно невисокий коефіцієнт тепловіддачі, необхідну ефективність можуть забезпечити сталеві ребра, при необхідності досягнення більш вищих їх значень, доцільне застосування мідних або алюмінієвих ребер.

Ефективність ребра різко знижується у випадку, якщо воно не приєднано до труби, тобто не приварене або не припаяне до неї.

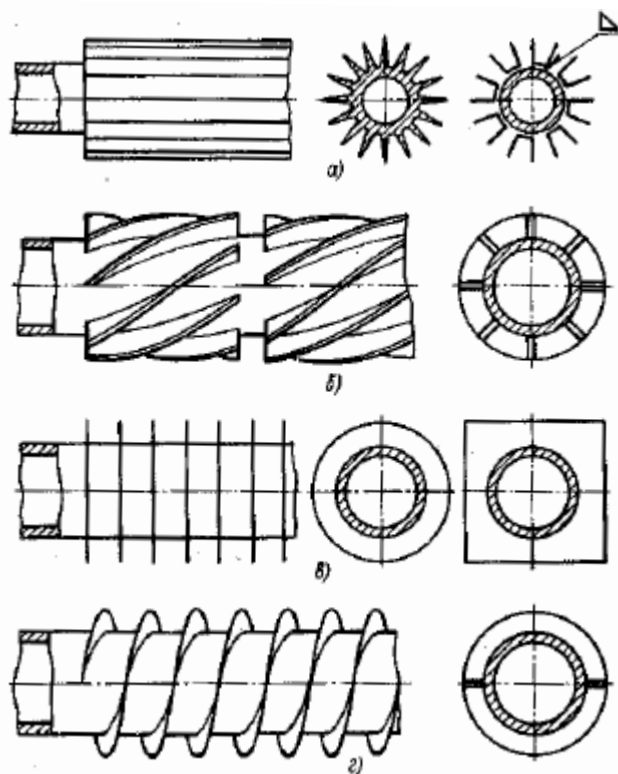


Рисунок 3.3 – Варіанти оребрення труб

Якщо термічний опір визначається трубним простором, використовують методи впливу на потік пристроями, які руйнують і турбулізують внутрішній примежовий шар. Це різного роду елементи, що призводять до турбулізації потоку (спіралі, діафрагми, диски, кільця, кульки), що поміщаються в трубу. В таких випадках зростає гідрравлічний опір потоку.

Конструктивні елементи, що турбулізують потік, у вигляді діафрагми (рис. 3.4 а) розміщують в трубі на певній відстані одна від іншої. При наявності таких елементів перехід до турбулентної течії в трубах відбувається при $Re = 140$ (для труб без діафрагм при $Re = 2300$), що дозволяє приблизно у 4 рази інтенсифікувати теплообмін. Елементи у вигляді дисків (рис. 3.4 б) з певним кроком закріплюють на тонкому стрижні, що вставляється в труби. За своїм впливом на

потік такі елементи близькі до діафрагм. Спіральні елементи (рис. 3.4 в) звичайно виготовляють з тонких алюмінієвих або латунних стрічок. При низьких значеннях Re вони дозволяють підвищити коефіцієнт тепловіддачі у 2-3 рази.

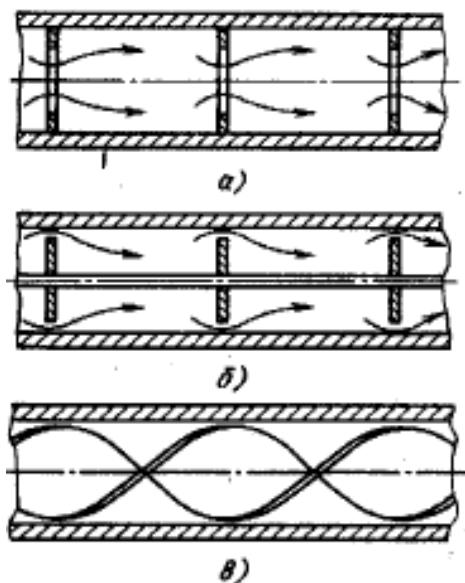


Рисунок 3.4 – Труби з турбулізуючими елементами

Крім вищезазначених елементів теплообмін в трубах можна інтенсифікувати шляхом застосування поверхонь підвищеної шорсткості, накаткою кільцевих канавок, зміною поперечного перерізу труби через її стиснення. У цьому випадку навіть при ламінарному режимі течії теплоносія тепловіддача в трубах на 20-100% підвищується, у порівнянні з гладкими трубами.

3.5. Використання ефективних теплопровідних пристроїв

Передача теплоти на певні відстані переважно вирішується за рахунок використання контурів з рухомим теплоносієм. Але у таких систем є суттєві недоліки: потрібна витрата енергії на прокачування теплоносія; мають місце великі втрати при передачі; існують значні перепади температур; при великих теплових потоках, що

передаються, системи виявляються важкими і громіздкими; насоси, що містять обертальні елементи, є джерелами шуму і вібрації та вимагають систематичної профілактики і нагляду.

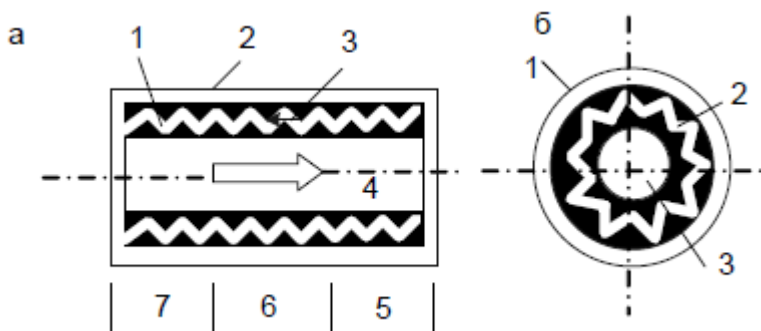
Задача ефективної передачі теплової енергії і трансформації теплового потоку може бути вирішена за допомогою пристроїв, що одержали назву теплові труби (ТТ), які знаходять застосування в промисловості. Особливістю ТТ полягає в тому, що вони здатні передавати великі теплові потужності при малих перепадах температур.

Робота теплових труб заснована на процесах випаровування і конденсації. Значення коефіцієнта тепловіддачі α , Вт/(м²·К), при кипінні (500...5000) і конденсації (4000...20000) води (та інших рідких речовин) дозволяють ефективно використовувати процеси кипіння і конденсації для різних теплотехнологічних систем.

ТТ знаходять застосування в енергетиці, машинобудуванні, електроніці, хімічній промисловості, сільському господарстві та інших галузях (для утилізації низькопотенційних вторинних енергоресурсів). Найбільше застосування вони знаходять при температурі ВЕР 50 - 250°C, оскільки в даному температурному діапазоні не потрібно застосування дорогих матеріалів та теплоносіїв.

ТТ являє собою пристрій для переносу теплоти з одної зони (гарячої) в іншу (холодну) при малому градієнті температури. Вона є найбільш удосконаленим з усіх різноманітних пристроїв для передачі теплоти із зони випаровування в зону конденсації (рис. 3.5). На внутрішній стінці ТТ укріплений гніт, зроблений, наприклад, з декількох шарів тонкої сітки. Труба заповнюється невеликою кількістю теплоносія (робочого тіла), після чого з неї відкачується повітря і вона щільно закривається.

Один кінець труби нагрівається, чим викликає випар рідини і рух пари до холодного кінця труби. Тут у результаті охолодження пара конденсується і під впливом капілярних сил повертається до гарячого кінця труби. Оскільки теплота пароутворення теплоносія велика, то ТТ при малій різниці температур на кінцях може передавати великий тепловий потік.



а – поздовжній переріз: 1 – гніт; 2 – стінка труби; 3 – повернення рідини по гніту; 4 – пара; 5 – ділянка конденсації; 6 – адіабатна ділянка; 7 – ділянка випару; б – поперечний переріз: 1 – стінка; 2 – гніт; 3 – паровий простір.

Рисунок 3.5 – Основні елементи теплової труби:

Теплота, що надходить від зовнішнього джерела до випаровувача, викликає випаровування теплоносія на цій ділянці труби – приховану теплоту пароутворення. Зконденсована рідина повертається назад по гніту або по стінках корпусу теплової труби у випарник для наступного випаровування. В тепловій трубі використовується цикл «випаровування-конденсація» і безперервно відбувається перенос прихованої теплоти пароутворення від випарника до конденсатора. Кількість теплоти, яке може бути перенесене у вигляді прихованої теплоти пароутворення, звичайно у кілька разів вище кількості, яке може бути перенесене у вигляді ентальпії робочої рідини у звичайній конвективній системі. Тому тепла труба може передавати більшу кількість теплоти при малому розмірі установки.

При використанні ТТ для утилізації ВЕР можна не тільки підвищити теплову ефективність роботи енергетичних установок, але в багатьох випадках зменшити забруднення навколишнього середовища. Прикладом може служити застосування ТТ у двигунах Стірлінга або в карбюраторних двигунах як випарник палива. Так, відома схема використання ТТ у газоходах двигуна. Випарна зона ТТ розміщується у випускному патрубку, а конденсаційна - у впускному (після карбюратора). У результаті теплота

відпрацьованих газів передається паливно-повітряної суміші завдяки ТТ, забезпечуючи повний випар палива і збільшення парів його конденсації у суміші з повітрям.

Об'єднанням групи ТТ створюють теплообмінники на теплових трубах (ТТТ), що є різновидом рекуперативного теплообмінника із проміжним теплоносієм. Ефективність ТТТ звичайно оцінюється коефіцієнтом за формулою:

$$\varepsilon_m = \frac{T_{z1} - T_{z2}}{T_{z1} - T_{x1}}, \quad (3.22)$$

де T_{z1} і T_{z2} – температури гарячого теплоносія на вході в теплообмінник и виході з нього; T_{x1} – температура холодного теплоносія на вході.

ТТТ мають зони випару та конденсації, які можуть бути різних геометричних розмірів. Випарна зона теплообмінника знаходиться в потоці середовища, що віддає теплоту, а конденсація - у потоці теплосприймаючого .

Залежно від агрегатного стану теплоносіїв, які омивають випарну і конденсаційну зону, ТТТ розділяються на три типи:

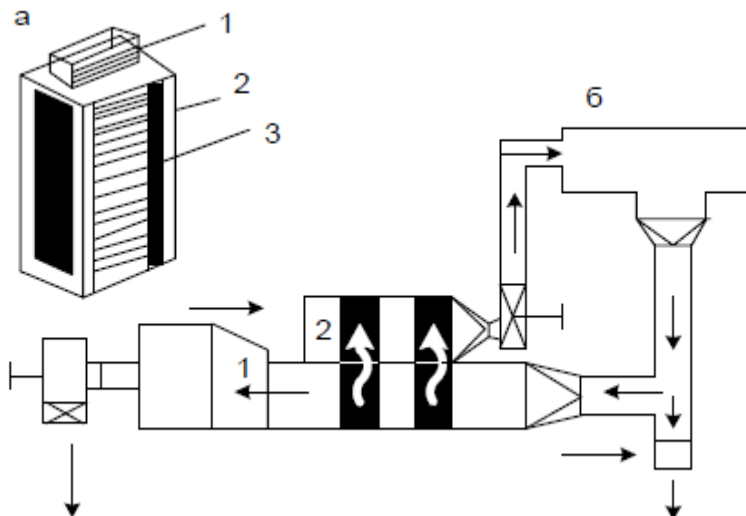
- газ - газ (повітря - повітря);
- газ - рідина;
- рідина - рідина.

ТТТ першого типу застосовують як повітропідігрівники для промислових процесів, в агрегатах-утилізаторах тваринницьких ферм, у системах опалення і вентиляції приміщення, для кондиціонування повітря тощо.

На рисунку 3.6 наведено загальний вид і напрям потоків теплообмінника на теплових трубах типу "газ-газ" для утилізації теплоти відхідних газів. Випарні зони теплових труб у ньому знаходяться в потоці гарячого газу 1, а конденсаційні зони омиваються холодним повітрям 2, яке необхідно нагрівати. Теплообмін всередині такого теплообмінника залежить від положення теплових труб.

Теплообмінники другого типу (газ - рідина) використовують в умовах, коли виключають взаємодію газу і рідини в широкому

інтервалі тисків і температур. Такі ТТТ можуть бути застосовані як конденсатори, нагрівачі і охолоджувачі рідин тощо.



а – загальний вигляд (1 – рама з тепловими трубами; 2 – повітровід; 3 – газовід); б – напрямки потоків (1 – гарячий газ; 2 – холодне повітря).

Рисунок 3.6 – Рекуперативний теплообмінник на теплових трубах

3.6. Комплексне використання холоду, теплової та електричної енергії

3.6.1. Ефективність одночасного виробництва теплової та електричної енергії

Значна частина електроенергії в Україні виробляється конденсаційними електростанціями (КЕС). На таких електростанціях первинна енергія палива перетворюється в котлах на пару. Після чого отримана пара подається в парову турбіну, яка приводить в рух електрогенератор. Генератор перетворює механічну енергію турбіни на електричний струм. Середній коефіцієнт корисної дії традиційних електростанцій становить близько 38%, тобто більше 60% підведеної первинної енергії палива не використовується і скидається у навколишнє середовище.

Теплоелектроцентральною (ТЕЦ) відрізняється від конденсаційної електростанції тим, що її загальний коефіцієнт корисної дії можна підвищити завдяки використанню відхідного тепла. На потужних ТЕЦ процеси відбору тепла та його передачі споживачу реалізуються за допомогою теплових мереж, але їхній потенціал здебільшого майже вичерпано. Зрештою, ефективна робота теплоелектроцентралей можлива тільки за умови, коли великі споживачі теплової енергії, наприклад, житлові райони, розташовані поблизу ТЕЦ.

З огляду на ці обставини та з метою зниження залежності від зовнішніх факторів, були створені децентралізовані міні-ТЕЦ (когенераційні установки). У таких установках виробництво електричної та теплової енергії відбувається у порівняно невеликих блочних модулях, які встановлені у безпосередній близькості від споживача. Завдяки цьому втрати електричного струму та тепла під час транспортування мінімізуються. Коефіцієнт використання енергоресурсів зростає більше, ніж на 60%, а вартість електричної та теплової енергії, яка виробляється КГУ, значно нижча порівняно з «великою» енергетикою. Крім того, одержуючи автономне джерело електроенергії і теплоти, споживач стає незалежним від монопольних постачальників теплової і електричної енергії.

Сфера застосування КГУ дуже широка. Вони можуть виробляти енергію для потреб всіх галузей господарської діяльності, у тому числі на промислових підприємствах і у сільському господарстві.

Ефективність використання палива при комбінованому виробленні в когенераційній системі теплової і електричної енергії показана на рисунку 3.7. Порівняння техніко-економічної ефективності роздільної та комбінованої схеми виробництва теплової енергії свідчить, що економія палива в умовах комбінованого виробництва сягає 18-22% на рік, щорічні витрати зменшуються на 20...25%, шкідливі викиди CO_2 – на 20% (табл. 3.1).

Відомо, що ефективність ТЕЦ значно вище, ніж КЕС плюс котельна установка. При одночасному комбінованому виробництві електроенергії і теплоти питомі витрати теплоти на вироблення електричної енергії значно менші, ніж при роздільному одержанні електричної та теплової енергії, коли теплота робочого тіла, що

виробляється в турбінах надходить до навколишнього середовища і марно втрачається.



Рисунок 3.7 – Порівняльна ефективність роздільного і комбінованого виробництва теплової і електричної енергії

Таблиця 3.1 – Порівняння ефективності комбінованого і роздільного виробництва теплової і електричної енергії (на початку 21 століття)

Показник	Виробництво		Коефіцієнт ефективності
	Комбіноване	Роздільне	
Обсяг капіталовкладень, млн. дол. США	10^3	$1,05 \cdot 10^3$	0,95
Потужність теплова, МВт	10^3	10^3	1
Потужність електрична, МВт	10^3	10^3	1
Виробництво теплоти, Гкал/рік	$2,5 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^6$	1
Виробництво електроенергії, МВт·год/рік	$6,7 \cdot 10^6$	$6,7 \cdot 10^6$	1
Витрата палива, тис. т у.п./рік	$1,8 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	0,8
Витрата на паливо, млн. дол./рік	125	156	0,8
Щорічні витрати на виробництво, млн.дол./рік	205	261	0,79
Викиди CO ₂ , тис. т	3,2	3,7	0,79

На рисунку 3.8 в Ts -діаграмі наведені ідеальні цикли Карно парових електростанцій, які виробляють лише електричну енергію – КЕС (рис. 3.8 а) та станцій одержання електричної та теплової енергії – ТЕЦ (рис. 3.8 б). Кількість тепла, підведеного в цикл:

$$q_n = T_e \Delta s \quad (3.23)$$

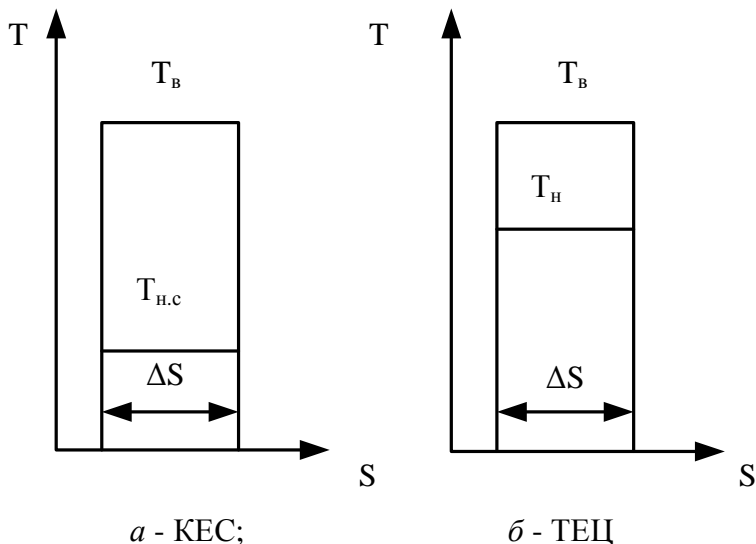


Рисунок 3.8 – Ідеальні цикли теплових електростанцій в Ts -діаграмі

Кількість одержаної роботи:

в КЕС циклі $l_p^e = (T_e - T_n) \Delta s$

в ТЕЦ циклі $l_p^k = (T_e - T_{н.с.}) \Delta s$

Кількість виробленого тепла, корисно використаного для теплозабезпечення:

в КЕС циклі $q_T^e = 0$

в ТЕЦ циклі $q_T^k = T_n \Delta s$,

де $T_{\text{в}}$ - температура підводу тепла в цикл, К; $T_{\text{нс}}$ - температура навколишнього середовища, К; $T_{\text{н}}$ - температура відводу тепла з комбінованого циклу для теплозабезпечення, К.

Питомі витрати тепла на одержання роботи:
в КЕС циклі

$$q_p^e = \frac{q_n}{l_p^e} = \frac{T_{\text{в}} \Delta s}{(T_{\text{в}} - T_{\text{н.с.}}) \Delta s} = \frac{\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{н.с.}}}}{\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{н.с.}}} - 1} \quad (3.24)$$

в ТЕЦ циклі

$$q_p^k = \frac{q_n - q_T^k}{l_p^k} = \frac{(T_{\text{в}} - T_{\text{н}}) \Delta s}{(T_{\text{в}} - T_{\text{н}}) \Delta s} = 1 \quad (3.25)$$

Різниця питомих витрат тепла на одержання роботи в КЕС та в ТЕЦ циклах

$$\Delta q = q_p^e - q_p^k = \frac{1}{\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{н.с.}}} - 1} \quad (3.26)$$

Останній вираз є безрозмірним. Він показує величину зниження питомих витрат тепла на одержання одиниці роботи при комбінованому (ТЕЦ) виробництві електричної та теплової енергії в порівнянні з роздільним виробництвом електричної та теплової енергії.

Також ця величина може бути і в розмірному вигляді, кДж/(кВт·год):

$$\Delta q = 3600 \frac{1}{\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{н.с.}}} - 1} \quad (3.27)$$

Отже, переваги комбінованого способу одержання теплової і електричної енергії перед роздільним, очевидні.

3.6.2. Схеми та принципи роботи когенераційних установок

Структурна схема КГУ наведена на рисунку 3.9.

Система когенерації складається з чотирьох основних елементів: первинний двигун, електрогенератор, система утилізації тепла, система контролю і управління. Залежно від існуючих вимог як первинний двигун можуть використовуватися поршневий двигун, газова турбіна, парова турбіна і комбінація парової і газової турбін.



Рисунок 3.9 – Структурна схема КГУ

Серед великого числа схем побудови КГУ в теплоенергетиці можна виділити три базових варіанти, які відрізняються один від одного тепловими приводними двигунами, типами генераторів, способами генерування теплової енергії. Відповідно до цього комбіноване вироблення різних видів енергії можна розділити на:

- КУ на базі застосування газотурбінних двигунів (ГТУ);
- КУ на базі застосування газо-поршневих двигунів (ГПА);
- КУ на базі застосування парогазових циклів (ПГУ).

В КУ перших двох типів базовим продуктом є теплова енергія, а електрична (механічна) енергія – допоміжним. Її частка в загальному об'ємі енергій, що виробляється, не перевищує 20-30%. У третьому варіанті частка виробленої електроенергії може перевищувати 50% і вона у більшості випадків є основним продуктом.

КУ на базі ГПА

ГПА — традиційні дизельні електростанції, що використовуються як резервні джерела електроенергії. При оснащенні теплообмінником або котлом-утилізатором вони стають КУ (рис. 3.10). Невикористане тепло вихлопних газів, систем охолодження та змащування двигуна йде на опалювання і гаряче водопостачання. У механічну роботу перетворюється третина енергії палива. Остання її частка перетворюється на теплову енергію. Окрім дизельних двигунів використовуються також газові і газодизельні двигуни внутрішнього згорання. Газовий двигун може бути обладнаний декількома карбюраторами, що дає можливість працювати на декількох сортах газу. Електричний ККД газопоршневих установок досягає 40 %, що дещо вище, ніж у ГТУ, а тепловий ККД нижче – 50 %. Нижчим є також межа потужності, яка складає близько 9 МВт.

Переваги і особливості застосування ГПА:

— найбільш низький рівень викидів оксидів азоту, який можна усунути повністю при роботі ДВЗ на багатій суміші з подальшим допалюванням продуктів згорання в казані;

— вищий, в порівнянні з ГТУ, ресурс роботи, що досягає 150–200 тис.год;

— найбільш низький рівень капітальних витрат і експлуатаційних витрат на виробництво енергії;

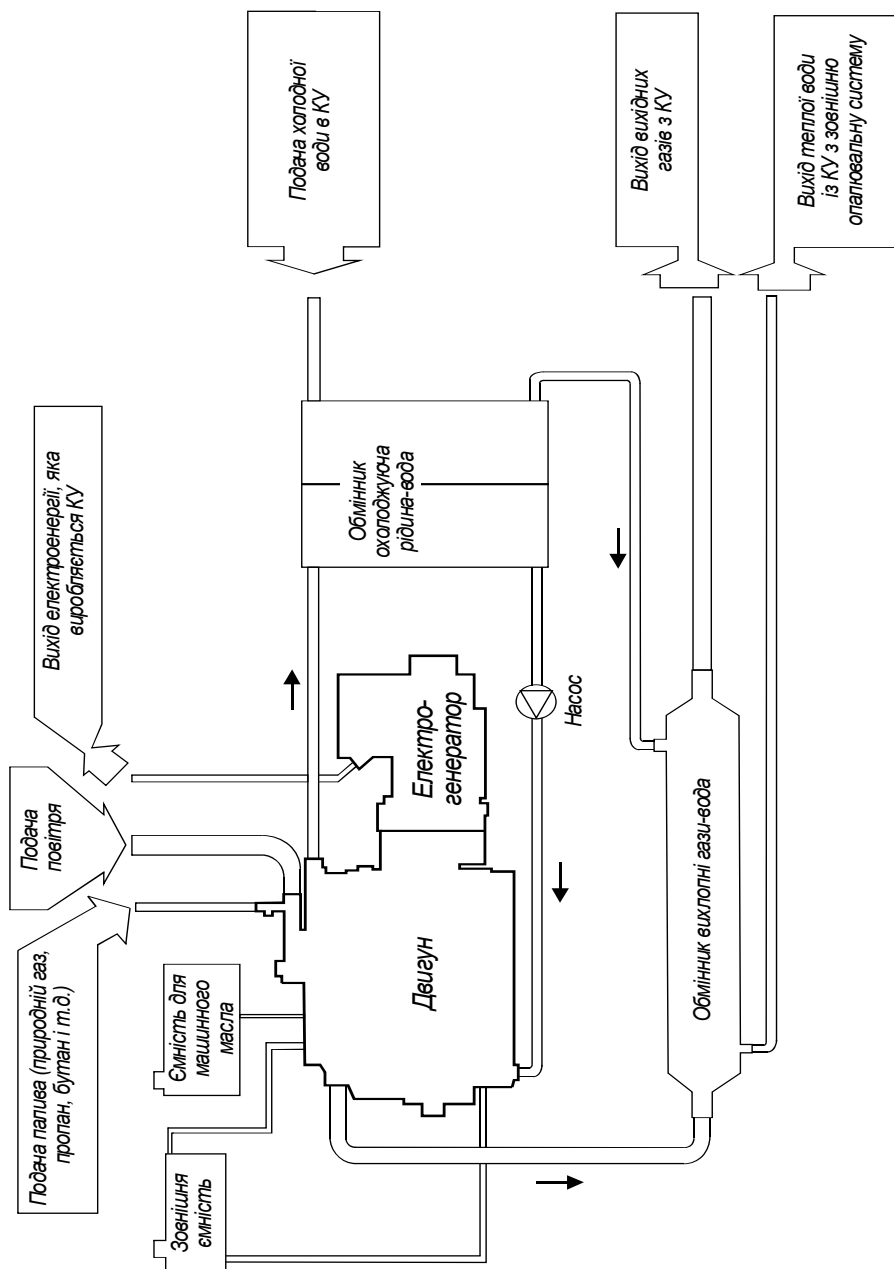


Рисунок 3.10 – Схема КГУ на базі застосування ГПА

— простота переходу з одного виду палива на інший. ГПА не рекомендується застосовувати при потребі в отриманні великої кількості теплоносія з температурою більше 110°C , при великій споживаній потужності, а також при обмеженому числі пусків.

КГУ на базі ГТУ:

ГТУ можуть бути розділені на дві основні частини — газогенератор і силова турбіна, розміщені в одному корпусі (рис. 3.11).

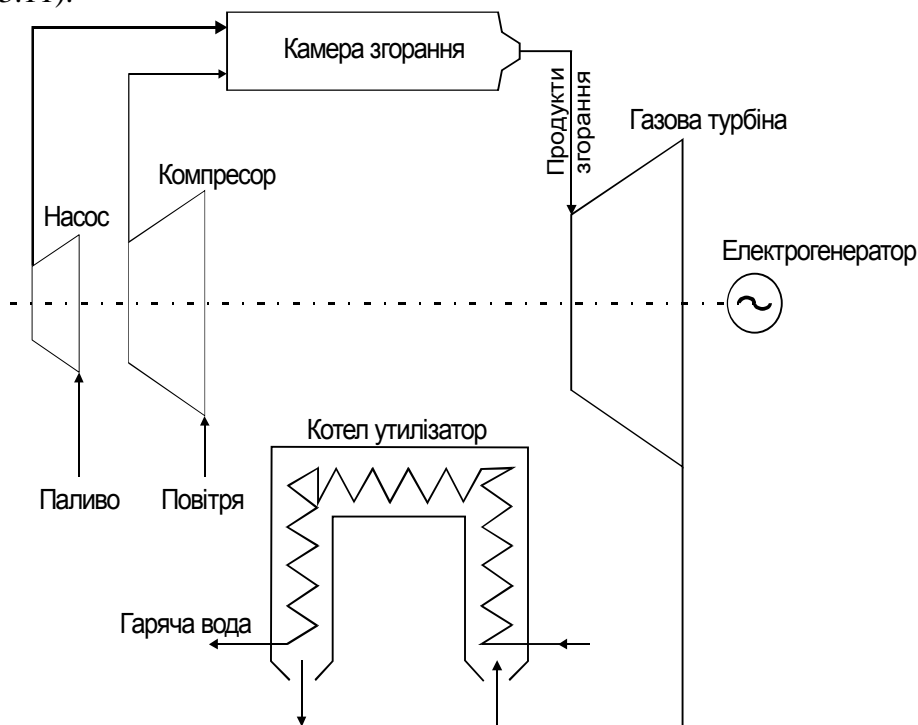


Рисунок 3.11 - Схема КГУ на базі застосування ГТУ

Газогенератор включає турбокомпресор і камеру згорання, в яких створюється високотемпературний потік газу, що впливає на лопатки силової турбіни. Теплова продуктивність забезпечується утилізацією тепла вихлопних газів за допомогою теплообмінника, водогрійного або парового котла-утилізатора. ГТУ передбачають роботу на двох видах палива — рідкому і газоподібному. ГТУ

виробляють набагато більшу кількість теплової енергії, ніж ГПА, і можуть працювати як в базовому режимі, так і для покриття пікових навантажень.

Принцип роботи КГУ на базі ГТУ полягає в наступному. Атмосферне повітря надходить в компресор, де стискається і прямує через повітророзподільний клапан в камеру згорання. У камері згорання в потоці повітря спалюється паливо, що проходить через форсунки. Гарячі гази надходять на лопатки газової турбіни, де теплова енергія потоку перетворюється на механічну енергію обертання ротора турбіни. Потужність, отримана на валу турбіни, використовується для приводу електрогенератора, який виробляє електроенергію. Гарячі гази надходять у водогрійний котел-утилізатор, а потім вилучаються. Мережева вода нагрівається у водогрійному котлі-утилізаторі і прямує до споживача.

Електричний ККД (частка електроенергії від загальної енергії згорання палива) систем подібного типу може досягати 39 %. ГТУ, як правило, виробляють у два рази більше теплової енергії, ніж електричної (при цьому загальний ККД не перевищує 90 %).

Установки великої потужності можна використовувати разом з паровими турбінами. В цьому випадку їх електричний ККД досягає 59 %.

КГУ на базі ГТУ мають наступні переваги:

- висока надійність: ресурс роботи основних вузлів складає до 150 тис. години, а ресурс праці до капітального ремонту - 50 тис. година.;

- коефіцієнт використання палива (КВП) при повній утилізації тепла досягає 85%;

- можливість роботи як на рідкому так і на газоподібному паливі різного походження, в тому числі і низькокалорійному (з вмістом метану менше 30 %)

- економічність установки: питома витрата умовного палива на відпуск 1 кВт електроенергії складає 0,2 кг у. п., а на відпуск 1 Гкал тепла - 0,173 кг у.п.;

- короткий термін окупності і нетривалі терміни будівництва - до 10-12 місяців;

- низька вартість капітальних вкладень - не більше \$600 за встановлений кіловат;

- можливість автоматичного і дистанційного управління роботою ГТУ, автоматичне діагностування режимів роботи станції;
- можливість відходу від будівництва ЛЕП.

До недоліків слід віднести необхідність додаткових витрат на споруду газокompресорної станції, оскільки для роботи ГТУ потрібний газ з тиском 2,5 МПа, а в міських мережах тиск газу складає 1,2 МПа.

КГУ на базі ПГУ

На базі невеликих парових турбін можна створювати КГУ на базі парових котлів, що вже діють, тиск пари на виході з яких значно вище, ніж необхідно для промислових потреб (рис. 3.12).

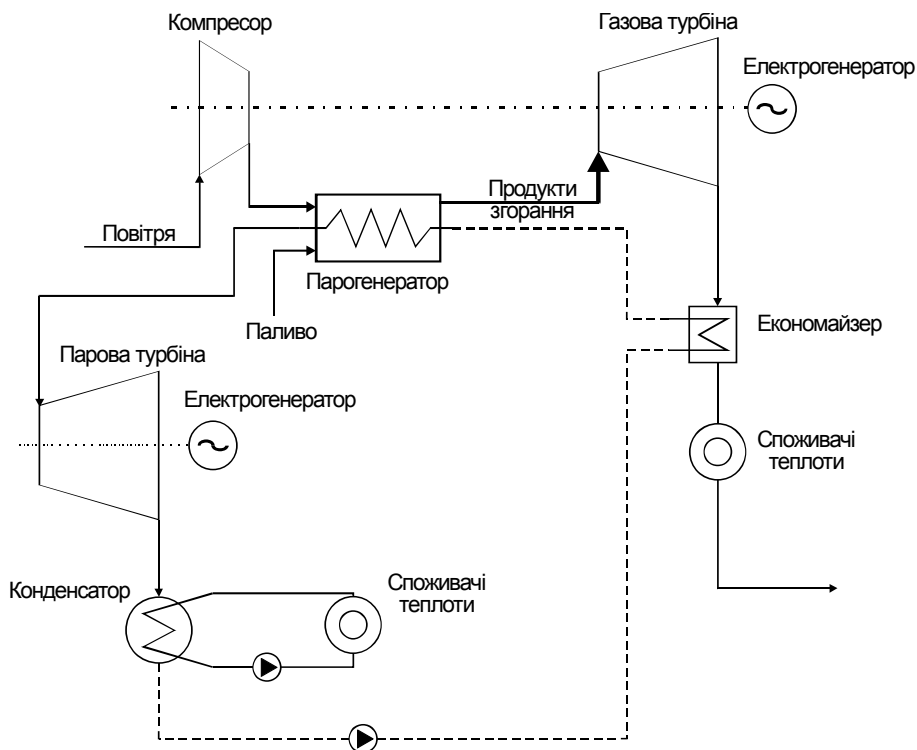


Рисунок 3.12 – Схема КГУ із застосуванням парогазових циклів

Тиск знижується за допомогою спеціальних дросельних пристроїв, що веде до непродуктивної втрати енергії — до 50 кВт на

кожну тонну пари. Встановивши паралельно дросельному пристрою турбогенератор, можна отримувати дешевшу електроенергію. Реконструкція муніципальних і промислових котельних допоможе вирішити чотири основні завдання енергозбереження:

- котельні, що дають в мережу понад 60% теплової енергії, зможуть додатково поставляти дешеву електроенергію як в піковому, так і в базовому режимах;
- знижується собівартість теплової енергії;
- зменшуються втрати в електромережах;
- істотно знижуються питомі витрати палива на виробництво електроенергії і тепла;
- істотно знижуються викиди в атмосферу NO, CO і CO₂ за рахунок економії палива.

Головна перевага КГУ перед звичайними теплоелектростанціями полягає в тому, що перетворення енергії тут відбувається з більшою ефективністю, тобто такі установки дозволяють використовувати ту теплоту, яке звичайно втрачається. КГУ забезпечує енергетичну незалежність і зниження витрат на забезпечення теплової і електроенергії майже у 3 рази.

КГУ мають низку переваг, основні з яких наступні:

- малі втрати при транспортуванні теплової і електричної енергії в порівнянні з системами централізованого тепло і електропостачання;
- автономність функціонування і можливість реалізації в енергосистему надлишків електроенергії, що виробляється;
- поліпшення економічних показників існуючих котельних за рахунок вироблення в них окрім теплової і електричної енергії;
- підвищення надійності теплопостачання за рахунок власного джерела електроенергії;
- нижча собівартість теплової і електричної енергії в порівнянні з централізованими джерелами енергії.

Комбінований спосіб вироблення електроенергії і тепла має значні економічні переваги. В результаті застосування цього способу, доходи від реалізації вироблених теплоти і електроенергії на одиницю кількості спаленого палива зростають порівняно з доходами, які отримані від реалізації вироблених теплоти і електроенергії окремо, в котельних і на КЕС.

Технологічні переваги когенерації полягають у тому, що вона поєднує такі позитивні характеристики, як найвищу ефективність використання палива, високі екологічні параметри, а також автономність та оптимізацію енергоспоживання.

Переваги надійності КГУ полягають у тому, що вони знижують уразливість інфраструктури енергетики, а споживач застрахований від перебоїв, які виникають у централізованому енергопостачанні, наприклад, через його зношеність або природні катаклізми.

Екологічні переваги когенерації забезпечуються тим, що така технологія у два-три рази ефективніше за традиційну енергетику використовуючи первинне паливо, знижує викиди забруднюючих речовин (оксид азоту, двоокис сірки та леткі органічні сполуки).

3.6.3. Тригенераційні системи

Термін «тригенерація» було одержано як логічне продовження когенерації. Під ним розуміється перетворення палива одночасно у три корисних енергетичних продукти: електроенергію, теплоту (гарячу воду або пару) і холод (охолоджену воду). Комбіноване виробництво цих видів енергії на сьогодні є одним з найбільш сучасних технологічних рішень в плані і підвищення енергетичної ефективності, і рішення екологічних проблем.

Потоки енергії та їх втрати при тригенераційній технології показано на рисунку 3.13.

По суті тригенераційна система являє собою когенераційну систему, в якій частина теплоти використовується для охолодження води за допомогою абсорбційної холодильної системи.

Цей спосіб вигідний передусім з точки зору експлуатації когенераційної установки, тобто дає можливість використовувати теплоту і влітку, поза терміну опалювального сезону і забезпечувати тим цілорічний термін роботи установки. Так, нелогічно і неекологічно викидати у літній період в атмосферу велику кількість теплової енергії. Оскільки АБХМ працюють на тепловій енергії, і переважна потреба в холоді в основному влітку, то в цей період року установка тригенерації виробляє крім електроенергії і теплову (яка по суті є скидною), що перетворюється в холодильних машинах у

холодну воду для застосування у технологічних процесах. Взимку тепла енергія тригенераційної установки використовується на потреби теплопостачання.

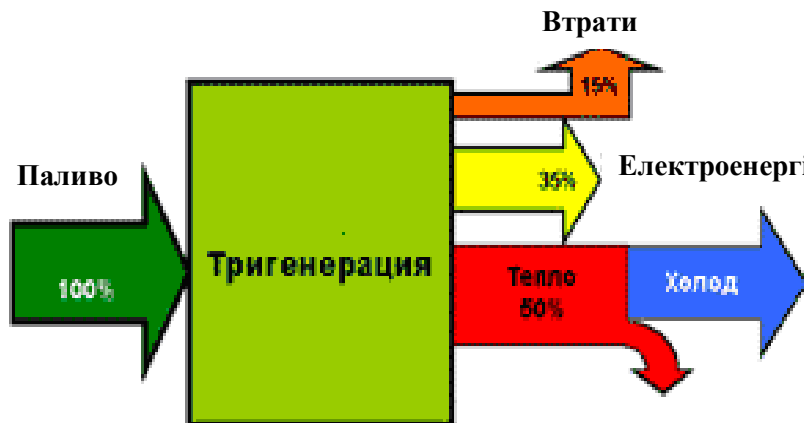


Рисунок 3.13 – Потоки енергії та їх втрати при тригенераційній технології

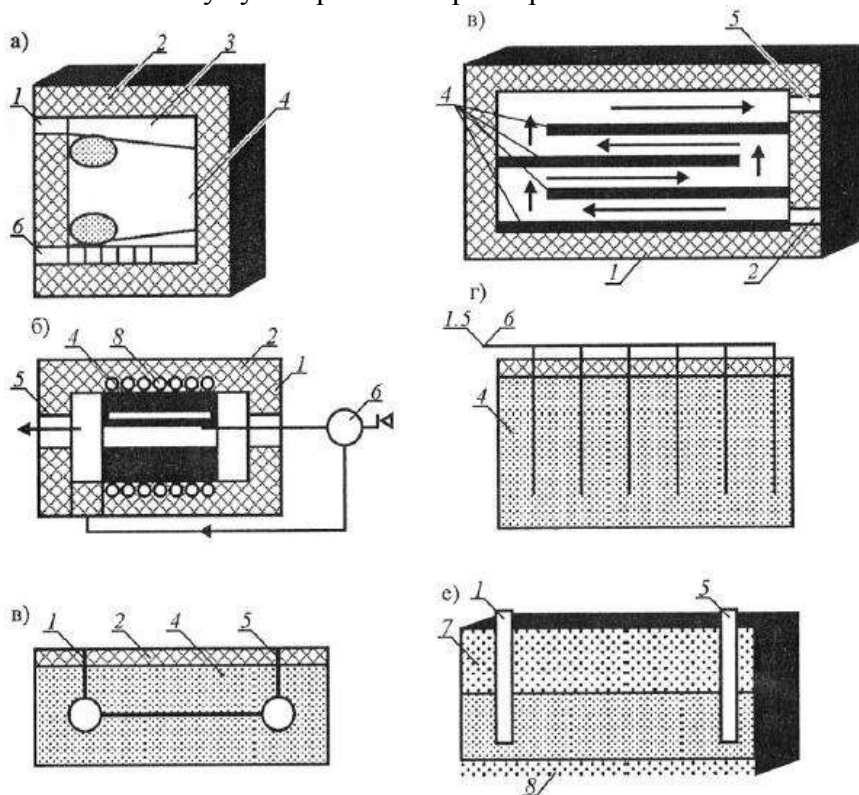
3.7. Акумулятори теплоти

Ефективним засобом енергозбереження є акумулювання енергії. Такий захід дозволяє у різних теплотехнологіях узгоджувати режими вироблення і споживання енергії, знижувати максимальну потужність двигунів, ширше застосовувати ВЕР, нетрадиційні і відновлювані джерела енергії.

На сьогодні відомо велика різноманітність видів і конструкцій теплових акумуляторів (в тому числі акумуляторів холоду) з різними теплоакумулюючими матеріалами (ТАМ), що обумовлено широким спектром галузей їх застосування. Велика кількість методів і способів акумулювання приводить до різних технічних і конструктивним рішенням (рис. 3.14):

- теплові акумулятори з твердим ТАМ;
- теплові акумулятори з плавким ТАМ;
- рідинні акумулятори теплоти;
- парові акумулятори теплоти;
- термохімічні акумулятори;

- теплові акумулятори з електронагрівним елементом.



а – із шпаристою матрицею; б, в – каналні; г, д – підземні з вертикальними і горизонтальними каналами; е – у водоносному горизонті: 1 – вхід теплоносія; 2 – теплоізоляція; 3 – роздільна решітка; 4 – ТАМ; 5 – вихід теплоносія; 6 – поділ потоків; 7 – водоносний шар; 8 – водонепроникний шар

Рисунок 3.14 – Основні типи теплових акумуляторів з твердим теплоакумуючим матеріалом

Традиційно розглядаються теплові акумулятори з нерухомою або рухомою матрицями. Застосування нерухокої матриці забезпечує простоту конструкції, але вимагає великих мас ТАМ. Крім того, температура теплоносія на виході з акумулятора змінюється на протязі часу, що вимагає додаткової системи підтримки постійних параметрів шляхом перепуску.

Канальні теплові акумулятори широко застосовуються у системах електро- і теплопостачання, що використовують непікову енергію. Теплоакумуючий матеріал (шамот, вогнетривка цегла тощо) нагрівається в періоди мінімального споживання електроенергії, що дозволяє вирівнювати графіки завантаження електростанцій. Пропускаючи холодне повітря через матрицю можна здійснювати обігрів приміщень.

Особливим типом каналних теплових акумуляторів з твердим ТАМ є теплові графітові акумулятори, що застосовуються як джерело енергії в автономних енергоустановках. Температура їх нагріву може досягати 3500 К, що забезпечує прийнятні масогабаритні характеристики установок.

Підземні акумулятори теплоти з горизонтальними каналами застосовуються для акумуляції теплоти і її використання на протязі 2-4 місяців.

Як ТАМ в акумуляторах теплоти у водоносних горизонтах застосовується водонепроникний шар ґрунту, в який в режимі зарядки через свердловину заганяється гаряча вода, а в режимі розрядки через іншу свердловину – холодна. Через відсутність поверхонь теплообміну даний тип установок забезпечує найкращі економічні характеристики серед підземних акумуляторів теплоти.

Застосування рухомої матриці передбачає застосування теплових акумуляторів у вигляді обертового регенератора, пристроїв з падаючими кулями тощо. Вони застосовуються в апаратах регенерації теплової енергії і через малу тривалість робочого циклу мають невеликі конструктивні розміри. Для теплових акумуляторів з рухомою матрицею характерна постійна температура газу на виході.

При застосуванні теплоти плавлення деяких речовин для акумулювання теплоти забезпечується висока щільність запасеної енергії, невеликі перепади температур і стабільна температура на виході з теплового акумулятора.

При невеликих робочих температурах (до 120 °С) рекомендується застосування кристалогідратів неорганічних солей, що пов'язано, з використанням як ТАМ природних речовин. Для реального застосування розглядаються тільки речовини, що не

розкладаються при плавленні, або такі, що розчиняються у воді, яка входить до складу ТАМ.

Застосування органічних речовин забезпечує високі щільності запасеної енергії і прийнятні техніко-економічні показники. Однак в процесі роботи теплового акумулятора з органічними ТАМ відбувається зниження теплоти плавлення внаслідок руйнування протяжних ланцюгів молекул полімерів. Через низький коефіцієнт теплопровідності органічних ТАМ потрібно створення і застосування розвинених поверхонь теплообміну, що накладає конструктивні обмеження на застосування теплового акумулятора.

При робочих температурах від 500 до 1600 °C використовуються з'єднання і сплави лужних і лугоземельних металів. Суттєвим недоліком застосування з'єднань металів є низький коефіцієнт теплопровідності, корозійну активність та зміну об'єму при плавленні.

Оскільки кращим варіантом теплообмінної поверхні є її повна відсутність, тобто безпосереднього контакту теплоакумулюючого матеріалу і теплоносія, тому необхідно підбирати як відповідні матеріали, так і теплоносії за ознаками, що забезпечують працездатність конструкцій.

Теплоакумулюючі матеріали повинні:

- кристалізуватися окремими кристалами;
- мати велику різницю густин твердої і рідкої фаз;
- бути хімічно стабільними;
- не утворювати емульсій з теплоносієм.

Теплоносії підбираються за наступними ознаками:

- хімічна стабільність у суміші з ТАМ;
- велика різниця густин по відношенню до ТАМ;
- мала здатність до спінення.

Застосування термохімічних циклів у теплових акумуляторах засновано на принципі виникнення хімічного потенціалу в результаті оборотної хімічної реакції у нерівноважному стані. Важливою перевагою хімічних способів акумулювання теплової енергії, у порівнянні зі звичайними, є те, що запасена енергія може зберігатися достатньо тривалий час без застосування теплової ізоляції; транспортувати енергію на значні відстані.

3.8. Трансформатори теплоти

3.8.1. Класифікація трансформаторів теплоти

Пристрої для переносу теплової енергії від тіла з більш низькою температурою T_n (тепловіддавач) до тіла з більш високою температурою T_v (теплоприймачу), називаються трансформаторами теплоти. Для перетворення теплоти необхідно затратити зовнішню енергію (механічну, електричну і т.д.). Трансформатори теплоти підрозділяються на холодильні й теплонасосні установки.

У холодильних установках температура тепловіддавача T_n нижче температури навколишнього середовища ($T_n < T_o$), тоді як температура теплоприймача дорівнює температурі навколишнього середовища ($T_v = T_o$). У теплонасосних установках температура тепловіддавача дорівнює або трохи вище температури навколишнього середовища, тоді як температура теплоприймача значно вище температури навколишнього середовища, тобто:

$$T_n \geq T_o \text{ і } T_v \geq T_o. \quad (3.28)$$

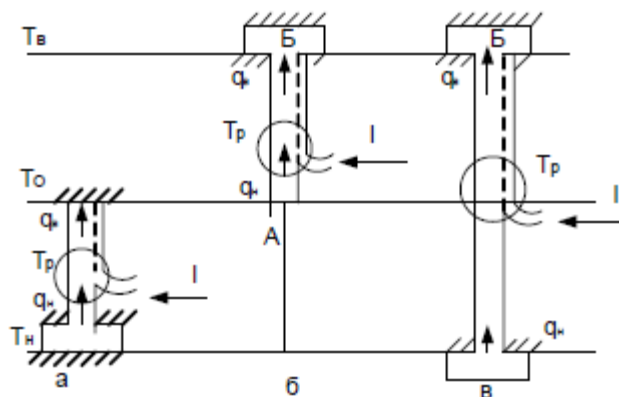
Трансформатор теплоти може працювати як у режимі холодильної установки, так і в режимі теплового насоса, або одночасно в двох режимах. Такий процес називається комбінованим. Принципова схема роботи трансформаторів теплоти наведена на рисунку 3.15.

У холодильній установці (рис. 3.15 а), як різновид трансформатора теплоти, процес протікає наступним чином. Охолоджене тіло А віддає теплоту холодоагенту при температурі $T_n < T_o$; потім у холодильній машині за рахунок підведеної механічної енергії l відбувається підвищення температури холодоагенту до температури T_o . Нагрітий холодоагент передає в навколишнє середовище кількість теплоти $q_o = q_n + l$.

У тепловому насосі (ТН) (рис. 3.15 б) процес протікає аналогічно, але при інших температурних потенціалах. Тут частина теплоти навколишнього середовища з температурою T_o передається тілу Б, яке нагрівається.

У комбінованій установці (рис. 3.15 в) одночасно відбувається вироблення теплоти і холоду (охладжується середовище А і нагрівається середовище Б).

Отже, в холодильних установках відбувається штучне охолодження тіл, температура яких нижче температури навколишнього середовища, тоді як у теплових насосах використовується теплота навколишнього середовища або інших низькопотенційних джерел (температурний рівень $t = 10 \dots 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$) з метою теплопостачання. Джерелами низькопотенційної теплоти в теплонасосних установках служать природне середовище (повітря, вода, ґрунт) або промислові відходи теплоти.



*а - холодильна установка; б – теплонасосна установка;
в – комбінована установка*

Рисунок 3.15 – Принципова схема роботи трансформаторів теплоти

3.8.2. Термодинамічні основи процесів трансформації теплоти

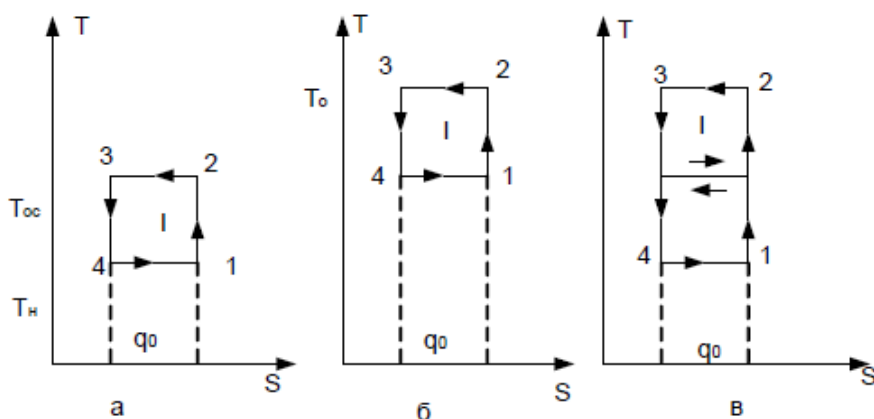
Трансформатори теплоти, призначені для переносу теплоти з нижчого температурного рівня на більш високий, працюють за принципом зворотних циклів. Найбільш удосконаленим з них є зворотний цикл Карно. На рисунку 3.16 представлені зворотні цикли

Карно для трансформаторів теплоти, які здійснюють холодильний, теплонасосний і комбінований процеси.

Основне рівняння теплового балансу зворотного циклу:

$$q_6 = q_n + l \quad (3.29)$$

де q_6 і q_n - теплота, передана робочому тілу з більш високою температурою і відведена від охолодженого тіла; l – енергія, підведена до робочого тіла.



*а – холодильний цикл; б – цикл теплового насосу;
в – комбінований цикл*

Рисунок 3.16 – Діаграми зворотних циклів

Ефективність ТН (рис. 3.16, б) оцінюється коефіцієнтом перетворення ϕ (COP) відношення теплоти, яка отримана робочим тілом з температурою T_v до механічної роботи, витраченої в установці:

$$\phi = \frac{q_6}{l} = \frac{q_6}{q_6 - q_0}. \quad (3.29)$$

Тоді коефіцієнт перетворення для циклу Карно:

$$\Phi_k = \frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{в}} - T_0}. \quad (3.30)$$

Трансформатори теплоти, які працюють за комбінованим циклом (рис.7.?, в), можуть знайти застосування на об'єктах, де одночасно потрібні теплота і холод. Прикладом таких підприємств можуть служити підприємства, де необхідна одночасно гаряча вода з температурою 40-70°C на побутові й технологічні потреби і холодна вода з температурою 3-8°C для кондиціонування повітря приміщень.

Термотрансформація теплоти може бути реалізована у таких технологічних системах і установках:

- системах повітряного опалювання;
- системах технологічного кондиціонування повітря;
- сушильних установках конвективного типу;
- випарних установках;
- кристалізаційних установках;
- ректифікаційних установках;
- екстракційних установках.

3.8.3. Класифікація та термодинамічний цикл ТН

Теплові насоси, як і будь-які інші термомеханічні системи, можуть бути класифіковані за рядом ознак, головною з яких, поза сумнівом, є принцип дії. За цією ознакою розрізняють:

- парокомпресійні (ПКТН);
- абсорбційні (АТН);
- струминні (СТН);
- термоелектричні (ТЕТН).

Оптимізація енергоефективності при застосуванні теплових насосів і установок привела до виділення ще однієї важливої ознаки - валентності режиму теплового насоса в загальній схемі теплопостачання (теплогенерації):

- моновалентні - тільки тепловий насос;
- бівалентні - з додатковим джерелом теплоти.

Різновидом бівалентного режиму роботи є моноенергетичний режим. Для подібного режиму тепловий насос і додатковий теплогенератор використовують один і той самий вид енергоносія, як правило, електроенергію.

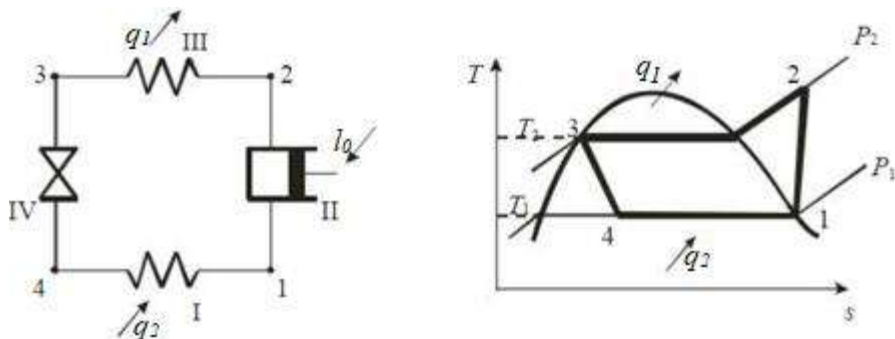
При використанні як утилізованого середовища природних джерел, а середовищем споживача є вода або атмосферне повітря, теплові насоси позначають у вигляді:

- повітря - повітря, повітря - вода;
- ґрунт - повітря, ґрунт - вода;
- вода-повітря, вода-вода.

У деяких випадках теплові насоси класифікують за типом привода:

- електропривід;
- двигуни внутрішнього згорання;
- турбопривід.

На разі найбільше розповсюдження набули парокомпресійні ТН. Схема і цикл парокомпресійного ТН зображені на рисунку 3.17.



I – випарник, II – компресор, III – конденсатор, IV – дросель

Рисунок 3.17 - Схема парокомпресійного теплового насоса і його цикл у T - s – діаграмі

Робочими агентами теплових насосів служать: фреон-11, фреон-21, фреон-113, фреон-114, фреон-142, гази й газові суміші (у тому числі і повітря), які мають низьку температуру кипіння при атмосферному тиску.

Тепловіддавачем у випарнику можуть бути джерела природної теплоти - зовнішнє повітря, вода природних водойм, ґрунт і т.д. Якщо тепловіддавачем служить термальна або охолоджена вода промислових печей, конденсаторів турбін та інших виробничих агрегатів, то енергетичний ефект роботи теплового насоса збільшується.

Ефективність циклу теплового насоса, що споживає для переносу теплоти роботу, і характеризується COP та виражається наступним виразом:

$$\phi = \frac{q_1}{l_0} = \frac{q_2 + l_0}{l_0} = \varepsilon + 1. \quad (3.31)$$

З останнього виразу витікає, що при холодильному коефіцієнті $\varepsilon = 3 \dots 4$ споживач одержує у три-чотири рази більше питомої теплоти, що витягується з навколишнього середовища, ніж при звичайному електрообігріві і тій же питомій витраті електроенергії l_0 . Використання теплового насоса тим ефективніше, чим нижче температура, при якій споживачу необхідна теплота (зі зниженням температури споживачу збільшується ε).

У тих випадках, коли джерелом низькопотенційної теплоти є охолоджуюча вода промислових печей та інші промислові та побутові стічні води.

Теплонасосні установки (ТНУ) останнім часом набули широкого використання при утилізації низькопотенційної теплоти (температурний рівень $t = 10 \dots 50$ °C), зокрема охолоджувальної води градирень, промислових печей, тощо.

3.9. Використання ВДЕ

Енергетична стратегія України на період до 2035 року передбачає широке використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Використання ВДЕ зумовлено двома негативними тенденціями розвитку традиційної енергетики: швидким виснаженням природних ПЕР і забрудненням навколишнього

середовища. Перевагою поновлюваних джерел енергії є також їх можливість локального використання у будь-якому районі країни.

З обліком природних, географічних і метеорологічних умов перевага віддається малим гідроелектростанціям, вітроенергетичним установкам, біоенергетичним установкам, установкам для спалювання відходів рослинництва і побутових відходів, геліоводопідігрівачам. Потенціал цих джерел України оцінюється у 6 % від усієї розрахункової економії палива, що планується одержати за рахунок енергозбереження. Їх застосування дасть реальну економію палива, відчутний соціальний ефект, значно зменшить негативний вплив енергетики на довкілля.

3.9.1. Геліоенергетика

Електромагнітним випромінюванням сонячна енергія передається в космічному просторі і досягає поверхні Землі, з потужністю близько $1,2 \cdot 10^{11}$ Вт. Одержання такої енергії на протязі однієї години досить, щоб задовольнити енергетичні потреби всього населення Земної кулі протягом року. Максимальна щільність потоку сонячного випромінювання, що приходить на Землю, складає приблизно 1 кВт/м^2 . В залежності від місця, часу доби і погоди потоки сонячної енергії міняються від 3 до 30 МДж/м^2 у день.

Геліоводопідігрівники. Для енергетичних цілей найбільш розповсюджено використання сонячного випромінювання для нагрівання води в системах опалення і гарячого водопостачання. Основним елементом сонячної нагрівальної системи є приймач, у якому відбувається поглинання сонячного випромінювання і передача енергії рідини. Найбільш розповсюджені плоскі приймачі, які дозволяють збирати як пряме, так і розсіяне випромінювання. Вони мають невисоку вартість і є кращими при нагріванні рідин до температур нижче 100°C .

Підігрівники повітря. Сонячне випромінювання можна використовувати для підігріву повітря, просушування зерна та інших сільськогосподарських та інших матеріалів, для обігріву споруд і будинків.

Сонячні системи для одержання електроенергії (сонячні електростанції). Концентрація сонячної енергії дозволяє одержувати температури до 700 °С, що досить для роботи звичайного теплового двигуна з прийнятним коефіцієнтом корисної дії. Наприклад, параболічний концентратор з діаметром дзеркала 30 м дозволяє сконцентрувати потужність випромінювання порядку 700 кВт, що дає можливість одержати до 200 кВт електроенергії. Колектор передає сонячну енергію теплоносію (останній у цьому випадку може являти собою водяну пару високої температури), яка спрямовується в парову турбину для вироблення електроенергії.

Акумулятори теплової енергії. Застосування описаних нижче стандартних нагрівачів виявляється занадто дорогим для нагрівання великих обсягів рідини до температур ≤ 100 °С. В цьому випадку ефективно застосування «сонячного ставка», який являє собою оригінальний нагрівач, де теплозахисною поверхнею є вода.

В таку штучну велику водойму заливається кілька шарів води різного ступеня солоності. Шар найбільшої солоності, товщиною приблизно 0,5 м, розташовується на дні і нагрівається за рахунок сонячного випромінювання, яке поглинається дном водойми.

Таким чином, у неоднорідній водоймі придонний шар води більш солоний, чим шар над ним, і його щільність хоча і зменшується при нагріванні, але залишається вище щільності більш високого шару. Відсутність конвекції, що має місце в даному випадку, веде до того, що придонний шар нагрівається усе сильніше. Використання розчинів, щільність яких підвищується при нагріванні, дозволяє мати стабільні сонячні ставки, в яких досягається рівноважна температура 90°С и вище.

Пряме перетворення сонячної енергії в електричну (фотоелектричні перетворювачі). Найбільш оптимальним є пряме перетворення сонячної енергії в електричну, що стає можливим при використанні *фотоефекту*.

Фотоефект – електричне явище, яке відбувається при освітленні речовини, а саме: вихід електронів з металів (фотоелектрична емісія чи зовнішній фотоефект); переміщення зарядів через границю розділу напівпровідників з різними типами провідності (р-п) (вентильний фотоефект); зміна електричної провідності (фотопровідність).

При освітленні границі розділу напівпровідників з різними типами провідності (р-п) між ними встановлюється різниця потенціалів (фото ЕДС). Це явище називається вентильним фотоелементом, на використанні якого засноване створення фотоелектричних перетворювачів енергії (сонячних елементів і батарей).

Типова структура сонячного елемента з р-п переходом зображена на рисунку 3.18 і включає: 1 – шар напівпровідника (товщиною 0,2–1,0 мікрон) з п-провідністю; 2 – шар напівпровідника (товщиною 250–400 мікронів) з р – провідністю; 3 – додатковий потенційний бар'єр (товщиною 0,2 мкм); 4 – металевий контакт з тильної сторони; 5 – сполучний провідник з лицьовою поверхнею попереднього елемента; 6 - противідбивне покриття; 7 – лицьовий контакт; 8 – провідник з'єднання з контактом наступного елемента. Сонячні елементи з'єднуються послідовно в сонячні модулі, які, в свою чергу, паралельно – в сонячні батареї (рис.3.19).

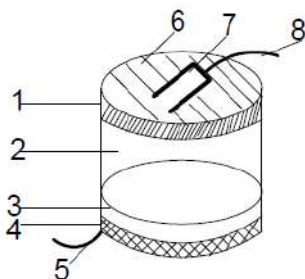
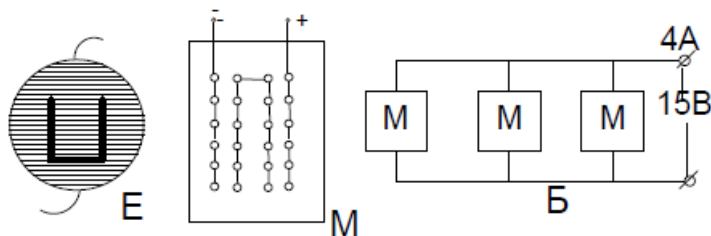


Рисунок 3.18 – Сонячний елемент

Основними компонентами сонячної енергетичної установки є сонячна батарея з приладами контролю і керування, акумуляторна батарея, інвертор для перетворення постійного струму сонячної батареї у змінний струм промислових параметрів, що споживається більшістю електричних пристроїв. Незважаючи на нерівномірність добового потоку сонячного випромінювання і його відсутність у нічний час, акумуляторна батарея за рахунок накопичення електрики, яка виробляється сонячною батареєю, дозволяє забезпечити безупинну роботу сонячної енергетичної установки.



E – Сонячний елемент; M – Сонячний модуль; Б - Сонячна батарея

Рисунок 3.19 – Складові сонячної батареї.

3.9.2. Вітроенергетика

У вітроенергетичних установках (ВЕУ) енергія вітру перетворюється в механічну енергію робочих органів. Первинним і основним з них є вітроколесо, що безпосередньо приймає на себе енергію вітру і, перетворює її в кінетичну енергію обертання.

Автономні вітроустановки дуже перспективні для заміни дизельних електростанцій і опалювальних установок, що працюють на нафтопродуктах, особливо у віддалених районах, і можуть бути призначені для безпосереднього виконання механічної роботи (наприклад, приводу водяного насоса) або для виробництва електроенергії. В останньому випадку вони приводять в дію електрогенератор і разом з ними називаються вітрогенераторами.

Вітроустановки класифікуються за двома основними ознаками: геометрії вітроколеса і його положенні щодо напрямку вітру. Якщо вісь обертання вітроколеса паралельна повітряному потоку, то установка називається горизонтально-осьовою, якщо перпендикулярна - вертикально-осьовою.

Використання вітроустановок для виробництва електроенергії є найбільш ефективним засобом утилізації енергії вітру. Вимоги до показників частоти та напруги електроенергії, яка виробляється ВЕУ, залежать від особливостей споживачів. Ці вимоги досить тверді при роботі ВЕУ у рамках єдиної енергетичної системи і доволі м'які – при використанні енергії вітроустановок в освітлювальних та нагрівних установках.

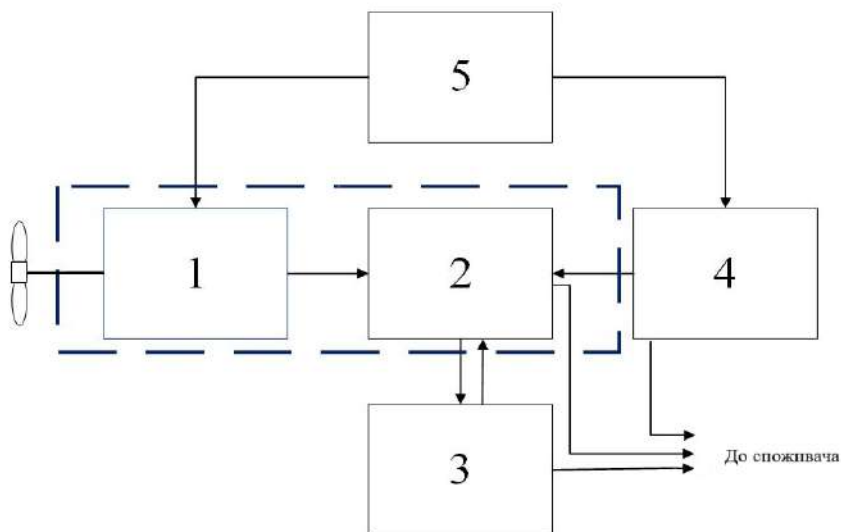
До складу ВЕУ також входить електрогенератор та система керування параметрами генерувальної електроенергії в залежності

від зміни сили вітру та швидкості обертання колеса. Для виключення перебоїв в електропостачанні БЕУ у періоди безвітря, потрібні акумулятори електричної енергії або запаралелення з електроенергетичним обладнанням інших типів.

Одним із засобів керування електроенергією вітру є випрямлення змінного струму БЕУ, а потім перетворення його у змінний струм з заданими стабілізованими параметрами.

На рисунку 3.20 наведена схема вітряної електричної установки постійного струму.

Вітряне колесо приводить у рух динамо-машину – генератор електричного струму, який одночасно заряджає паралельно з'єднанні акумулятори. Акумуляторна батарея автоматично підключається до генератора в той момент, коли напруга на його вихідних клеммах стає більше, ніж на клеммах батареї, і також автоматично відключається при протилежному співвідношенні.



1 – генератор електричного струму; 2, 3, 4 – акумуляторні батареї; 5 – контрольно-вимірювальний прилад

Рисунок 3.20 – Принципова схема вітряної електричної установки

3.9.3. Гідроенергетика

Гідроенергетика – найбільш розвинута галузь енергетики на поновлюваних ресурсах. Крім енергії потоку річок може широко використовуватись енергія хвиль і припливів морів.

Енергія хвиль. Велику кількість енергії можна одержати від морських хвиль. Потужність, що переноситься хвилями на глибокій воді, пропорційна квадрату їх амплітуди і періоду. Тому значний інтерес являють довгоперіодні (період порядку 10 с) хвилі з великою амплітудою (порядку 2 м), які дозволяють знімати з одиниці довжини гребня в середньому 50-70 кВт/м.

Існує багато технічних рішень, що дозволяють реалізувати можливість перетворення енергії хвиль в електроенергію. Сучасна тенденція розробки таких установок орієнтована на одиничні модулі помірної потужності (близько 1 МВт) розміром порядку 50 м уздовж фронту хвилі. У результаті хвильового руху рідини в хвилі одночасно зі зміною положення рівня і нахилу поверхні відбувається зміна кінетичної і потенційної енергії, зміна тиску під хвилею. На основі використання однієї характерної ознаки хвильового руху чи їхньої комбінації вже створені пристрої, що поглинають і перетворюють хвильову енергію.

Енергія припливів приховує в собі великі потенційні можливості. Приливні коливання рівня у величезних океанах планети цілком передбачувані і пов'язані з гравітаційним впливом Місяця на водяні масиви Землі. Основні періоди цих коливань - добові (тривалістю близько 24 год) і півдобові (близько 12 год. 25 хв). Різниця між послідовними найвищим і найнижчим рівнями води складає 0,5-10 м (висота припливу). Під час припливів і відливів переміщення водяних мас утворює приливні плинні, швидкість яких у прибережних протоках і між островами може досягати 5 м/с.

3.9.4. Біоенергетика

Концепція Енергетичної програми України до 2035 року передбачає перелік великомасштабних заходів в галузі біоенергетики. Вважається, що застосування біоенергетичних установок по переробці відходів тваринництва дозволить істотно

поліпшити екологічний стан поблизу великих тваринницьких комплексів, де зібрана величезна кількість непереробної біомаси. Крім того, можна розраховувати на одержання високоякісних органічних добрив і за рахунок виробництва біогазу забезпечити економію традиційного палива.

Щорічно накопичується велика кількість твердих побутових відходів, які направляються на смітники. Потенційна енергія, укладена в них, еквівалентна сотням тисяч тон умовного палива.

У світовій практиці одержання енергії з твердих побутових відходів здійснюється в основному спалюванням і газифікацією. Як сировину для одержання рідкого і газоподібного палива можливе застосування біомаси швидкозростаючих рослин і дерев. Для цих цілей вважається доцільним використовувати площі вироблених торф'яних родовищ, не придатні для вирощання сільсько-господарських культур, а також площі чорнобильської зони.

Розрізняють наступні типи енергетичних процесів, що пов'язані з переробкою біомаси:

Термохімічні процеси.

- Пряме спалювання для отримання теплоти;

- Піроліз.

- Гідрогенізація, при якій здрібнену розкладену або переварену біомасу нагрівають в атмосфері водню до температури близько 600 °С при тиску близько 5 МПа. Одержувані при цьому горючі гази, переважно метан та етан, при спалюванні дають близько 6 МДж на 1 кг сухої сировини.

Біохімічні процеси.

- Анаеробна переробка. Під час відсутності кисню деякі мікроорганізми здатні одержувати енергію, безпосередньо переробляючи вуглецевоутримуючі складові. При цьому виробляється суміш вуглекислого газу CO_2 , метану CH_4 і побічних газів, що називається біогазом.

- Одержання біогазу. Економічно виправдано, коли відповідний біогазогенератор переробляє існуючі потоки відходів, прикладами яких можуть служити стоки каналізаційних систем, тваринницьких ферм тощо. Одержання біогазу особливо ефективно на агропромислових комплексах, де доцільна реалізація повного екологічного циклу. Біогаз використовують для освітлення,

приведення в дію машин і механізмів, електрогенераторів, для ведення технологічних процесів та обігріву приміщень. Оброблені відходи використовуються як високоякісні добрива.

- Спиртова ферментація. Етиловий спирт - летке рідке паливо, яке може використовувати замість бензину. Він виробляється мікроорганізмами в процесі ферментації. Як сировина звичайно використовують цукор.

Агрохімічні процеси. Серед них найвідомішим є екстракція палив, при якому вони можуть бути отримані прямо від тварин або рослин, наприклад, процес одержання каучуку.

Контрольні питання

1. Які джерела та класифікація ВЕР?
2. Напрямки використання та енергоефективність ВЕР.
3. Наведіть приклад використання паливних ВЕР?
4. Наведіть приклад використання теплових ВЕР?
5. Яким чином здійснюється комбіноване вироблення теплової і електричної енергії?
6. За рахунок чого когенерація ефективніше роздільного вироблення теплової і електричної енергії?
7. Призначення та класифікація КГУ.
8. Вироблення тепло і електроенергії на базі ГПА, ГТУ та ПГУ.
9. В яких випадках і за рахунок чого можна інтенсифікувати теплопередачу?
10. Необхідність турбулізуючих елементів труб теплообмінників.
11. Конструкція та основні елементи теплових труб.
12. Застосування та ефективність теплових труб.
13. Призначення та використання трансформаторів теплоти.
14. Принцип роботи теплового насоса.
15. Види холодильних агентів, що застосовуються у теплових насосах.
16. Чим визначається ефективність роботи теплового насоса?
17. Назвіть способи акумулювання теплової енергії.
18. Призначення АХ в охолоджувальних системах.
19. Назвіть галузі застосування акумуляторів холоду.

4. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВКАХ

Теплотехнологічні процеси у промисловому виробництві посідають одне з провідних місць. Промислові установки, де реалізуються ці процеси, створюють через теплотехнічні комплекси технічну базу основних виробництв у важливих галузях народного господарства, якими є чорна та кольорова металургія, виробництво будівельних матеріалів, хімічна, нафтохімічна, харчова промисловість, машинобудування тощо.

Надзвичайно важливим є вивчення основ енергоощадних теплотехнологій та перспектив зниження енерговитрат на високотемпературні теплотехнологічні процеси. Якщо перетворення потенціальної енергії палива у теплоту пари в котельних агрегатах відбувається з високим ККД ($\eta = 80-90\%$), то використання теплоти у теплотехнологічних установках складає всього 30-60%, тому значним резервом підвищення ефективності використання теплоти і, відповідно, палива є раціоналізація теплотехнологічних процесів і установок.

4.1. Види та класифікація високотемпературних теплотехнологічних установок

Залежно від числа камер, в яких реалізуються всі стадії технологічного процесу, виділяють установки з однокамерним і багатокамерним робочим простором. Установки з однокамерним або однозонним робочим простором (наприклад, паливні, мартенівські і нагрівальні печі) характеризуються відносно рівномірним температурним полем грійних газів в об'ємі і, як правило, циклічністю їх дії. Установки з таким робочим простором і циклічною дією в найменшій мірі задовольняють сучасним вимогам.

При однокамерному, але багатозонному робочому просторі, установки відрізняються безперервністю роботи і нерівномірним полем температур газів в об'ємі (наприклад, методичні нагрівальні печі, шахтні печі, обертові печі). Установки з таким робочим простором більш прогресивні, ніж перші.

Найбільш широкі можливості у виконанні сучасних потреб відкривають варіанти високотемпературних теплотехнологічних установок з багатокамерним комбінованим робочим простором, якщо при цьому забезпечується набір ефективних теплотехнічних принципів і джерел енергії, а також реалізується досконала теплова схема. У багатозонному і багатокамерному робочому просторі можна виділити відповідно наступні зони і камери:

- попередньої теплової або теплової і фізико-хімічної обробки вихідних матеріалів;
- основної технологічної обробки матеріалів, де або завершується технологічний процес в цілому, або проводиться його вирішальна стадія;
- технологічної доробки матеріалів;
- технологічно регламентованого охолодження технологічного продукту.

На відміну від цих технологічних зон і камер пристрої, в яких відбувається технологічно не регламентоване охолодження продукту, відносяться до теплотехнічних елементів установки.

У загальному випадку теплотехнологічна установка містить від однієї до декількох зон або камер робочого простору.

У високотемпературних теплотехнологічних установках використовуються наступні джерела енергії:

- паливо з повітряним окиснювачем (ПП);
- паливо зі збагаченим киснем повітрям (ПЗП);
- паливо з технологічним киснем (ПК);
- продукти горіння палива від суміжних установок;
- електроенергія, способи реалізація якої можуть бути різними, в тому числі і через низькотемпературну плазму;
- комбіновані джерела енергії, які включають сумісне використання в печі джерел ПП і ПК; спільне використання ПП (ПК) і електроенергії; інші варіанти поєднання джерел енергії.

Застосування комбінованих джерел енергії з використанням кисню і електроенергії є однією з особливостей нових теплотехнологічних систем.

У високотемпературних теплотехнологічних установках з газовим теплоносієм найбільш широко використовуються наступні теплотехнічні схеми і принципи:

- 1) щільного фільтрувального шару – теплова обробка вільного засипання подрібнених матеріалів, дрібних виробів та інших тіл;
- 2) киплячого або псевдозрідженого шару – теплова обробка зернистих або грубо подрібнених матеріалів;
- 3) зваженого шару – теплова обробка подрібнених матеріалів в умовах газової суміші;
- 4) пересипного шару – теплова обробка сипкого матеріалу, що пересувається різними способами;
- 5) укладених завантажень – теплова обробка кладки виробів або напівфабрикатів;
- 6) що випромінює факела або що випромінює газовий потік;
- 7) поверхневого випромінювача;
- 8) зануреного факела – теплова обробка матеріалу у ванні розплаву, що продувається газовим теплоносієм;
- 9) комбінована – теплова обробка матеріалів в умовах послідовного застосування двох або декількох теплотехнічних способів.

Відповідно до цих принципів можна виділити дев'ять типів високотемпературних теплотехнологічних установок з газовим теплоносієм, що має аналогічну назву (наприклад, установка з киплячим шаром, установка із зануреним факелом тощо).

Застосування комбінованих теплотехнічних принципів є характерною особливістю багатьох нових і радикально модернізованих діючих теплотехнологічних установок.

Класифікація теплотехнологічних установок з електричним джерелом енергії і способам електричного нагріву:

- непрямого нагріву (наприклад, печі опору);
- прямого (контактного) нагрівання;
- індукційного нагріву;
- електродугового нагріву;
- електронно-променевого нагріву;
- плазмового нагріву.

В установках без зовнішнього теплоспоживання теплота компонентів горіння використовується на нагрів вихідних матеріалів або ендотермічну обробку палива (хімічна регенерація). Такі установки можуть мати високий ККД використання палива тільки при глибокій регенерації теплоти.

В установках із зовнішнім (додатковим) замикаючим тепловикористанням теплоту після регенерації направляють на виробництво іншої технологічної або енергетичної продукції. таке тепловикористання безпосередньо не вирішує жодних технологічних задач даної теплотехнологічної установки (чому і називається зовнішнім), але може виступати як засіб економії палива в заміщаючих (по додатковій продукції) установках.

Прикладом теплових схем високотемпературних теплотехнологічних установок з прибудованими елементами установок зовнішнього тепловикористання є традиційні промислові печі, що доповнюються без зміни структурної схеми технологічної установки котлами-утилізаторами, випарним охолодженням елементів огороження камер робочого простору, низькотемпературними технологічними апаратами.

Теплотехнологічні установки з органічно вбудованими елементами установок зовнішнього тепловикористання відрізняються тим, що останні вкорінюються у структурну схему основної установки, змінюючи її так, щоб забезпечити найбільш сприятливі умови роботи камер робочого простору і всієї установки в цілому.

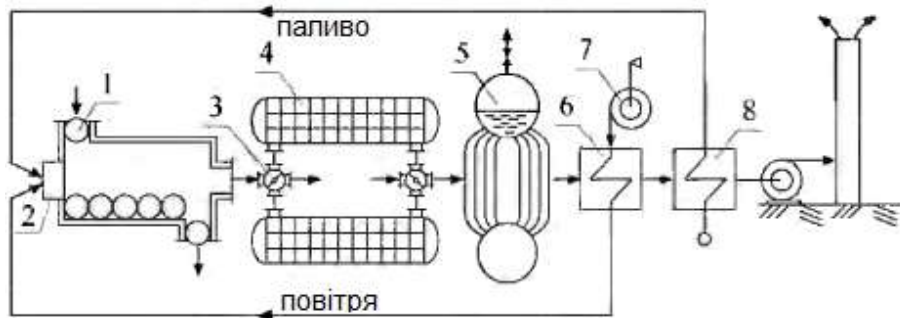
Теплотехнологічні установки із зовнішнім замикаючим тепловикористанням, призначені для одноцільового вироблення заданої технологічної продукції, відрізняються від комбінованих агрегатів технологічного або енерготехнологічного призначення.

Наприклад, комбінований енерготехнологічний агрегат призначається для вироблення енергетичної і технологічної продукції при заданих для кожної з них рівнях виробництва, будучи альтернативним рішенням роздільного варіанту вироблення цих видів продукції.

4.2. Заходи з енергозбереження у високотемпературних теплотехнологічних установках

Прикладом теплових схем високотемпературних теплотехнологічних установок з прибудованими елементами установок зовнішнього тепловикористання є традиційні промислові печі, що доповнюються котлами-утилізаторами, випарним

охолодженням елементів огороження камер робочого простору, низькотемпературними технологічними апаратами. На рисунку 4.1 наведена схема пічної установки, яка включає робочу камеру для генерації теплоти і передачі її матеріалу, регенератори, котел-утилізатор, теплообмінні апарати для нагрівання палива і дуттьового повітря, що забезпечують енергозбереження такої теплотехнологічної установки.



1 – вироби, що нагріваються у робочій камері; 2 – пальник; 3 – перекидний клапан; 4 – регенеративний повітропідігрівник; 5 – котел-утилізатор; 6 – повітропідігрівник; 7 – вентилятор; 8 – підігрівник палива

Рисунок 4.1 – Схема пічної установки.

Питання енергозбереження є надзвичайно актуальними для нагрівальних і термічних печей металургійних та машинобудівних підприємств і підприємств інших галузей, де поряд з сучасними механізованими печами існує велика кількість фізично і морально застарілих печей, що не піддавалися реконструкції і працюють з дуже високими енерговитратами. Основні конструктивні рішення та способи, спрямовані на економію енергоресурсів при новому будівництві та реконструкції промислових печей, наступні.

4.2.1. Оптимальний вибір конструктивних та технологічних параметрів установки

Тип печі робить вирішальний вплив на енергоспоживання печі. Наприклад, печі з роликівим подом є найбільш універсальними за технологією і оброблюваних виробів, добре

вбудовуються в безперервні лінії виробництва, проте необхідність охолодження роликів в високотемпературних печах призводить до підвищеного енергоспоживання. Тому для високотемпературного нагріву печі з роликівим подом застосовуються у виняткових випадках. Напруга поду характеризує інтенсивність роботи печі і визначає використання тепла палива в робочому просторі печі. Тому при їх проектуванні або реконструкції необхідно прагнути до високої інтенсивності роботи печі, оскільки це дозволяє збільшити її продуктивність або зменшити розміри печі при тій же продуктивності. Але якщо підвищення інтенсивності роботи печі відбувається за рахунок збільшення температури в печі та температури відхідних продуктів згоряння, то наслідком є погіршення використання тепла в робочому просторі печі і підвищення енерговитрат.

У той же час підвищення інтенсивності роботи за рахунок інтенсифікації теплообмінних процесів дозволяє знизити питомі енерговитрати при інших рівних умовах. Тому для енергозбереження слід вибирати засоби і системи, інтенсифікують теплообмін в робочому просторі печі. До таких засобів можна віднести імпульсну, факельно-склепову і струменево-факельну системи опалення, струменевий обдув, організовану циркуляцію тощо.

4.2.2. Використання сучасних вогнетривких матеріалів

Застосування сучасних вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів дозволяє значно зменшити втрати тепла через кладку, поліпшити щільність печі, збільшити стійкість футеровки і міжремонтні періоди роботи печі.

Інколи є можливість замінити низькощільним керамічним волокнистим вогнетривким матеріалом високощільну вогнетривку цеглу або набивну вогнетривку футерівку. Застосування керамічних волокнистих вогнетривких матеріалів зменшує втрати теплоти через стіни печі, у зв'язку з чим необхідна менша кількість енергії для їх нагріву під час розпалювання. Перехід на волокнисті вогнетривкі матеріали в обпалювальних печах приводить до значної (до 33 %) економії палива.

В даний час для футерування методичних нагрівальних печей широко застосовуються жаротривкі бетони, пластичні і набивні маси, волокнисті і легковагі вогнетриви вітчизняних і зарубіжних фірм. Великий ефект для методичних нагрівальних печей дає виконання підвісного склепіння з жаротривкого бетону. Підвісне склепіння з штучних фасонних вогнетривів нещільний, що викликає великі втрати тепла і фільтрацію продуктів згоряння. Бетонний звід виконується з декількох шарів і кріпиться на керамічних анкерах. Внутрішній шар, звернений в робочий простір печі, виконується з жаротривкого бетону з вмістом Al_2O_3 не менше 50%. Бетонний звід володіє високою щільністю, хорошими ізолюючими властивостями, його стійкість перевищує стійкість підвісного зводу з фасонних вогнетривів в 5-10 разів.

Дуже важлива якість вогнетривів, що застосовуються для виконання подини печей. Вони повинні мати високу вогнетривкість та термостійкість, достатню міцність при ударному і стирається впливі заготовок, не повинні реагувати з обсіпається окалиною. Для футеровки подини штовхальних печей доцільно використовувати в верхньому робочому шарі жаротривкі бетони з вмістом Al_2O_3 не менше 80%.

4.2.3. Ущільнення робочого простору печей

Для ущільнення робочого простору печей застосовуються наступні заходи:

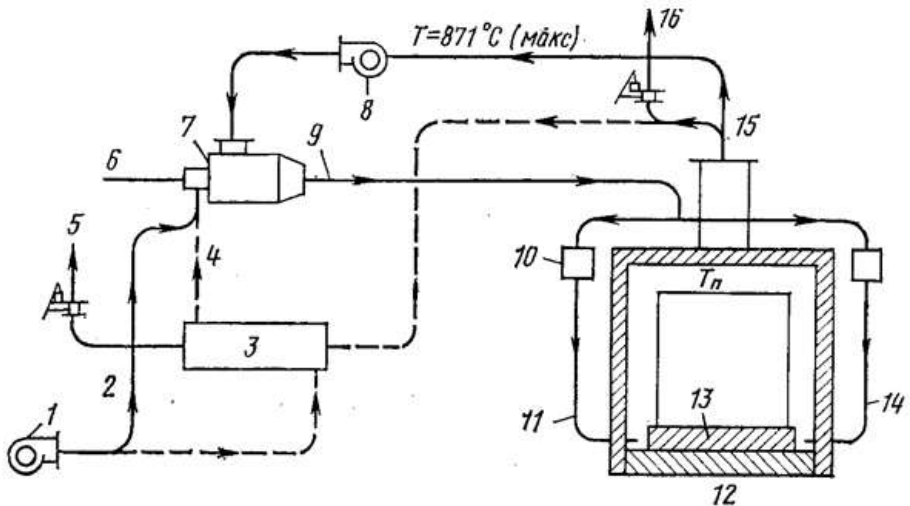
- застосування щільних футеровок з неформованих вогнетривів (вогнетривких бетонів, набивних та пластичних мас) замість кладки з штучних цегли з великою кількістю кладок швів;
- в прохідних нагрівальних печах застосування, де це можливо, бічний посадки і видачі, мінімальні розміри вікон для посадки і видачі, газові завіси на цих вікнах, скорочення кількості робочих вікон і застосування щільних заслінок на робочих вікнах;
- водяні затвори по всьому периметру біля печей з крокуючим подом;
- механічний притиск заслінок в камерних печах;
- в прохідних термічних печах із захисною атмосферою застосування газодинамічних, шторних і клинових затворів;

- щільні гумові затвори з притисками в садочних печах із захисною атмосферою.

4.2.4. Використання системи рециркуляції

На рисунку 4.2 наведена схема рециркуляційної печі камерного типу.

Гази відводяться від печі, направляються через вентилятор гарячого газу до нагрівника рециркуляційного газу і повертаються у піч.



1 – вентилятор повітря для горіння; 2 – холодне повітря; 3 – рекуператор; 4 – гаряче повітря; 5 – відхідні гази після рекуператора; 6 – паливо; 7 – рециркуляційний газонагрівник; 8 – вентилятор гарячих газів; 9 – гарячі гази; 10 – колектор відхідних газів; 11 – гарячі гази при кінцевій витримці; 12 – піч; 13 – опора; 14 – подача гарячих газів під тиском; 15 – гарячі гази при кінцевій витримці; 16 – відхідні гази без рекуперації

Рисунок 4.2 – Рециркуляційна піч.

Газонагрівник сконструйовано таким чином, що повторно повернений газ служить охолодником камери згоряння. Перепад температур у системі подачі гарячого газу є мінімальним, фактичні значення втрат теплоти системи подачі гарячих газів можуть зберігатися на рівні 2...3 % від загальної витрати теплоти.

В наданій схемі печі наведено один з варіантів системи рециркуляції, який підходить тільки для високих температур термічної обробки. Ця система використовує інжекцію під високим тиском на відміну від систем з безпосереднім опаленням. Додатковою перевагою цієї системи є збільшення рециркуляції газів у межах самої камери печі. Швидкість вдування в ній значно вище, ніж у системах, де існують пальники з безпосередньою подачею палива, що в результаті досягається значно більша примусова рециркуляція у камері печі. Це дозволяє скоротити тривалість всього циклу при дотриманні заданої рівномірності нагріву.

Важливою перевагою печей рециркуляційного типу перед печами з безпосереднім опаленням є гнучкість у відношенні виду палива, яке використовується. В рециркуляційній печі можна спалювати мазут, легкі фракції нафти, висококалорійне газоподібне паливо, низькокалорійні гази.

4.3. Утилізація теплоти відхідних газів

4.3.1. Застосування рекуператорів і повітропідігрівників

Енергетична ефективність теплотехнологічних та інших енергетичних установок залежить від ступеня утилізації теплоти відхідних газів. Наприклад, відсутність рекуператорів, повітропідігрівників значно знижує їх ККД. Так, підвищення температури повітря за повітропідігрівником на кожні 50 °С забезпечує підвищення ККД котельного агрегату на 2%.

Установка рекуператорів і повітропідігрівників як основної хвостової поверхні установок обумовлюється їх потужністю, видом палива (деревні відходи, торф, буре вугілля), а також конструкцією топкових пристроїв.

Якщо повітря, що нагрівається в рекуператорі, подають для спалювання палива у печі, то величину економії палива в залежності від його теплоти згоряння і температурних умов роботи печі визначають за формулою:

$$p = \frac{H_n}{Q_n + H_n - H_d}. \quad (4.1)$$

де p – економія палива %, по відношенню до витрати палива при роботі без підігріву повітря; Q_H – теплота згоряння палива, кДж/м³ (кДж/кг); H_n – ентальпія підігрітого повітря, віднесена до одиниці об'єму або маси палива, кДж/м³ (кДж/кг); H_d – ентальпія димових газів, що виходять з печі, віднесена до одиниці об'єму або маси палива, кДж/м³ (кДж/кг);

Слід зазначити, що практична економія палива, отримана при підігріві повітря, дещо вища, ніж за формулою, оскільки при визначенні економії не враховують низку явищ, що супроводжують застосування підігрітого повітря наприклад: поліпшення якості горіння палива, зниження вмісту окису вуглецю у димових газах, а також підвищення продуктивності печі.

На рисунку 4.3 наведені графіки економії палива, одержані при підігріванні повітря у рекуператорах у випадку опалення у промислових печах природним газом. З графіку видно, що при підігріванні повітря до 300-350 °С, що можна здійснити в рекуператорах звичайного типу, економія палива в нагрівальних печах ($t_d = 1200$ °С) при опаленні їх газом досягає 20...25%.

У термічних камерних печах при підігріванні повітря до 300-350 °С одержують економію палива 15...20%.

Також дослідження показують, що зі зменшення теплоти згоряння палива величина економії палива зростає, що вказує на доцільність підігріву повітря при використанні такого палива.

Досвід експлуатації печей показує, що кожна одиниця теплоти внесена з підігрітим повітрям, яке йде для спалювання палива, більш цінна, ніж одиниця теплоти, одержувана в печі від горіння палива, оскільки потрібно врахувати, що одиниця теплоти, одержувана в печі від горіння палива, тільки частково використовується в її робочому просторі; інша частина іде з димовими газами. Одиниця теплоти, що утримується в підігрітому повітрі (газі), цілком використовується в робочому просторі печі, тому що при цьому не збільшується ні об'єм димових газів, що відходять, ні їхня температура.

За тепловим балансом підігрів повітря поряд зі зменшенням витратної частини, водночас переводить цю ж теплоту у прибуткову частину, що значно збільшує економію палива.

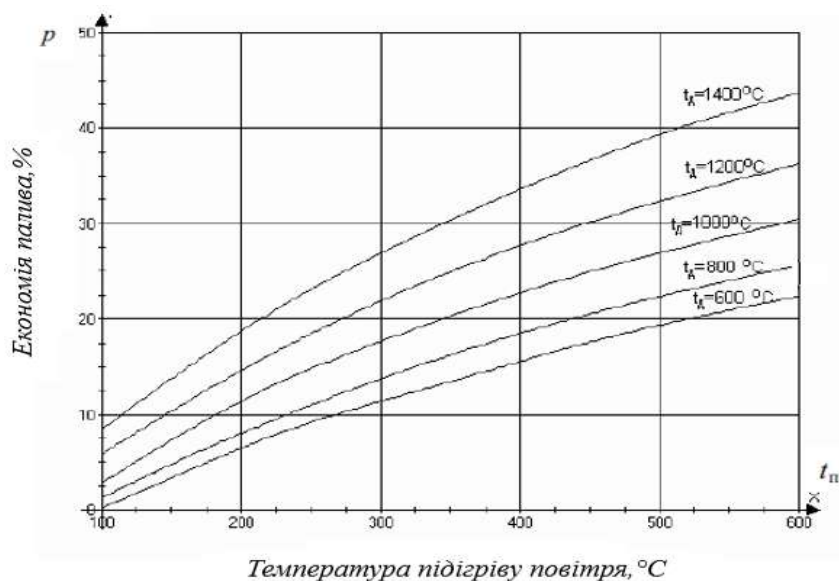


Рисунок 4.3 – Економія палива при підігріванні повітря в печах, опалюваних природним газом, $Q_n = 35600$ кДж/м³, при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,1$ в залежності від температури відхідних димових газів з печі

4.3.2. Використання котлів-утилізаторів

Котли-утилізатори є надійними, простими, високо-ефективними енергетичними установками, що призначені для утилізації теплових відходів різних технологічних установок (нагрівальних, обпалювальних, мартенівських печей) і отримання додаткової продукції у вигляді пари або гарячої води, що призводить до економії палива і енергоресурсів.

Продуктивність агрегату залежить від температури і кількості технологічних газів, теплота яких утилізується. При умові, якщо котел вбудовується в технологічний ланцюг, він називається енерготехнологічним агрегатом.

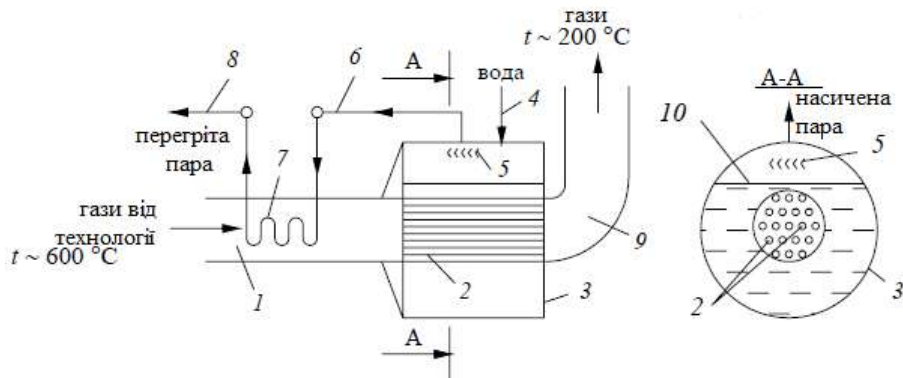
Котли-утилізатори, які застосовують в металургійній, хімічній та інших галузях промисловості, виробляють пару низького (менше 1,5 МПа) і середнього (близько 4 МПа) тиску для одержання електроенергії. Нагрівання води в межах 130-150 °C і повітря до 250

°C може здійснюватися відхідними газами у звичайних поверхневих теплообмінних апаратах.

Котли-утилізатори доцільно встановлювати після печей, якщо температура газів, що надходять, не нижче 400-600 °C. Найбільш досконалим є утилізаційні котли з багаторазовою примусовою циркуляцією.

Котли-утилізатори випускаються з пропускною здатністю по газах 5-125 тис. м³/год і проектною продуктивністю від 2 до 12,4 т/год пари. Їх доцільно встановлювати за окремою, порівняно великої потужності піччю, яка працює безперервно.

Характерною особливістю котлів-утилізаторів є відсутність топки для спалювання палива. На рисунку 4.4 приведена принципова схема котла-утилізатора з природною циркуляцією і димогарними трубками.



1 – високотемпературні технологічні гази; 2 – димогарні трубки; 3 – барабан котла; 4 – живильна лінія; 5 – пристрій сепарації пари; 6 – паропровід сухої насиченої пари; 7 – пароперегрівник; 8 – паропровід перегрітої пари; 9 – газохід; 10 – дзеркало випаровування

Рисунок 4.4 – Принципова схема технологічного котла-утилізатора.

Високотемпературні гази від технологічного процесу 1 проходять всередині димогарних трубок 2, де віддають теплоту воді, звідки охолоджені по газоходу 9 вилучаються з котла. Живильна вода 4 подається у водяну частину котла, де нагрівається газами до кипіння, а пара, що утворилася, проходить паросепараційні пристрої 5. Отримана суха насичена пара по паропроводу 6 рухається до

пароперегрівника 7, звідки перегріта пара по паропроводу 8 надходить до споживача.

Рівняння теплового балансу для котлів-утилізаторів має вид, кДж/год:

$$p = V_{\varepsilon} C_{p\varepsilon} (t_{\varepsilon 1} - t_{\varepsilon 2}) \cdot \varphi = D_n (h'' - h_{\text{жв}}), \quad (4.2)$$

де V_{ε} – об’ємна витрата продуктів згоряння через котел-утилізатор, м³/год; $C_{p\varepsilon}$ – середня об’ємна теплоємність продуктів згоряння, що надходять до котла-утилізатора, кДж/(м³·К); $t_{\varepsilon 1}, t_{\varepsilon 2}$ – температури продуктів згоряння до і після котла-утилізатора, °С; φ – коефіцієнт теплових втрат котла-утилізатора; D_n – витрата пари, кг/год; h'' , $h_{\text{жв}}$ – відповідно ентальпії одержаної пари і живильної води.

З останнього рівняння визначають витрату пари, що виробляється котлом-утилізатором за рахунок утилізації за рахунок утилізації продуктів згоряння, яка дорівнює

$$D_n = \frac{V_{\varepsilon} C_{p\varepsilon} (t_{\varepsilon 1} - t_{\varepsilon 2}) \varphi}{h'' - h_{\text{жв}}} \quad (4.3)$$

Економію умовного палива можна визначити з співвідношення, кг/год

$$B_{\text{уп}} = \frac{(D_n (h'' - h_{\text{жв}}) \eta_{\text{ка}})}{29330}, \quad (4.4)$$

де $\eta_{\text{ка}}$ – ККД котельного агрегату.

4.3.3. Схеми взаємного розташування повітропідігрівника і котла-утилізатора

Тепло димових газів може використовуватися для підігріву повітря, що подається на горіння в технологічну піч. При цьому, оскільки об’ємна витрата повітря, що подається на горіння, менше об’ємної витрати димових газів приблизно на 30% і ефективність

теплопередачі між газами низька, повітропідігрівник не може забезпечити ефективного використання теплоти димових газів. Тому за піччю крім повітропідігрівника встановлюють і котел-утилізатор.

Є різні схеми включення повітропідігрівника і котла-утилізатора: первинна, вторинна, комбінована. У первинній схемі (рис. 4.5) за технологічною піччю встановлено повітро-підігрівник (ПП), а потім котел-утилізатор (КУ). При цьому обидва пристрої мають низьку теплову ефективність: повітро-підігрівник – через низький коефіцієнт тепловіддачі повітря, а котел-утилізатор – через низькі температур охолодженого димового газу, що подається в нього. Як наслідок, первинна схема забезпечує менш ефективне використання теплоти димових газів. Однак дану схему застосовують, коли хочуть отримати високі температури у технологічній печі за рахунок більш ефективного нагрівання повітря, що подається на горіння.



Рисунок 4.5 - Первинна схема включення повітропідігрівника і котла-утилізатора

Вторинна схема (рис. 4.6) здійснює більш ефективне використання теплоти димових газів (більш глибоке їх охолодження). Дану схему застосовують, коли не потрібно нагрів повітря до високих температур.

Комбінована схема, згідно з якою встановлено два повітропідігрівника (один - за технологічною піччю, другий - за котлом утилізатором), більш складна, вона є компромісною між первинною і вторинною. Вона дозволяє забезпечити і високу температуру що подається на горіння повітря, і глибоке охолодження димових газів, але при цьому вона більш витратна.

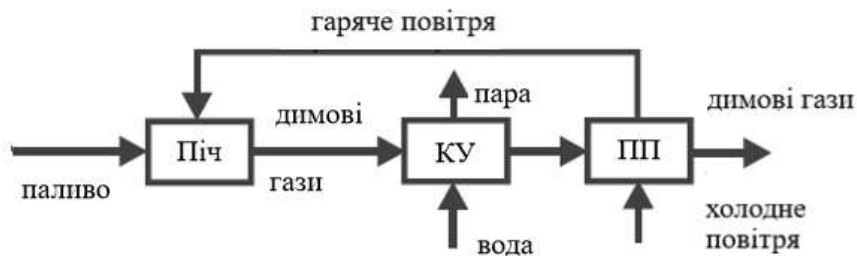


Рисунок 4.6 – Вторинна схема включення повітропідігрівника і котла-утилізатора

4.3.4. Ефективність економайзерів

застосування

контактних

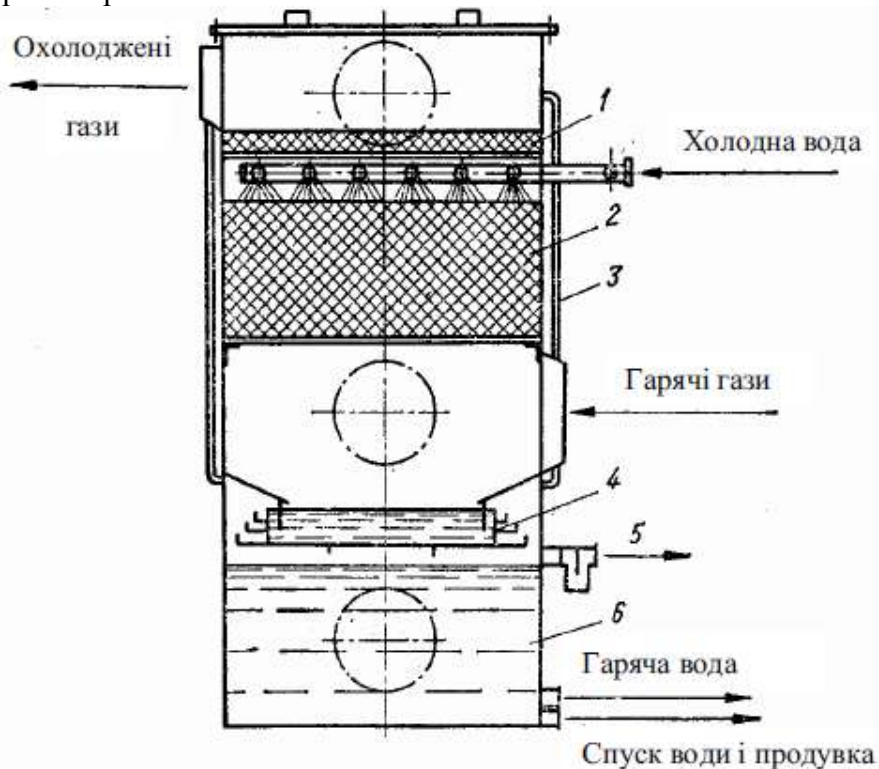
Для зниження втрат теплоти у тепловому балансі котлів-утилізаторів застосовують глибоке охолодження продуктів згоряння палива до температури 50-70°C за рахунок встановлення за котлом контактних економайзерів.

Контактні економайзери призначені для нагрівання води відхідними газами промислових печей і котлів, що працюють на природному газі, шляхом безпосереднього зіткнення теплоносіїв у шарі керамічної насадки. В контактних теплообмінниках конденсація водяної пари починається і при температурі газів, вищій від температури точки роси. З початком конденсації водяної пари з димових газів істотно збільшується «ціна» кожного градуса їх охолодження.

Загальний вид контактного економайзера наведено на рисунку 4.7.

Контактні економайзери при наявності в котлах хвостових поверхонь нагріву встановлюють за ними. Якщо у водяних економайзерах воду підігрівають до температури, близької до початкової температури відхідних газів на вході в економайзер, то в контактних економайзерах, які працюють при тиску нижче 0,1 МПа, підігрів води можливий тільки до температури мокрого термометра. Так, у контактному економайзері, який встановлено після хвостової поверхні парогенератора, тобто там, де температура відхідних газів

120...180 °С, можна отримувати гарячу воду з температурою 55...60 °С. При цьому температура відхідних газів буде знижена до 30...40 °С. Але з метою зменшення випаровування води її слід недогрівати в контактному економайзері на 2...3 °С до температури мокрого термометра.



1 – крапельловлювач; 2 – насадка з керамічних кілець; 3 – газовідвідна труба; 4 – каскадний дегазатор із гідралічним затвором; 5 – переливна трубка з гідралічним затвором; 6 – корпус економайзера

Рисунок 4.7 – Загальний вид контактної економайзера:

Найбільш широко застосовуються протитокові контактні економайзери насадкового типу, в яких забезпечується розвинута поверхня контакту між відхідними газами і стікаючою в насадці водою, що гарантує високу інтенсивність теплообміну при невеликому опорі газового тракту.

Крім істотної економії палива, такі економайзери дають економію металу, оскільки в них відсутня металева поверхня нагрівання.

Контактні економайзери вигідно відрізняються від поверхневих водонагрівачів високою інтенсивністю теплообміну, великою поверхнею теплообміну до одиниці об'єму, можливістю глибокого охолодження продуктів згоряння природного газу і конденсації 70-80% водяної пари, що містяться у димових газах.

В контактних економайзерах доцільно, щоб початкова температура води не перевищувала 20...30 °С, коли кінцева температура води не вища від температури точки роси, тобто 50...55 °С.

При помірній температурі відхідних газів орієнтовно 40 °С (саме така температура характерна для більшості конденсаційних теплообмінників будь-якого типу) втрати теплоти з відхідними газами складають 2...5 %. Тобто, коли основний паливовикористовуючий агрегат має температуру відхідних газів 150 °С.

Контрольні питання

1. Перелічіть основні заходи з енергозбереження у високотемпературних теплотехнологічних установках
2. Назвіть основні рішення спрямовані на економію енергоресурсів при проектуванні промислових печей.
3. У чому полягає застосування системи рециркуляції у високотемпературних установках.
4. Призначення та основні типи рекуператорів.
5. Переваги та недоліки металевих рекуператорів.
6. Особливості керамічних рекуператорів.
7. Призначення і конструктивні особливості повтропідігрівників та котлів-утилізаторів.
8. Ефективність застосування котла-утилізатора разом з повітропідігрівником.
9. Що розуміється та як забезпечується «глибоке» охолодження димових газів?
10. Особливості конструкції контактних економайзерів.

5. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ТЕПЛОМАСООБМІННИХ УСТАНОВКАХ

У виробничих процесах промисловості всіх галузей та агропромислового комплексу перенос теплоти часто поєднується з масообміном, наприклад, відведення вологи від матеріалу при сушінні, концентрація розчину твердих речовин внаслідок випаровування розчинника тощо. Такі процеси відбуваються у тепломасообмінних установках.

До тепломасообмінних установок відносять сушильні, абсорбційні, кристалізаційні, ректифікаційні та інші. Основним обладнанням у таких установках є теплообмінні апарати (ТА), в яких один теплоносіє передає теплоту іншому теплоносію. Якщо при передачі теплоти відбувається зміна агрегатного стану, то температура теплоносія не змінюється. В інших випадках температура теплоносіїв змінюється. За принципом роботи ТА діляться на поверхневі (рекуперативні і регенеративні) і контактні. У рекуперативних апаратах теплообмін відбувається через роздільну стінку. В регенеративних ТА поверхня теплообміну по черзі омивається грійним і нагрівним теплоносієм. Під час контакту з грійним теплоносієм тепло акумулюється насадкою, а потім передається теплоносію, який нагрівається.

У контактних ТА передача теплоти від грійного теплоносія до нагрівного відбувається при безпосередньому їх контакті. Контактні ТА ділять на змішувальні і барботажні. У змішувальних апаратах теплоносії перемішуються. У барботажних грійний теплоносіє прокачується через нагрівний, або навпаки, не змішуючись з ним.

За родом теплоносіїв розрізняють ТА: рідина-рідина; пар-рідина; газ-рідина; пара-пара; пара-газ; газ-газ. Залежно від зміни агрегатного стану теплоносіїв ТА ділять: без зміни агрегатного стану одного з теплоносіїв, зі зміною агрегатного стану обох теплоносіїв. В ТА можуть протікати різні процеси теплообміну: нагрівання, охолодження, кипіння, конденсація, виморожування тощо.

5.1. Класифікація та принцип дії сушильних установок

У промисловості застосовується велика кількість різних типів і конструкцій сушарок. У таблиці 5.1 дана класифікація сучасних сушарок.

Таблиця 5.1 – Класифікація сушарок

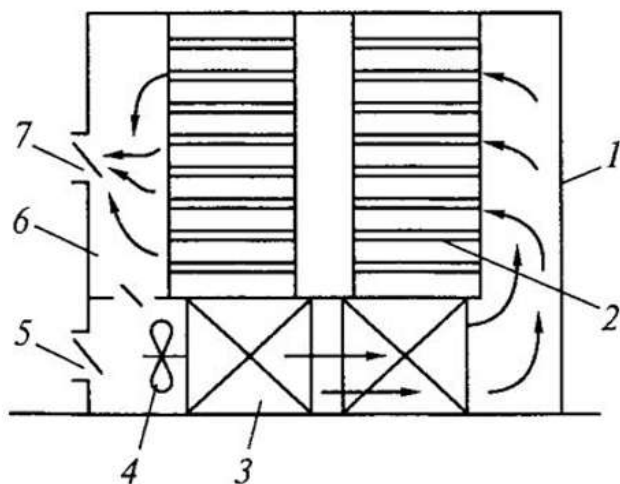
Ознака класифікації	Типи сушарок
Тиск у робочому просторі	Атмосферні і вакуумні
Режим роботи	Періодичної і неперервної дії
Сушильний агент (СА)	Повітряні, на продуктах згоряння, на суміші повітря з продуктами згоряння і на перегрітій парі
Напрямок руху СА щодо матеріалу	З прямою, протитоку, перехресним током і реверсивні
Характер циркуляції СА	З природною і примусовою циркуляцією
Спосіб нагрівання сушильного агенту	З паровими повітропідігрівниками, вогневими повітрянагрівачами-рекуператорами, шляхом змішування з продуктами згоряння, з електронагрівом
Кратність використання сушильного агенту	Однократні і з рециркуляцією
Схема нагрівання сушильного агенту	З централізованим підігрівом, індивідуальними агрегатами і проміжним підігрівом
Спосіб видалення вологи із сушарки	З повітрообміном, конденсаційні і з хімічним поглинанням вологи
Спосіб підведення теплоти до матеріалу	Конвективні, контактні (сушіння на гарячих поверхнях), із променистим нагріванням (терморадіаційні), з нагріванням струмами високої частоти (СВЧ), комбіновані, акустичні
Структура матеріалу, що сушиться	Твердий суцільний матеріал, кусковий, стрічковий, пилоподібний, паста чи рідкий розчин
Конструкція сушарки	Коридорна, камерна, шахтна, стрічкова, конвеєрна, барабанна, трубчаста, вібраційна

У найбільш поширених у промисловості конвективних сушарках сушильним агентом є нагріте повітря або суміш його з димовими або топковими газами.

У сушарках з частковою рециркуляцією температуру процесу можна брати нижче ніж на продув, при цьому є можливість регулювати вологість у сушильній камері. У таких сушарках частина відпрацьованого повітря повертається в робочу камеру, де змішується зі свіжим повітрям. Утворена суміш надходить до калорифера, де підігрівається до необхідної температури і входить до сушарки. Частина відпрацьованого повітря викидається в атмосферу.

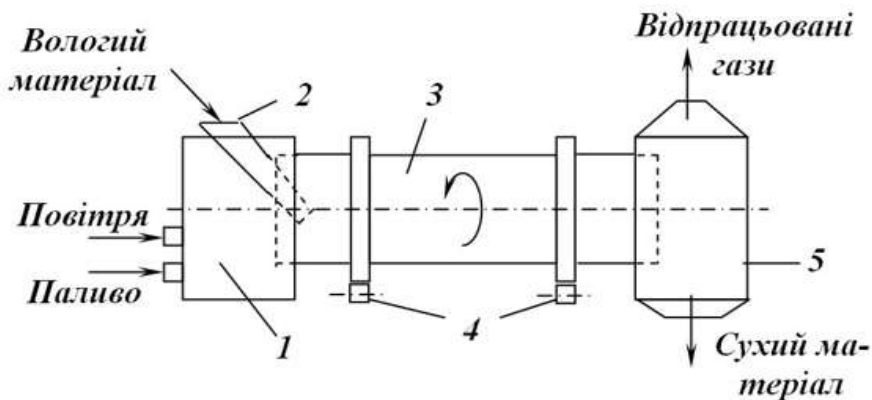
У сушарці із замкненою рециркуляцією витрати теплоти більші, ніж у сушарці попереднього варіанту, а процес сушіння проходить без повітрообміну.

Серед відомих способів сушіння найчастіше використовують конвективний та терморадіаційний. З підвищенням температури сушильного агенту конвективний спосіб сушіння може змінитися на конвективно-терморадіаційний. Схеми таких сушарок показані на рисунках 5.1 і 5.4.



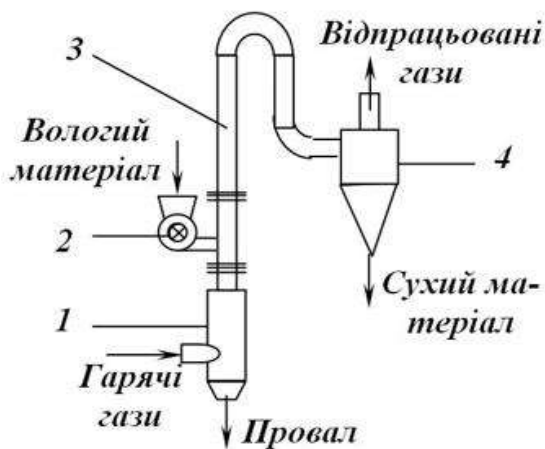
1 – камера; 2 – полиця з матеріалом; 3 – калорифер; 4 – вентилятор; 5, 6, 7 – вікна

Рисунок 5.1 – Схема камерної сушарки.



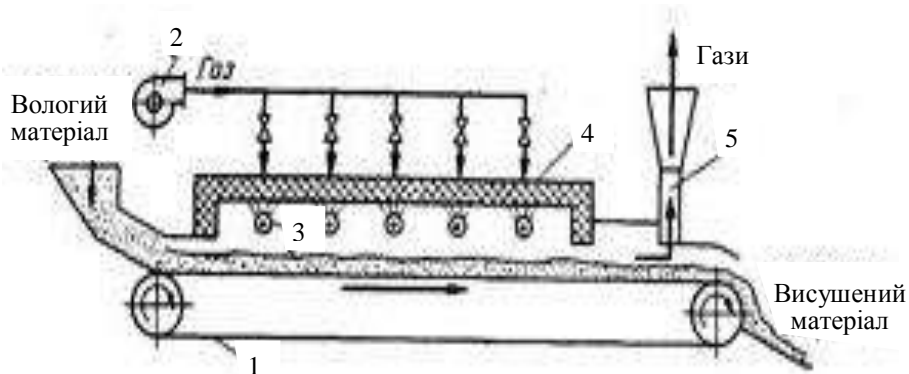
1 - топка; 2 – завантажувальний лоток; 3 - барабан;
4 - котки; 5 – розвантажувальна камера

Рисунок 5.2 – Схема барабанної сушарки.



1 – пристрій подачі гарячих газів; 2 - живильник; 3 –
вертикальна ділянка труби-сушарки; 4 – розвантажувальний
апарат

Рисунок 5.3 – Схема труби-сушарки.



1 - конвеєр; 2 - газодувка; 3 – газові пальники; 4 - випромінювач; 5 – вихлопна труба

Рисунок 5.4 – Радіаційна сушарка.

5.2. Енергозбереження у сушильних установках

Теплова сушка, будучи складовою частиною багатьох технологій, відноситься до числа найбільш енергоємних технологій. Витрати ПЕР на сушку складають близько 12% всіх витрат енергії в промисловості і сільському господарстві. Широка поширеність процесів сушки і низькі (в середньому 30- 35%) коефіцієнти корисного використання енергії в них обумовлюють актуальність енергозбереження в сушильних установках, що опосередковано позначиться на зниженні енергоємності ВВП. Оскільки конвективні сушильні установки переважають в загальному парку зневоднюючих пристроїв, доцільно проблему енергозбереження розглядати стосовно конвективного сушіння, наприклад дисперсних матеріалів.

Технологічні процеси, що включають конвективну теплову сушку, складаються з трьох стадій:

- підготовча, на якій використовують апарати підготовки сушильного агента і матеріалу;
- основна, яка реалізується за допомогою сушильних (однієї або декількох) камер;
- заключна, в яку можуть входити утилізація вторинних енергетичних ресурсів, уловлювання пилу тощо.

В залежності від виду матеріалу, що висушується на кожній стадії існують свої специфічні способи підвищення теплової економічності. Розрізняють наступні способи зниження питомих витрат на зневоднення матеріалу на підготовчій стадії, як попереднє нагрівання, піноутворення, подрібнення, вплив поверхневоактивної речовини (ПАР), віброобробка, зниження енергії зв'язку вологи з кісткою матеріалу, вдосконалення теплових генераторів та ін.

На заключній стадії зниження теплових витрат досягається, в основному, за рахунок утилізації теплоти відхідних газів і висушеного матеріалу. Ця теплота за допомогою рекуперативних, регенеративних або контактних теплообмінників використовується для нагріву повітря, що подається в топку, теплофікаційної або технологічної води, попереднього підігріву матеріалу. Досить ефективна утилізація теплоти сушильного агенту в контактних теплообмінниках.

Для класифікації методів підвищення теплової економічності власне сушарок на базі аналізу фізичної суті відбуваються в них процесів відзначимо спочатку, що процес сушіння визначається статикою і кінетикою. Під статикою сушки розуміють матеріальний і тепловий баланси сушарки, які дозволяють визначити витрати сушильного агенту і теплоти, а також оцінити теплову економічність сушарки.

Зміна у часі середньоінтегрального вологовмісту матеріалу і його температури називають кінетикою сушіння. Знання останньої дозволяє визначити тривалість сушки і габарити установки. Габарити установки багато в чому визначають теплові втрати в навколишнє середовище, а, отже, теплову економічність сушарки. Таким чином, при аналізі можливостей підвищення теплової економічності слід враховувати фактори, що впливають на кінетику сушіння.

Процес сушіння в загальному випадку складається з періоду підігріву, першого і другого періодів сушіння, інтенсивність видалення вологи в яких залежить від різних факторів. У першому періоді інтенсивність сушки визначається швидкістю підведення теплоти до матеріалу і відведення маси з його поверхні в навколишнє середовище (зовнішня завдання сушіння). У другому періоді – швидкістю передачі теплоти вглиб матеріалу і підведення

маси з внутрішніх шарів матеріалу в зону випаровування (внутрішня задача сушіння). Одна з можливих класифікацій прийомів енергозбереження приведена на рисунку 5.1.

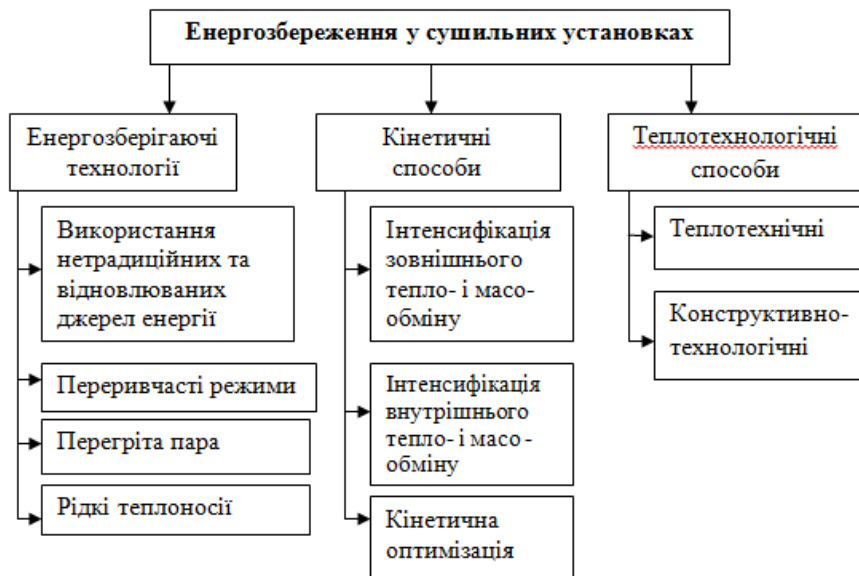


Рисунок 5.5 – Класифікація енергозберігаючих заходів у сушильних установках

Як видно з рисунку 5.5 всі енергозберігаючі заходи можна розбити на три групи: теплотехнологічні, кінетичні і енергозберігаючі технології. До першої групи, що стосується сушильної установки в цілому, можна віднести:

- *теплотехнічні* (вибір теплової схеми, режимних параметрів сушіння – температури, швидкості і вмісту вологи сушильного агенту, режимів роботи установки, коефіцієнтів рециркуляції, управління кінцевим вологовмістом сушильного агенту тощо);

- *конструктивно-технологічні* (оптимізація числа зон проміжного підігріву сушильного агенту, вибір напрямку взаємного руху сушильного агенту і матеріалу, вдосконалення систем підведення теплоти, поліпшення аеродинамічної обстановки в сушильній камері та ін.).

Перша група методів, що відносяться до традиційних методів енергозбереження, заснована на виборі раціональної

теплотехнологічної схеми установки, параметрів режиму сушіння, виявленні ВЕР і їх використанні в тому ж або іншому технологічному процесі. Так, зниженню витрати палива на сушильних установках у першу чергу сприяє впровадження економічних топкових пристроїв з використанням вторинних енергоресурсів. Основним теплоносієм (сушильним агентом) для сушіння є продукти згоряння рідкого або газоподібного палива. Сушильний агент в основному характеризується однорідністю (певна постійна температура сушильного агента, відсутність температурних перекосів), малою токсичністю, відсутністю механічних домішок, широким діапазоном зміни температур.

З аналізу теплових балансів конвективних сушильних установок витікає, що найбільші втрати теплоти обумовлюються відхідним сушильним агентом і втратами теплоти в навколишнє середовище. Тому зниження втрат теплоти з відхідним сушильним агентом (або раціональне використання цього виду ВЕР) є доцільними принциповими шляхами підвищення теплової економічності конвективних сушильних установок.

Такий підхід дозволяє впливати на постійні витрати первинного палива. Однак, реалізація заходів вимагає, як правило, створення утилізаційного або технологічного обладнання. У цьому випадку економія постійних витрат енергії, що може бути досягнута, зменшується за рахунок збільшення витрати інших ресурсів.

Друга група методів включає:

- методи інтенсифікації зовнішнього тепломасообміну (підвищення температурного напору, підвищення рушійної сили масообміну, коефіцієнта тепловіддачі до матеріалу, поверхні тепломасообміну та ін.);

- методи інтенсифікації внутрішнього тепломасообміну (підвищення температури матеріалу в першому періоді сушіння, використання зовнішніх полів – електричних, магнітних, звукових, використання ПАР та ін.);

- методи кінетичної оптимізації (управління профілем швидкості, температури і вологовмісту сушильного агента на вході в установку, зміною форми сушильної камери, активізація процесу взаємодії сушильного агента і матеріалу, реверсія та ін.).

Третя група методів передбачає:

- використання нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії, що приводить до заміщення органічного палива (сонячні сушильні установки, використання вітрової енергії для сушіння матеріалів рослинного походження та ін.);

- використання переривчастих режимів підведення тепла за рахунок радіаційного випромінювання, реверсія потоків сушильного агенту та ін.);

- використання в якості сушильного агенту парів розчинника, водяної пари атмосферного тиску тощо.

Приклад використання нетрадиційних джерел енергії із застосуванням ТНУ у сушильній установці наведена на рисунку 5.6.

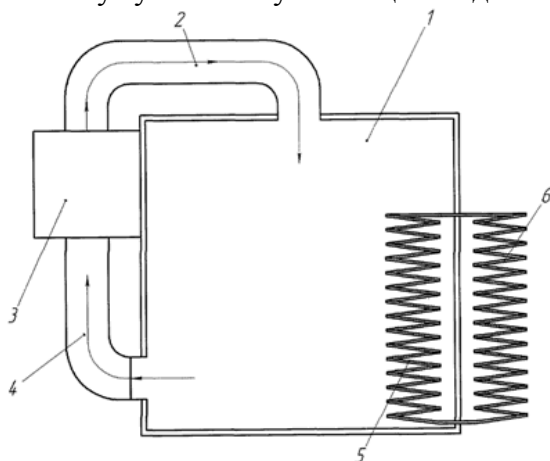


Рисунок 5.6 – Схема застосування ТНУ у сушильній установці

Приміщення 1 для сушіння оснащено системою витяжки 2, що з'єднана з ТНУ 3. Остання підключена до системи подачі і розподілу сухого повітря 4, що веде у приміщення 1. У приміщенні 1 встановлено теплообмінник 5 типу «рідина-повітря», що об'єднаний у замкнений гідравлічний контур з аналогічним теплообмінником 6, який розташований ззовні приміщення.

З приміщення 1 вологе повітря чере систему витяжки потрапляє у ТНУ, де воно підлягає конденсаційному сушінню, після чого потрапляє назад до приміщення через систему подачі і розподілу сухого повітря.

В літній час здійснюється скидання надлишкової теплової енергії, що виробляється ТНУ, за рахунок додаткової конденсації на внутрішньому теплообміннику вологи з повітря, а взимку до теплообмінника може бути підключено теплогенератор.

Наведений перелік методів підвищення теплової економічності сушарок дає уявлення про велику кількість можливих напрямків пошуку раціональних і оптимальних з точки зору енерговитрат варіантів організації процесу сушіння.

5.3. Способи енергозбереження у випарних установках

Випарюванням називається процес концентрування рідких розчинів практично нелетких речовин шляхом часткового видалення розчинника під час кипіння рідини. У процесі випарювання розчинник видаляється з усього об'єму розчину, водночас за температур нижчих за температуру кипіння випаровування рідини відбувається лише з поверхні розчину.

Випарювання застосовують для підвищення концентрації розведених розчинів або вилучення з них розчиненої речовини шляхом кристалізації.

Випарні апарати отримали широке застосування для концентрування розчинів солей і нелетких рідин в хімічній, харчовій промисловості, промисловості мінеральних добрив. Видалення вологи з розчинів в апаратах великої продуктивності вимагає дуже значних енергетичних витрат, пов'язаних з підігрівом і випаровуванням великих мас рідини.

При аналізі діючих схем випарних установок важливо брати до уваги, що рішення про використання схем з одноступінчастими випарними установками приймалися в період, коли частка енергоресурсів у собівартості продукції не перевищувала 5%, і з техніко-економічної точки зору могли бути виправданими. В даний час, внаслідок випереджаючого зростання тарифів на енергоресурси в цих же виробництвах частка енергоресурсів у вартості продукції досягає 30%, 40% і більше.

На випаровування 1 кг води в однокорпусній установці необхідно приблизно 1 кг грійної пари. Витрату пари на випарювання можна значно зменшити, використовуючи її

багатократно для нагрівання першого корпусу, а потім (вторинною парою) від другого корпусу багатокорпусної випарної установки до останнього. Тому перспективним є перехід до схем з декількома ступенями випарювання.

На сьогодні застосовуються наступні схеми багатокорпусних випарних установок: прямотокові, протитокові і з паралельним живленням (рис. 5.7).

У схемі прямотокової випарної установки (рис. 5.7 а) грійна пара, вторинна пара і розчин рухаються в одному напрямку. Розчин переходить з одного корпусу в інший завдяки різниці тисків в корпусах.

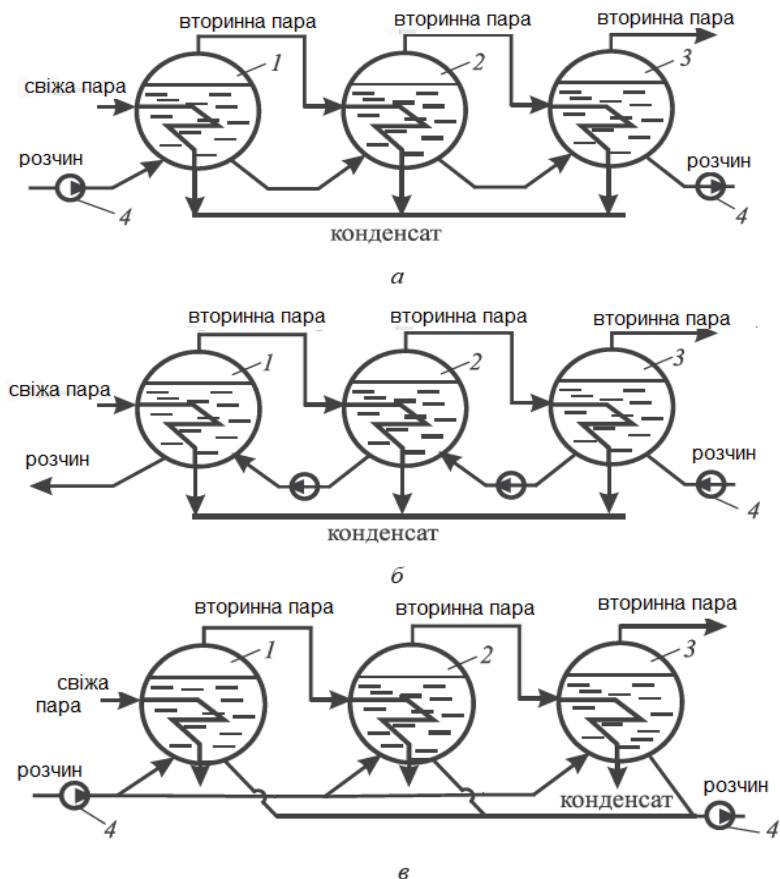
Прямотокові випарні установки у порівнянні з протитокowymi мають меншу витрату пари і електроенергії на привід насосів, а також незначні втрати теплоти з концентрованим розчином, що відходить з установки з найменшою температурою.

У схемі протитоккової випарної установки (рис. 5.7 б) слабкий розчин подається в останній корпус, потім в наступні за допомогою насосів, встановлених між апаратами, і проходить послідовно через всі корпуси до першого. Протитокові установки застосовуються для випарювання в'язких розчинів, які в останніх корпусах (тобто при нижчих температурах і високих концентраціях розчину) стають настільки в'язкими, що незадовільно просуваються по трубопроводах. При цьому у протитоківій установці досягаються більш високі коефіцієнти теплопередачі, що призводить до зменшення поверхні нагрівання.

Випарні установки з паралельним живленням (рис. 5.7 в) застосовуються при випарюванні кристалізованих (насичених) розчинів, в яких видалення невеликих кількостей води з розчину викликає випадіння кристалів. Якщо такі розчини випаровувати у прямотоковій або протитоківій за розчином установці, то кристали, які інтенсивно утворюються при випаровуванні, неминуче будуть забивати трубопроводи і арматуру.

Правильний вибір типової схеми випарної установки дозволяє істотно знизити споживання тепла на процес випаровування. Так, застосовуючи регенеративне (внутрішнє) використання теплоти в схемах випарювання, можна забезпечити зниження витрати пари на

установку від ТЕЦ або котельні. Зокрема, в чотирьокорпусний установці можна досягати 18-54% економії пари.



а - прямиотокова; б - протитокова; в - з паралельним живленням;
1, 2, 3 - випарні корпуси; 4 - насоси перекачування розчину

Рисунок 5.7 - Трикорпусні випарні установки:

Приблизна питома витрата первинної пари в багатокорпусній установці становить, кг / кг:

$$G_{mn} = \frac{1}{0,85n} , \quad (5.1)$$

де n - кількість корпусів.

Для економії грійної пари в схемі випарної установки можна використовувати паровий ежектор або механічний компресор. Застосування механічного компресора більш вигідно, ніж використання парового ежектора через низький ККД останнього. Крім того, в схемі з застосуванням парового ежектора неможлива повна утилізація теплоти, оскільки додаткова кількість пари, що отримана від парового котла, повинна бути сконденсована.

Таким чином, економія енергії у випарних установках може досягатися такими основними способами:

- використанням теплоти вторинної пари в багатоступеневих випарних установках;
- застосуванням стиснення пари за допомогою струминного ежектора або механічного компресора;
- підігрівом розчину, що направляється на випаровування вторинною парою або конденсатом.

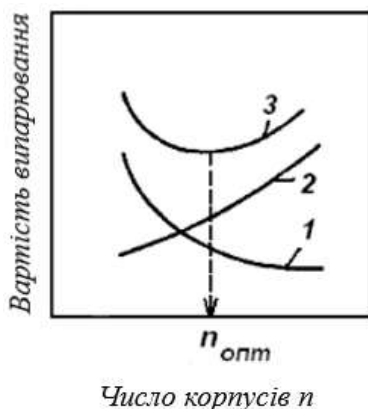
Крім того, можливе використання теплоти вторинних енергетичних ресурсів, одержуваних при випаровуванні (вторинний пар, конденсат) в теплопостачанні або інших технологічних установках (зовнішнє використання теплоти).

Основною причиною, що визначає межу числа корпусів випарної установки, є зростання температурних втрат зі збільшенням кількості корпусів. Для здійснення теплопередачі необхідно забезпечити у кожному корпусі деяку корисну різницю температур, тобто різницю температур між грійною парою та киплячим розчином. Для апаратів з природною циркуляцією вона складає зазвичай не менше 5–7 °С, а для апаратів з примусовою циркуляцією – не менше 3 °С.

Існує економічно доцільне число корпусів випарної установки, зазвичай 3-4, іноді 5-6. Чим більша кількість корпусів установки, тим менша корисна різниця температур припадає на кожний корпус і, отже, тим менша, за однієї і тієї ж продуктивності, загальна поверхня нагрівання випарної установки. Загальна поверхня нагрівання випарної установки збільшується пропорційно до числа її корпусів. Практично внаслідок температурних втрат, які збільшуються зі зростанням числа корпусів, зростання загальної поверхні нагрівання установки ще більше. Отже у багатокорпусних

установках економія грійної пари пов'язана зі збільшенням загальної поверхні нагрівання установки.

Чим вища концентрація випарюваного розчину, тим більші температурні втрати і тим менше число корпусів може бути послідовно з'єднано до одної установки. Водночас чим інтенсивніша циркуляція розчину, тим менша допустима корисна різниця температур у кожному корпусі і тим більше граничне число корпусів. Зі збільшенням числа корпусів досягається все більша економія грійної пари та знижується загальна вартість витраченої пари. Одночасно зі збільшенням числа корпусів зростають капітальні витрати й амортизаційні витрати (рис. 5.8).



1 – вартість пари; 2 – амортизаційні витрати; 3 – сумарна вартість випарювання

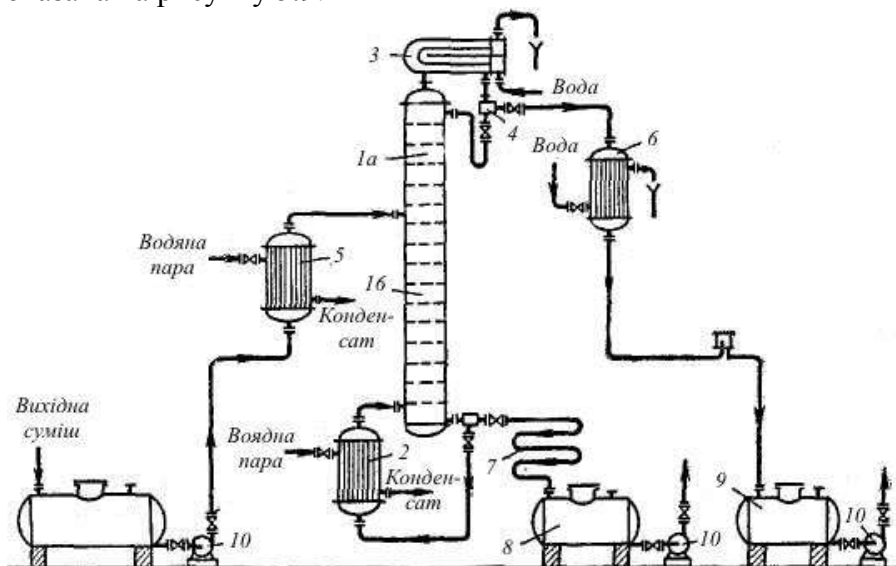
Рисунок 5.8 - До визначення оптимального числа корпусів багатокорпусної випарної установки

5.4. Енергозбереження у ректифікаційних установках

Основними процесами поділу на індивідуальні компоненти рідких, газових і парових сумішей є ректифікація, абсорбція і екстракція.

Ректифікація – це поділ рідкої суміші компонентів з різною леткістю в результаті протитокового руху рідкої і парової фаз, в процесі якого пара суміші, стикаючись з більш холодною рідкою сумішшю, яка має більший вміст леткого компонента,

конденсується. За рахунок теплоти конденсації, що виділяється, утворюється пара, збагачена леткими компонентами, яка у свою чергу контактує з рідиною. Таким чином, процес ректифікації засновано на різній летючості компонентів, що складають суміш, тобто на відмінності температури кипіння компонентів при однаковому тиску. Процес багатократно повторюється на контактних поверхнях, якими можуть бути тарілки (ковпачкові, сітчасті, клапанні тощо) або насадки (наприклад, виконані з кілець Рашига). Схема безперервно діючої ректифікаційної установки показана на рисунку 5.9.



1 - ректифікаційна колона з встановленими всередині контактними тарілками (а - змінювальна частина; б - вичерпна частина); 2 - кип'ятильник; 3 - дефлегматор; 4 - дільник флегми; 5 - підігрівник вихідної суміші; 6 - холодильник дистилляту (або холодильник-конденсатор); 7 - холодильник залишку (або нижнього продукту); 8, 9 - збірники; 10 - насоси.

Рисунок 5.9 – Схема безперервно діючої ректифікаційної установки.

Витрата теплоти при ректифікації рідких сумішей достатньо значна, причому більша її частина обумовлюється повторним випарюванням флегми, що повертається до колони. Теплота, яка виноситься з колони кубовим залишком і дистиллятом, відносно

невелика і у значній мірі може бути використана у межах самої установки на нагрівання початкової рідкої суміші.

Найбільшого ефекту в економії теплоти можна досягнути шляхом використання прихованої теплоти випаровування відхідної з колони пари низькокиплячого компонента. Використовуючи теплоту цих парів, можна скоротити витрату охолоджувальної води у дефлегматорі і конденсаторі-холодильнику.

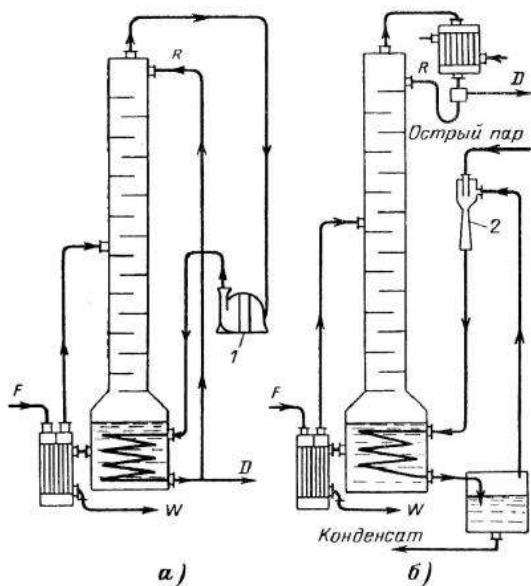
Однак тиск парів з колони невеликий (близько 1 ат), і тому їх неможна транспортувати на значні відстані. Внаслідок цього інколи доцільно застосовування теплового насоса для підвищення тиску і температури парів низькокиплячого компонента з метою використання їх як теплоносія у дистиляційному кубі ректифікаційної колони (рис. 5.10 а). При цьому усувається необхідність у дефлегматорі, а також суттєво зменшуються витрати нагрівальної пари та охолоджувальної води.

Після віддачі теплоти парюю і її конденсації частину рідини спрямовують у вигляді флегми у колону, а частину виводять з установки як готовий продукт. Однак ступінь стиску пари за такою схемою може бути вище економічно доцільного, оскільки при рівних тисках температура кипіння кубового залишку завжди вище температури кипіння низькокиплячого компонента. Тепловий насос не доцільний при ступені стиску вище двох, тому область його раціонального застосування обмежено процесами ректифікації сумішей з близькими температурами кипіння чистих компонентів.

У деяких випадках може бути доцільним використання ефекту самозакипання конденсату грійної пари з трубчатки дистиляційного куба і наступного стиску пари самозакипання за допомогою струминного насоса (рис. 5.11 б). Розрахунки показують, що застосування інжектора економічно вигідно до тих пір, поки потрібне підвищення температури конденсації стиснутої пари не перевищує 10-15 °С.

Може бути доцільним використання прихованої теплоти відхідних з колони парів низькокиплячого компонента для випаровування води у дефлегматорі, тобто суміщення дефлегмації з виробництвом водяної пари. Водяна пара, що утворюється у дефлегматорі, може бути застосована після стиснення її у

компресорі для обігріву дистиляційного куба. Застосування такої схеми повинно бути обґрунтовано економічними розрахунками.



1 - турбокомпресор; 2 - інжектор

а – використання теплоти пари низькокиплячого компонента;

б – використання пари вторинного закипання конденсату із грійної трубочатки дистиляційного куба.

Рисунок 5.6 – Схеми ректифікаційних установок з тепловими насосами.

У всіх випадках необхідно зводити до мінімуму втрати теплоти в навколишнє середовище через стінки колони всупереч існуючої думки, що втрати теплоти в навколишнє середовище, обумовлюючи збільшення кількості стікаючої у колоні флегми, поліпшує роботу колони.

Одним з найважливіших етапів виробництва харчового спирту є ректифікація етилового спирту-сирцю на періодично і безперервно діючих ректифікаційних установках, які характеризуються високим енергоспоживанням і низькою енергетичною ефективністю. Тому зниження енергетичних витрат в процесах отримання харчового ректифікованого спирту є актуальним завданням. Одним із способів,

що дозволяють скоротити витрату тепла на ректифікаційних установках, є використання теплового насоса.

У промислових ректифікаційних установках часто використовується таке традиційне масообмінне обладнання, як насадочні і тарілчасті масообмінні апарати, що мають низку недоліків. Існуючі тарілчасті колонні апарати мають зони сепарації, які суттєво збільшують об'єм апарату і, як наслідок, металоємність. Крім того, збільшення висоти апаратів призводить до зростання енергетичних витрат на підйом рідини. У насадках колон спостерігається нерівномірність розподілу рідкої і парової фаз в поперечному перерізі робочої зони, що суттєво знижує ефективність масообмінних процесів. Для підвищення ефективності роботи ректифікаційних установок доцільно застосовувати пристрої, в яких відбувається інтенсивний контакт між газом і рідиною, що активізує масообмінні процеси і дозволить істотно знизити енергетичні витрати на їх проведення.

По зниженню енерговитрат процес ректифікації значно перевершує всі інші процеси. Основними джерелами енергозбереження при ректифікації є: зниження флегмового числа за рахунок підвищення ККД колони, використання тепла парів верху колони, використання комплексів з пов'язаними тепловими потоками (мінімізація енерговитрат), суміщені (з абсорбцією, екстракцією і хімічною реакцією) процеси, рекуперація тепла і холоду, зниження гідравлічного опору колон, зміна послідовності поділу, очищення сировини і теплоносіїв від дисперсної фази.

5.5. Енергозбереження в абсорбційних, екстракційних та кристалізаційних установках

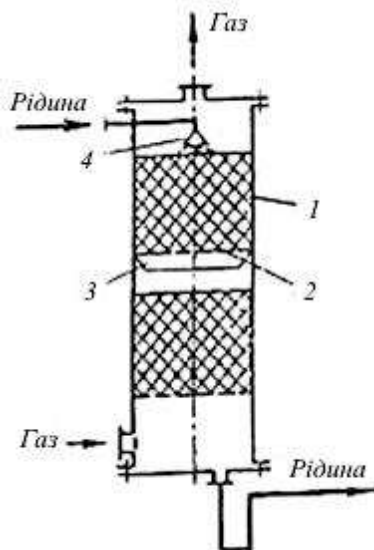
Домішки, що містяться у відхідних промислових газах у газо- або пароподібному стані ректифікаційних установок, вилучаються шляхом поглинання їх рідинами (абсорбція) або твердими поглиначами (адсорбція). Якщо не потрібно особливо тонкої очистки промислового газу від домішок, то, як правило, використовують абсорбцію.

Абсорбцією називається процес поглинання газу або пари рідким поглиначем (абсорбентом). Зворотний процес – виділення

поглинутого газу з поглинача – називається десорбцією. У промисловості абсорбція з подальшою десорбцією широко застосовується для виділення з газових сумішей цінних компонентів, для очищення технологічних і горючих газів від шкідливих домішок, для санітарної очистки газів тощо.

Застосовуються різні види абсорберів. Їх поділяють на поверхневі, насадкові та барботажні. У поверхневому абсорбері газ проходить над поверхнею нерухомої рідини.

Найбільш розповсюджені насадкові абсорбери (рис. 5.12), які широко використовуються для очистки газів (повітря) від діоксиду сірки, оксиду і діоксиду вуглецю, хлору тощо. Часто як насадку використовують кільця Рашига, спіралі, металеві сітки тощо.



1 - насадка; 2 - решітка; 3 – перерозподільник рідини; 4 – розподільник рідини

Рисунок 5.12 – Принципова схема насадкового абсорбера

Екстракція – процес переведення речовини з водної фази в органічну. Екстракція – складний фізико-хімічний процес. При зіткненні водного розчину речовини А з яким-небудь розчинником, який не змішується або обмежено змішується з водою розчинена речовина А буде розподілятися між двома розчинниками і через деякий час в такій системі встановиться рівновага

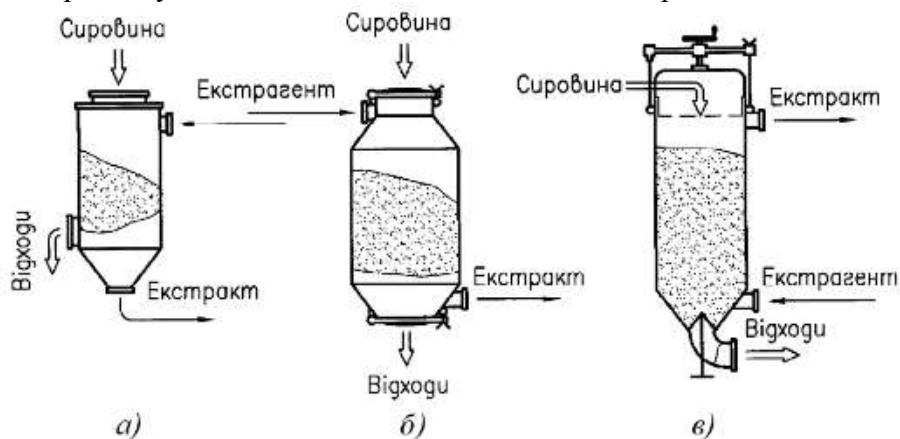
$$A_g = A_o \quad (5.2)$$

де A_v і A_o – речовина A у воді і в органічному розчиннику відповідно.

Процес переносу розчиненої речовини з одної рідкої фази в іншу, яка з нею не змішується або обмежено змішуються називаються рідина-рідинним розподілом або розподілом між двома рідинами.

Екстракція – це один з випадків рідина-рідинного розподілу, коли з водного розчину речовина вилучається органічний розчинник.

Реагент, який утворює сполуку, яка потім екстрагується, називається екстракційним реагентом, а органічний розчинник, який вилучається для екстракції або розчин екстракційного реагента в органічному розчиннику, називають екстрагентом. Екстрактори періодичної дії знайшли своє поширення у малотоннажних виробництвах. До них відносяться настійні чани, циліндричні екстрактори з механічним перемішуванням, з рециркуляцією екстрагента, віброекстрактори, вакуум-екстрактори тощо, в яких використовуються два метод – настоювання і перколяція.

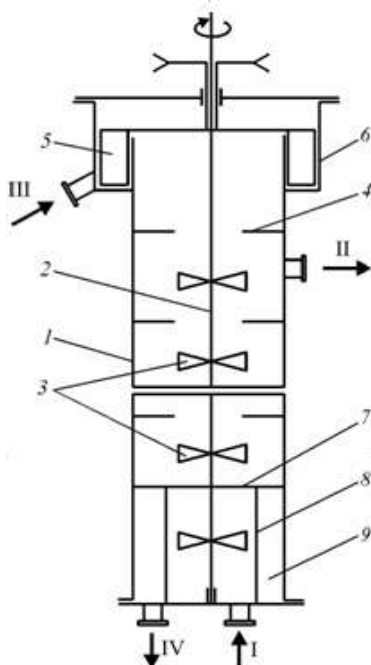


а – негерметизовані; б – герметизовані; в – герметизовані з висхідним потоком екстрагента

Рисунок 5.13 – Схеми екстракційних установок.

На рисунку 5.13 показані схеми простих екстракторів, які герметично закриваються кришками.

Кристалізаційні установки колонного типу застосовуються для створення безперервного процесу кристалізації. По осі таких колонних апаратів розташовано вал із закріпленими на ньому мішалками (рис. 5.14). По висоті такий апарат звичайно ділиться на секції різними перфорованими дисками. При охолодженні через теплообмінну поверхню розплав охолоджується з утворенням кристалевої фази.



1 - корпус; 2 - вал; 3 – лопатеві мішалки; 4 - кільцеві перегородки; 5 - скребкова мішалка; 6 - приймач суспензії; 7 - перфорована перегородка; 8 - секція емульгування; 9 - секція відстоювання; I - початкова суміш; II - суспензія; III, IV - холодоагент

Рисунок 5.14 – Контактний кристалізатор колонного типу

При контактній кристалізації такий апарат може представляти собою протитоківу колону, де розплав і холодоагент рухаються протитоком. Холодоагент має більш високу густину у порівнянні з маточною рідиною і подається у верхню частину апарату.

Початковий розплав подається у нижню частину апарату. У верхній частині апарату, де перемішуваний пристрій відсутній, відбувається розшарування холодоагенту і суспензії, що утворилась з розплаву.

Для тепломасообмінних установок раціональне споживання енергії є важливою їх характеристикою і оцінюється значенням питомої витрати умовного палива на одиницю виробленої продукції. Тому застосування КГУ для вироблення теплової і електричної енергії замість, наприклад, парового котла, є перспективною технологією, яка у значній мірі дозволить вирішувати задачі енергозбереження.

Контрольні питання

1. Способи зниження питомих витрат на сушіння матеріалу.
2. Класифікація прийомів енергозбереження при сушінні.
3. Шляхи підвищення теплової економічності конвективних сушильних установок.
4. У чому полягає рециркуляція повітря у сушильних установках?
5. Способи економії енергії у випарних установках.
6. Ефективність прямотових і протитоківих випарних установок.
7. Способи економії енергії у ректифікаційних установках.
8. Як можна досягнути ефекту в економії теплоти у кристалізаторах ?
9. Перелічіть основні джерела енергозбереження при ректифікації ?
10. Як забезпечити раціональне споживання енергії у масообмінних установках?
11. В яких випадках і за рахунок чого можна інтенсифікувати теплопередачу?
12. Яке існує загальне правило для інтенсифікації теплопередачі?
13. В яких випадках застосовують ребристі стінки?
14. Необхідність турбулізуючих елементів труб теплообмінників.
15. Класифікація теплообмінників на теплових трубах.

6. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

6.1. Призначення та класифікація холодильних машин і установок

Холодильні установки призначені для штучного зниження і підтримки пониженої температури нижче температури навколишнього середовища від 10°C і до -153°C у заданому об'єкті, що охолоджується. Машини та установки для створення більш низьких температур називаються кріогенними. Відведення і перенесення тепла здійснюється за рахунок споживаної при цьому енергії.

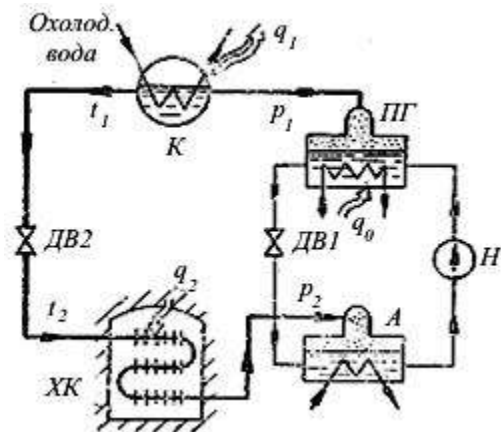
Холодильна установка може складатися з однієї або декількох холодильних машин, укомплектованих допоміжним обладнанням: системою енерго- і водопостачання, контрольно-вимірювальними приладами, приладами регулювання і управління, а також системою теплообміну з охолоджуваним об'єктом. Холодильна установка може бути встановлена у приміщенні, на відкритому повітрі, на транспорті і в різних пристроях, в яких необхідно підтримувати задану знижену температуру і видаляти зайву вологість повітря.

За принципом роботи холодильні машини можна згрупувати наступним чином: парокомпресійні; тепловикористовуючі холодильні машини (абсорбційні і пароежекторні); повітряно-розширювальні та термоелектричні.

Для охолодження застосовують різні фізичні явища: теплообмін з навколишнім середовищем, що має більш низьку температуру, зміну агрегатного стану речовини, розширення і дроселювання газів тощо. Наприклад, схема абсорбційної холодильної установки, що здійснює охолодження за допомогою підведеної енергії, показана на рисунку 6.1.

У холодильній установці (рис. 6.1), як різновид трансформатора теплоти, процес протікає наступним чином. Охолоджене тіло А віддає теплоту холодоагенту при температурі $T_n < T_o$; потім у холодильній машині за рахунок підведеної механічної енергії l відбувається підвищення температури холодоагенту до температури

T_0 . Нагрітий холодоагент передає в навколишнє середовище кількість теплоти $q_0 = q_n + l$.



ПГ – парогенератор, К – конденсатор: ДВ1, ДВ2 – дросельні вентилі, А – абсорбер, ХК – холодильна камера, Н – насос

Рисунок 6.1 – Схема абсорбційної холодильної установки

Ефективність зворотного холодильного циклу (рис. 6.1) характеризується холодильним коефіцієнтом, тобто відношенням кількості теплоти, відведеної від охолодженого робочого тіла до витраченої роботи циклу:

$$\varepsilon = \frac{q_n}{l} = \frac{q_n}{q_n - q_0}, \quad (6.1)$$

Холодильний коефіцієнт циклу Карно:

$$\varepsilon_k = \frac{T_n}{T_0 - T_n}. \quad (6.2)$$

Як холодильні агенти застосовують фреони, аміак, вуглеводні тощо. Холодоносієм називають проміжну речовину, що служить для відведення теплоти від охолоджуваних об'єктів і передачі його

холодильному агентові. При температурах вище $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ холодоносієм є вода, при температурах нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – розчини солі ($-21,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), хлористого кальцію ($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$), фреон ($-96,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) та інші речовини.

Система охолодження – це комплекс приладів, який забезпечує цикл перетворення енергії, в якому кількість теплоти що відводиться конденсатором дорівнює кількості енергії, яку поглинає випарник плюс електроенергія, спожита електроприводом компресора. Таким чином, вимірявши будь-які два з цих компонентів, можна розрахувати третій. Так визначається не тільки загальна кількість спожитої енергії, але й наскільки ефективно працює система.

Для визначення ефективності охолодження для енергоаудиту важливий холодильний коефіцієнт системи ε (COP). Холодильний коефіцієнт системи характеризує енергетичну ефективність роботи холодильної машини і дорівнює відношенню досягнутого охолодження Q_x до споживаної двигунами компресорів та допоміжного обладнання ефективної потужності N :

$$e = \frac{Q_x}{N}, \quad (6.3)$$

$$Q_x = 0,6 \cdot E_k \cdot W, \quad (6.4)$$

$$E_k = \frac{T_e}{T_c - T_e}, \quad (6.5)$$

де E_k - ККД Карно; T_e - температура випарювання, К; T_c – температура конденсації, К.

Чим більш вище значення COP, тим система більш ефективна.

6.2. Акумулявання теплової енергії в холодильній техніці

Використання акумуляторів холоду в охолоджувальних системах зазвичай вважається доцільним з техніко-економічної та експлуатаційної точки зору в разі значних змін (нерівномірності надходження теплоприпливу, наявності пікових значень, тощо)

теплого навантаження на холодильне обладнання. Тому галузями можливого застосування акумуляторів холоду є охолоджуючі системи молокозаводів і молокоприймальних пунктів, пивоварних заводів, підприємства з виробництвом безалкогольних і тонізуючих напоїв тощо. Нерівномірний характер теплових навантажень на холодильне обладнання має місце також у м'ясній та інших галузях промисловості, що працюють в одну зміну.

Існують наступні способи акумулювання теплової енергії: ємнісний, латентний, термохімічний. Ємнісний спосіб заснований на властивості речовин змінювати внутрішню енергію при зміні температури, яке характеризується питомою теплоємністю (рушійна сила процесу акумулювання - різниця між початковою і кінцевою температурами акумулюючої речовини). Латентний спосіб заснований на виділенні (поглинанні) прихованої теплоти фазових переходів речовини при кристалізації, випаровуванні, сублімації (рушійна сила – різниця вільних ентальпій) охолоджуючої речовини. Очевидно, що для тривалого функціонування такої системи завжди необхідний відповідний запас охолоджуючої речовини, що акумулює необхідну кількість теплової енергії. В той же час наявність такого запасу акумулюючої (охолоджувальної) речовини доцільно в установках штучного охолодження, що працюють в умовах різко вираженої нерівномірності теплового навантаження, що дозволяє значно підвищити їх ефективність за рахунок її використання в періоди пікових періодів використання холоду.

Ефективність застосування акумуляторів штучного холоду пов'язана з наступними факторами:

1) можливість зменшення встановленої потужності холодильного обладнання, що призводить до скорочення кількості компресорно-конденсаторних агрегатів, зменшення капітальних витрат і підвищення надійності роботи холодильної системи внаслідок зменшення одиниць обладнання;

2) безперервна експлуатація холодильного обладнання в режимі, близькому до оптимального, що призводить до підвищення ККД холодильного устаткування, підвищення коефіцієнта робочого часу, зменшення поломок і можливості переведення обладнання на автоматичний режим роботи і періодичне обслуговування.

6.2.1. Види акумулюючих речовин

Найбільшого поширення в холодильних установках з проміжним холодоносієм отримали ємнісні акумулятори з рідкими робочими речовинами, які одночасно використовуються і як охолоджуюче середовища. Найбільш доступною, дешевою і нешкідливою робочою речовиною для таких акумуляторів в області температур 0-95 °C є вода. В діапазоні температур від 0 до -55 °C зазвичай застосовують водні розчини солей і водні розчини органічних речовин: метанолу, етанолу, етиленгліколю, гліцерину, а також інші рідини з низькими температурами затвердіння. До останніх можна віднести холодильні агенти, що мають нормальну температуру кипіння вище температури навколишнього середовища, наприклад, хладон R11 і хладон R30. Найбільш перспективні речовини з високою теплоємністю, низькою в'язкістю, невисокою вартістю і відсутністю негативного впливу на навколишнє середовище.

Поряд з використанням води як робочої речовини для акумуляторів, широке розповсюдження отримав і водний лід.

Для акумулювання холоду при температурах нижче 0 °C зазвичай використовують водосоляні розчини, в яких концентрація солі відповідає евтектичній (кріогідратній) точці. Евтектичний лід являє собою однорідний твердий розчин, що складається з кристалів льоду і солі з прихованою теплотою плавлення 210 ... 320 кДж / кг.

В діапазоні температур від 0 до +10 °C для акумулювання холоду запропоновано використовувати парафін, що має приховану теплоту плавлення в межах 100 ... 170 кДж / кг. В інтервалі температур +5 ... +30 °C можна використовувати цілу низку органічних речовин: жирні кислоти, спирти, ефіри з прихованою теплотою фазового переходу 100 ... 190 кДж/кг. Неорганічні речовини, що відносяться до класу кристалогідратів солей, переважають органічні для цього інтервалу температур, зважаючи на більш високе значення прихованої теплоти плавлення (180 ... 250 кДж/кг). Великий інтерес для акумулювання холоду при температурах від -35 до +35 °C викликає клас клатратних з'єднань.

До них відносяться полуклатрати алкіламінів і солей амонію, гідрати циклічних ефірів, органічних рідин і газів.

Незважаючи на великий вибір пропонованих для холодильної техніки акумулюючих матеріалів, їх застосування обмежується низкою індивідуальних особливостей, які не завжди відповідають вимогам, що пред'являються до робочих речовин акумуляторів теплової енергії. Так, наприклад, вода і водні розчини солей відрізняються низькою акумулюючою здатністю, що викликає необхідність застосування акумуляторів, що мають великі габаритні розміри.

Область застосування водного льоду обмежується охолоджуючими системами з близько нульовою температурою холодоносія. При цьому лід має властивість наморозувати поверхні випарника при зарядці акумулятора, а при розрядці має низьку швидкість плавлення.

Серйозними недоліками парафінів є низька теплопровідність, займистість і мала питома щільність для накопичення енергії. Для більшості кристалогідратів солей і евтектичних розчинів характерні висока корозійна активність по відношенню до конструкційних матеріалів, пароохолодження, розподіл фаз, наморозування на теплообмінній поверхні, низькі коефіцієнти тепловіддачі, зміна щільності і об'єму в процесі роботи. Крім того, недоліком є виділення побічних продуктів реакцій і поступове зниження кількості накопиченої енергії (акумулюючої здатності). Деякі речовини, що відносяться до органічних речовин, кристалогідратів солей і полуклатратам, мають високу вартість або токсичні. Практично всі перераховані речовини мають низькі швидкості утворення та плавлення. Щільність для вищерозглянутих речовин зазвичай не перевищує 300 кДж/м³ (максимальне значення щільності, що приблизно дорівнює 330 кДж/м³, має водний лід).

Аналіз літературних джерел показує, що на даний час найбільшого поширення як холодоакумулюючі речовини, отримали вода і розсоли, а також евтектичний і водний лід. Найбільш перспективними з пропонованих нових акумулюючих матеріалів, є речовини, що відносяться до класу клатратних з'єднань, зокрема гідрати газів і органічних рідин. Так, наприклад, гідрати можуть

використовуватися в системах охолодження з штучним або природним джерелом холоду в інтервалі температур від -5 до $+15$ °С. Вони мають відносно високі значеннями прихованої теплоти фазового переходу (230 ... 450 кДж/кг), швидкості їх утворення та плавлення значно перевищують аналогічні показники для льоду, утворення та зберігання кристалів гідратів може відбуватися в об'ємі акумулятора, а не на теплообмінній поверхні. Кристали гідратів в суміші з водою утворюють водогідратну суспензію, що піддається перемішуванню і перекачуванню в прилади охолодження.

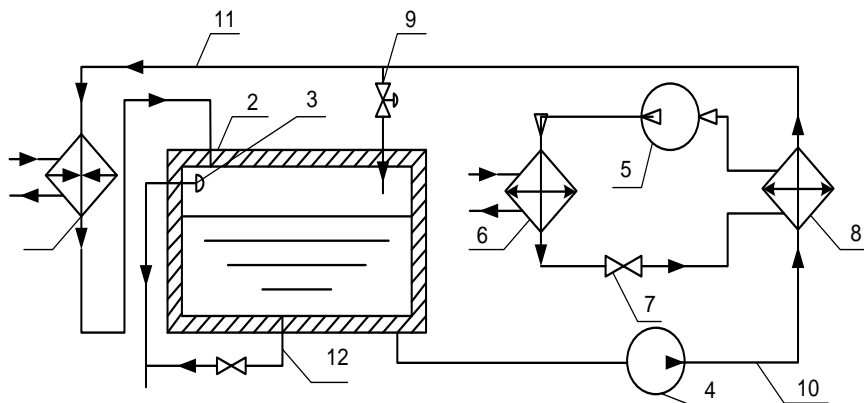
6.2.2. Схемні рішення систем охолодження з акумуляторами холоду

Рідинні акумулятори мають найбільш просту конструкцію – заповнена холодоносієм ємність, підключена до джерела холоду. Акумулятор складається з резервуара для зберігання накопиченої енергії, акумулюючого середовища (робочої речовини), пристроїв та допоміжного обладнання для зарядки і розрядки. На рис. 6.2 представлена принципова схема охолоджуючої системи з рідинним акумулятором, в якій циркуляція холодоносія через випарник холодильної машини і його подача до споживача холоду здійснюється одним і тим же насосом (або групою насосів).

Охолоджувальна система працює наступним чином. При зменшенні теплового навантаження витрата холодоносія через охолоджувач 1 зменшиться, зросте тиск в магістралі 11 і за допомогою регулятора тиску 9, що підтримує необхідний тиск за регулятором, надлишок охолодженого у випарнику 8 холодоносія скидається в бак акумулятора 2. При збільшенні теплового навантаження на охолоджувач 1 витрата холодоносія через нього збільшується. При цьому використовується холод, запасений в баку акумулятора 2.

Акумулятор входить в систему, за допомогою якої енергія для зарядки даного акумулятора відбирається від джерела, зберігається і передається споживачеві. Таким чином, холодильна установка з акумулятором холоду являє собою систему акумулювання теплової

енергії при робочих температурах нижче температури навколишнього середовища.



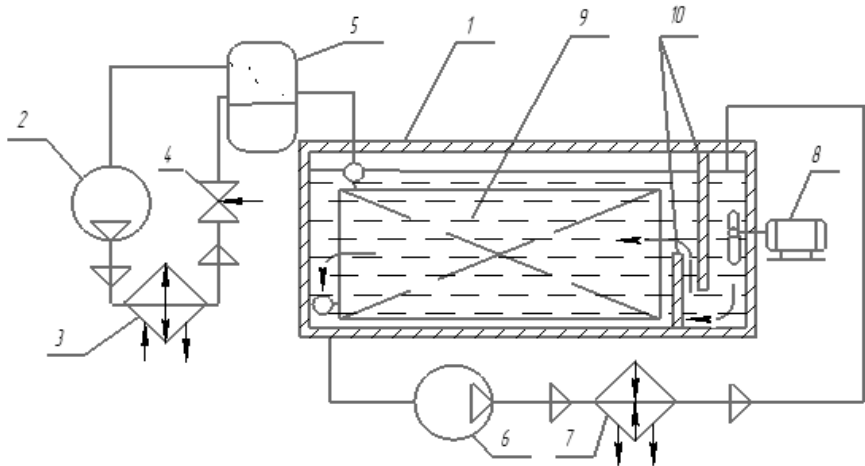
1 - охолоджувач; 2 - бак акумулятора; 3 - переливний клапан; 4 - насос; 5 - компресор; 6 - конденсатор; 7 - терморегулюючий вентиль; 8 - випарник; 9 - регулятор тиску; 10, 11, 12 - трубопроводи.

Рисунок 6.2 – Система охолодження з рідинним акумулятором.

Серед льодоаккумуляторів найбільш поширені панельні, що працюють від централізованої аміачної холодильної установки підприємств. Панельні льодоаккумулятори являють собою прямокутний металевий або залізобетонний бак, в якому розміщені випарні секції та мішалка для створення циркуляції води (рис. 6.3).

Секції складаються з панелей, які виконуються з двох зварених контактним зварюванням листів, відштампованих за спеціальним профілем з листової сталі товщиною 2 ... 2,5 мм. Система охолодження з панельним льодоаккумулятором працює таким чином. У період відсутності теплового навантаження на охолоджувач 7 відбувається замороження льоду на панелях 9 випарника холодильної машини. Рідкий холодильний агент з елімінатора рідини 5 надходить у нижню частину панелей 9, де кипить відводячи приховану теплоту льодоутворення. Парорідинна суміш холодильного агенту з верхньої частини панелей 9 надходить в елімінатор рідини 5, з якого пари відсмоктуються компресором 2, конденсуються в конденсаторі 3, і після регулюючого вентиля 4

холодильний агент знову бере участь в процесі акумулювання холоду. У період охолодження "крижана" вода з бака 1 льодоакумулятора подається насосом 6 в охолоджувач 7, де теплюється і знову надходить у бак 1 для контакту з льодом.



1 – бак акумулятора; 2 – компресор; 3 – конденсатор; 4 – регулюючий вентиль; 5 – елімінатор рідини; 6 – насос; 7 – охолоджувач; 8 – електродвигун мішалки; 9 – панель випарника; 10 – перегородка.

Рисунок 6.3 – Система охолодження з панельним льодоакумулятором

Льодоакумулятори, що застосовуються в даний час мають такі основні недоліки:

- намерозування льоду здійснюється на поверхні випарника, що збільшує її термічний опір, знижує температуру кипіння холодильного агенту і підвищує витрати електроенергії на акумулювання холоду;

- зберігання в ряді випадків льоду на поверхні випарника значно збільшує металоємність і масу акумуляторів;

- використання льоду з температурою плавлення 0°C у випадках, коли необхідна температура холодоносія значно вище (наприклад, в системах кондиціонування повітря, де споживається вода з температурою $8\ldots 10^{\circ}\text{C}$), викликає перевитрату електроенергії,

призводить до додаткових капітальних затрат на теплоізоляцію обладнання;

- низькі швидкості плавлення льоду і обмежена теплообмінна поверхня при розрядці льодоакумуляторів призводить до змін температури холодоносія при пікових теплових навантаженнях.

В даний час проводяться широкі дослідження з пошуку нових ефективних речовин і матеріалів, що акумулюють холод, і розробка конструкцій акумуляторів холоду, які дозволять усунути вказані недоліки льодоакумуляторів. Основними напрямками розробок у даній галузі є:

- використання акумулюючих речовин з фазовим переходом, здатних утворити кристали в обсязі акумулятора, а не на поверхні випарника;

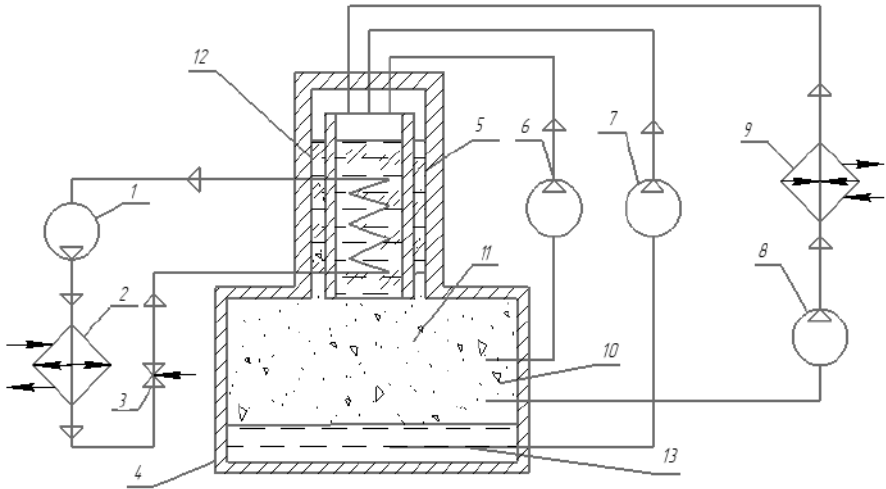
- використання конструкцій акумуляторів холоду, що дозволяють здійснювати прямий контакт акумулюючої речовини з холодильним агентом при зарядці, і з холодоносієм – при розрядці.

Як показують дослідження, низка органічних рідин (хладони, розчинники, ефіри тощо) мають здатність за певних термодинамічних умов (атмосферному тиску і позитивній температурі) в контакті з водою утворювати кристалічні сполуки – гідрати. Основною перевагою гідратів як акумулюючої речовини є їх властивість утворюватися в об'ємі води, що дозволяє накопичувати їх в акумуляторі у вигляді водогідратної суспензії.

Система охолодження з гідратним акумулятором холоду показана на рисунку 6.4.

Принцип роботи такої охолоджуючої системи полягає в наступному. В режимі зарядки акумулятора гідратуутворювальна органічна рідина 13 з нижньої частини ємності 4 акумулятора подається насосом 7 у верхню частину акумулятора, що представляє собою кристалізатор 12 гідратів. Із середньої частини ємності 4 в кристалізаторі 12 подається вода за допомогою насоса 6. Основною частиною кристалізатора 12 є змішувальний випарник 5, в якому відбувається змішування рідини 13 і води та охолодження суміші нижче рівноважної температури гідратуутворення за рахунок кипіння холодильного агенту в змішувальнику випарника 5. Утворені кристали гідратів накопичуються в ємності 4 у вигляді водогідратної

суспензії 11. Для запобігання виносу кристалів гідратів з ємності 4 при роботі насосів 6, 7 та 8, встановлено віддільник 10. У режимі розрядки холодоносії (вода) подається насосом 8 в охолоджувач 9, де відбувається відведення теплоти від споживача. Отеплена вода після охолоджувача 9 надходить у зону випарника 5 для часткового охолодження за допомогою холодильної машини. Подальше охолодження води до необхідної температури відбувається в ємності 4 за рахунок плавлення гідратів.



1- компресор; 2- конденсатор; 3- регулюючий вентиль; 4-ємність для зберігання акумульованої речовини; 5- випарник; 6,7,8- насоси; 9- охолоджувач; 10-віддільник кристалів; 11- водогідратна суспензія; 12- кристалізатор; 13-гідратоутворювальна рідина.

Рисунок 6.4 – Система охолодження з гідратним акумулятором холоду

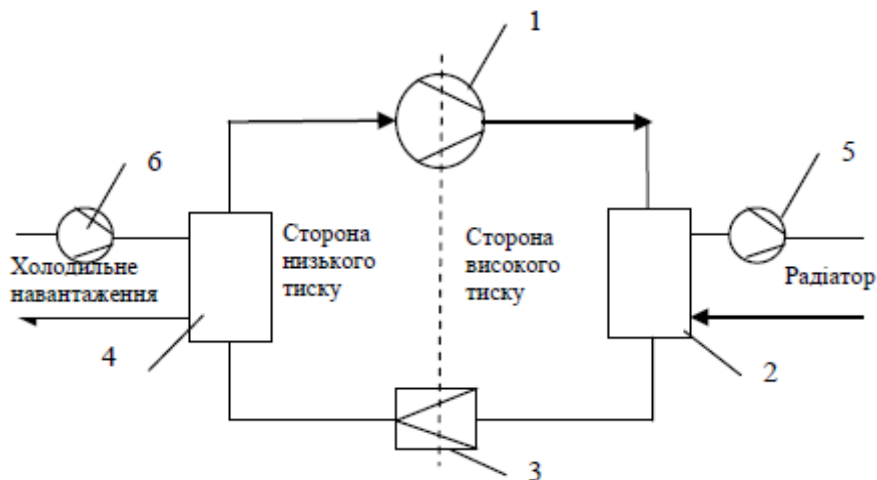
6.3. Проведення енергетичного аудиту холодильних установок

У промисловості основна частина морозильного устаткування є установками компресійного типу. Схема такої одноступеневої холодильної установки показана на рисунку 6.5.

Для проведення енергетичного аудиту холодильного обладнання, щоб за його аналізом запропонувати заходи з енергозбереження, складається рівняння енергетичного балансу холодильної системи.

Рівняння енергетичного балансу для холодильної системи функціональна схема якої наведена на рисунку 6.6 має вид, Вт:

$$P_{\text{спож}} = \Delta P_{\text{д}} + \Delta P_{\text{пер}} + \Delta P_{\text{к}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{кон}} + \Delta P_{\text{вип}} + \Delta P_{\text{хн}} + \Delta P_{\text{р}} + P_{\text{кор}}, \quad (6.7)$$



1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – розширювальний клапан; 4 – випарник; 5 – насос для охолодження конденсатора; 6 – насос для холодної сторони

Рисунок 6.5 – Схема простої одноступеневої холодильної системи.

де $P_{\text{спож}}$ – потужність споживана з мережі; $\Delta P_{\text{д}}$ – втрати потужності у двигуні при перетворенні електричної енергії у механічну; $\Delta P_{\text{пер}}$ – втрати потужності у передавальному механізмі при передачі механічної енергії від двигуна компресору; $\Delta P_{\text{к}}$ – втрати потужності в компресорі при перетворенні механічної енергії в гідродинамічну; $\Delta P_{\text{маг}}$ – втрати потужності у випарнику при теплообміні; $\Delta P_{\text{кон}}$ – втрати потужності у конденсаторі при примусовому охолодженні холодоагенту; $\Delta P_{\text{вип}}$ – втрата потужності

у випарнику при теплообміні; $\Delta P_{хн}$ – втрати потужності на охолодження некорисного холодильного навантаження; ΔP_p – втрати потужності у розширювальному клапані; $P_{кор}$ – потужність, затрачувана на виконання корисної роботи.

Затрачувана потужність на виконання корисної роботи може бути визначена за формулою:

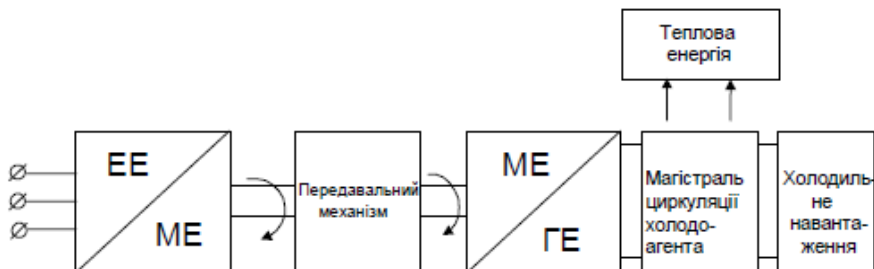
$$P_{кор} = QH, \quad (6.8)$$

де H – повний тиск (напір), що розвивається компресорною установкою, який є різницею повних тисків потоку при виході з компресорної установки і при вході до неї, Па; Q – продуктивність (об'ємна витрата), що становить об'ємну кількість газу, що надходить у компресорну установку за одиницю часу, $\text{м}^3/\text{с}$.

При перетворенні енергії неминуче виникають втрати. Величина, що показує яка частина сумарної підведеної енергії корисно використовується у розглянутому пристрої (тобто енергетичну ефективність роботи пристрою), називається ККД і визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P_{кор}}{P_{\Sigma}}, \quad (6.9)$$

де $P_{кор}$ – потужність, що витрачається на виконання корисної роботи; P_{Σ} – сумарна споживана потужність.



$ЕЕ$ – електрична енергія; $МЕ$ – механічна енергія;
 $ГЕ$ – гідравлічна енергія

Рисунок 6.6 – Функціональна схема холодильної системи

На підставі побудованого балансу і виконаних вимірювань визначають теоретичний і фактичний ККД роботи холодильної установки, здійснюють їх порівняння та роблять висновок:

- при $\eta_{\text{факт}} \geq \eta_{\text{теор}}$, то обстежувана установка працює із закладеною у проекті ефективністю;

- при $\eta_{\text{факт}} < \eta_{\text{теор}}$, то необхідно виявити ділянки, втрати енергії на яких більші, ніж закладені у проекті.

Об'єкти енергоаудиту: холодильні установки; трубопроводи; дроселі; конденсатори; випаровувачі; градирні; електропривод; режим роботи системи; автоматизована система керування.

Завдання енергоаудитора: визначення втрат у системі холодопостачання; визначення питомого споживання холоду; визначення планової величини споживання холоду; складання балансу споживання холоду; визначення потенціалу енергозбереження; оцінка рівня ефективності споживання холоду; розроблення рекомендацій з впровадження енергозберігаючих заходів.

Параметри, що вимірюються:

Температура, витрати, рівень вібрації, тиск.

Дії енергоаудитора:

а) визначити наявність проектної документації і ознайомитися з нею;

б) провести зовнішній огляд трубопроводів і холодильних установок;

в) скласти: список споживачів холоду; схему транспортування холодоагенту із зазначенням її параметрів і точок передбачуваних вимірів; схему обмінних процесів;

г) побудувати добовий графік споживання холоду;

д) визначити: місця витоків холодоагенту і їх обсяг; питоме споживання холоду;

е) проаналізувати: робочі параметри холодильних установок, їхні режими роботи і завантаження; характеристики електроприводів компресорів, вентиляторів і насосів, системи регулювання температури у споживача; обсяги витоків; питоме споживання холоду; графіки вироблення холоду; режим роботи системи споживання холоду; дотримання параметрів холодильного циклу

(налаштування дроселів), рівня рідини у конденсаторі і випарнику; наявність повітря у холодильному контурі; температури на вході і виході та витрати охолоджувальної води; стан градирень, трубопроводів і камер, обмерзання поверхонь; величини підживлення охолоджувальної води.

6.4. Основні можливості енергозбереження в системах охолодження

Типові можливості для економії енергії в системах охолодження наступні:

- уникати переохолодження продукту;
- поліпшення термоізоляції холодильних камер і зменшення їхньої внутрішньої вентиляції;
- підвищення ефективності шляхом збільшення рівня температури на холодній стороні і зниження рівня температури на гарячій стороні;
- поліпшення розморожувальної системи;
- зменшення часу відкритих дверей холодильної машини;
- при мінливому навантаженні, холодильна машина повинна мати автоматичне керування, наприклад, за допомогою термостата;
- зменшення кількості теплоти, що віддається холодильній камері різними об'єктами – насосами, освітленням, персоналом тощо;
- забезпечити оптимальну теплопередачу у випарнику і конденсаторі;
- заміна існуючого застарілого двигуна на сучасний економічний двигун, по можливості меншої потужності;
- заміна морозильного устаткування старого типу з низьким ККД сучасним морозильним обладнанням з відповідними теплоізолюючими властивостями;
- вимкнення морозильного обладнання холодної пори року (при допустимій температурі навколишнього середовища);
- зменшення теплових втрат холодоагенту за рахунок поліпшення термоізоляції;
- контроль повітряно-вентиляційної системи конденсатора;

- уникати роботи компресорів у напівнавантаженому стані.

Контрольні питання

1. Класифікація холодильних установок.
2. Чим характеризується енергетична ефективність роботи холодильних машини?
3. Запишіть енергетичний баланс холодильної установки.
4. Яке призначення акумуляторів холоду в охолоджувальних системах.
5. Які існують способи акумулювання теплової енергії?
6. Класифікація холодоносіїв акумуляторів холоду.
7. Як визначається ККД холодильної установки?
8. Етапи проведення енергоаудиту холодильний установок.
9. Які параметри холодильної установки вимірюються при проведенні енергетичного аудиту?
10. Які основні можливості енергозбереження в системах холодопостачання.

7. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У СИСТЕМАХ ПОСТАЧАННЯ СТИСНУТОГО ПОВІТРЯ

7.1 Характеристика системи виробництва стисненого повітря

Стиснене повітря, що широко застосовується у технологічних процесах різних галузей виробництва, дає великі зручності в роботі, але для його виробництва необхідні значні витрати електричної енергії, тому є неефективним. Близько 90 % електроенергії, яка витрачається на його виробництво, втрачається у вигляді теплоти і тільки менше 10 % перетворюється у корисну. В загальному балансі споживання електричної енергії на підприємствах витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря досягають 30%. Недосконала конструкція і витоки повітря з трубопроводів розподілення призводять до подальшого зниження ефективності ще на 30-50 %. У зв'язку з цим, скорочення витрат електроенергії на компресорних станціях повинно бути одним з головних завдань при їх експлуатації.

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

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

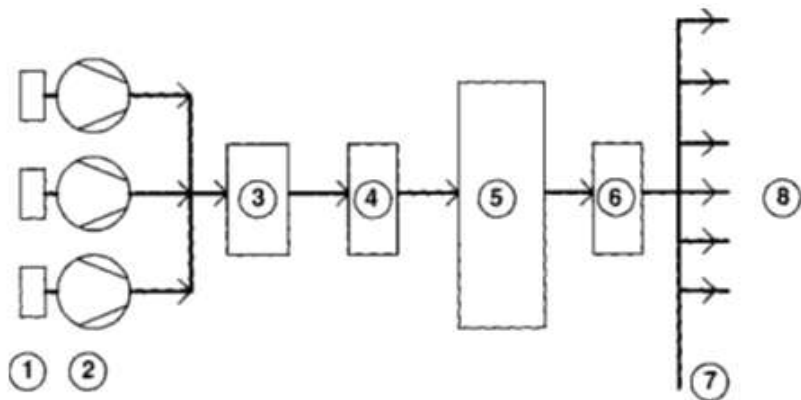
Будова системи стисненого повітря наведена на рисунку 7.1.

Споживачами стисненого повітря є пневматичні інструменти, механізми і пристрої, які використовують стиснене повітря для різних виробничих операцій.

Причин високої собівартість виробництва стисненого повітря і його низької якості декілька:

- постачання стисненого повітря підприємствам здійснюється, як правило, з центральної компресорної станції. Деякі споживачі стисненого повітря віддалені на сотні і навіть тисячі метрів, як результат у трубопроводах мають місце великі гідравлічні втрати, конденсатні пробки, витоки, величина яких значно перевищує нормативні. Крім того, жорстка централізація ускладнює постачання

різним споживачам стисненого повітря різних рівнів тиску. Тиск вибирається на рівні необхідному для «високобарного» устаткування, і багато споживачів витрачають стисненого повітря значно більше, ніж це необхідно;



1 – всмоктувальний повітряний фільтр; 2 – компресори; 3 – охолоджувач на виході; 4 – вологовіддільник; 5 – повітроприймач; 6 – додаткова повітряна сушарка; 7 – розподільна мережа; 8 – пнеумоінструмент.

Рисунок 7.1. Будова системи виробництва стисненого повітря.

- на більшості компресорних станцій встановлено фізично і морально застарілі компресорні агрегати, які мають питому витрату електроенергії на 25 – 30% вище, в порівнянні з сучасними компресорними агрегатами. Крім того, для цих компресорів часто застосовується водяне охолодження з відповідними витратами на водопідготовку;

- регулювання виробництва стисненого повітря компресорною станцією відповідно до споживання здійснюється вмиканням–вимиканням компресорів, або дроселюванням (штучним зниженням тиску нижче атмосферного) на всмоктуванні, або спусканням надлишкового повітря в атмосферу, об'єм якого досягає 50% від продуктивності компресорів;

- споживачі стисненого повітря в переважній більшості не мають приладів обліку спожитого повітря, що призводить до його нераціонального використання, відсутності стимулювання економії;

- на компресорних станціях, при транспортуванні стисненого повітря, у споживачів, як правило, відсутні, або встановлено малоефективні, не автоматизовані сепаратори вологи, осушувачі повітря, конденсатовідвідники.

Таким чином, модернізація компресорних станцій, розподільних мереж, споживачів стисненого повітря у поєднанні з розумною децентралізацією та утилізацією скидної теплоти є одним з істотних резервів зниження собівартості й підвищення якості продукції, ефективним заходом енергозбереження.

7.2. Заходи по підвищенню ефективності систем виробництва стисненого повітря

Підвищення ефективності роботи компресорів

Для централізованої подачі стисненого повітря трубопроводом на виробничі лінії використовуються об'ємні поршневі компресори, що розміщені на загальній компресорній станції. Продуктивність компресорів контролюється, як правило, за допомогою запобіжного клапана для підтримання споживання електроенергії компресорами, і є незмінною навіть тоді, коли потреба у подачі стисненого повітря на деякий час відсутня. Клапан випускає повітря в атмосферу, тоді як компресор продовжує працювати. Компресори, що працюють без навантаження, можуть споживати 40 % потужності повного навантаження.

Комбінація з гвинтових і поршневих компресорів може бути якісним засобом контролю. Гвинтові компресори ефективні при пониженні навантаження в межах до 70 % від повного навантаження, і тому їх доцільно використовувати для покриття базового значення навантаження. Поршневі компресори ефективніші при частковому завантаженні і тому повинні використовуватися для покриття пікових навантажень, при яких потрібні різні величини їх навантаження.

Утилізація теплоти стисненого повітря при роботі компресорів промислових підприємств, дозволяє збільшити ККД процесу стиснення повітря на 10-12 % та забезпечити опалювання виробничих приміщень.

Підготовка і осушення стисненого повітря

При застосуванні стисненого повітря, яке використовується у багатьох галузях промисловості та енергетики для різних технічних потреб, часто виникає потреба у дотриманні вимог підвищеної його сухості.

При стисненні повітря концентрація води зростає. Наприклад, компресором з робочим тиском 7 бар і продуктивністю 200 л/с, який всмоктує повітря з температурою 20°C і відносною вологістю 80%, за 8 годин буде утворено і передано в лінію стисненого повітря 80 л води. Оскільки після стискання повітря в компресорі здійснюється його охолодження з утворенням конденсату, рекомендується відводити максимальну його кількість перш, ніж він досягне розподільної системи. При цьому уникають проблем і порушень роботи, викликаних осадженням води в трубопроводах і приєднаного до системи устаткування. Тому система для вироблення сухого стисненого повітря повинна оснащуватися охолоджувачами, сепараторами, вологовіддільниками та осушувачами.

Вологовіддільники в більшості випадків повинні функціонувати за несприятливих умов, які виникають через наявність мастила на ретельно змащених циліндрах компресора. При роботі компресора через високі швидкості повітря в циліндрах відбувається захоплення деякої кількості мастила, що призводить до утворення водо-мастильної суміші. Оскільки питома вага мастила зазвичай менша, ніж води, воно знаходиться на поверхні.

Застосовують чотири способи видалення вологи із стисненого повітря: охолодження, надмірне стискання, абсорбція і адсорбція. Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки і відповідно з цим свою область застосування. Так, для технічних систем, що потребують більш повної очистки повітря від вологи, доцільне застосування незалежної системи осушки за допомогою сухих абсорбентів. Абсорбційне осушення є хімічним процесом, у якому

водяна пара зв'язується поглинаючим матеріалом. Цей спосіб пов'язаний з великою витратою матеріалу абсорбції.

Процес холодної регенерації адсорбційного осушення відбувається за допомогою стисненого повітря і вимагає приблизно 15–20% номінальної продуктивності осушувача при робочому надлишковому тиску 7 бар. При гарячому регенеративному адсорбційному осушенні вологопоглинач регенерується за допомогою електричного нагрівання або нагрівання від компресора, що робить процес економічнішим, ніж холодна регенерація.

На сьогодні в області низьких і середніх тисків та відносно значних тривалих витрат стисненого повітря широко застосовується технологія його осушки шляхом охолодження. За цією технологією повітря спочатку стискається до тиску, що перевищує робочий, при якому збільшується концентрація водяної пари. Потім повітря охолоджується, в процесі чого відділяється вода.

Осушка атмосферного повітря до помірної відносної вологості відноситься до області кондиціювання повітря.

У деяких випадках осушене повітря повинно мати низьку температуру, тоді в процесі осушки одночасно вирішуються обидва завдання - осушення і охолодження. У більшості випадків така задача не ставиться, і тоді, попередньо охолоджене тепле повітря, що надходить на осушку, за рахунок холоду, яке відходить від осушеного повітря, можна скоротити витрату холоду приблизно на 50 %.

Об'ємна вологість насиченого повітря залежить від температури і не залежить від тиску. Кінцева температура охолодження повітря в процесі осушки визначається необхідним вологовмістом осушеного повітря.

Вологовміст насиченого повітря в залежності від температури і тиску наведено на рисунку 7.2. За допомогою цієї діаграми можна вирішувати низку конкретних завдань в області осушування повітря охолодженням.

У невідповідальних випадках, щоб уникнути ускладнення осушувальної установки, вимоги до вологовмісту повітря обмежують значенням 0,7 г/кг (відповідна точка роси при атмосферному тиску

близько -20°C). У цьому випадку повітря тиском $0,8\text{ МПа}$ достатньо охолодити до 5°C .

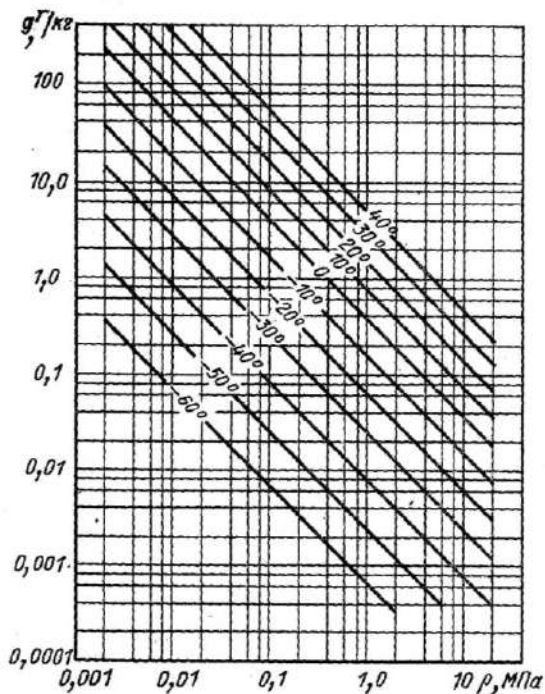


Рисунок 7.2 - Вологовміст насиченого повітря g (в г/кг) залежно від тиску і температури

Залежно від параметрів осушувачого повітря застосовують різні поверхневі теплопередавальні охолоджувальні апарати – вертикальні і горизонтальні кожухотрубі, радіаторного та інших типів. Повітря, яке охолоджують, пропускають як всередині, так і зовні труб. При контактному процесі для охолодження стисненого повітря застосовують скрубери різної конструкції з розбризкуванням охолоджувальної рідини або зі зрошуваною насадкою. При тиску, близькому до атмосферного, застосовують апарати, подібні камерам зрошення систем кондиціонування повітря.

У процесі осушки повітря можна охолодити в поверхневому повітроохолоджувачі або безпосереднім контактом з холодною

рідиною в контактному апараті. В обох випадках, з використанням поверхневого повітроохолоджувача або безпосереднього контакту з холодною рідиною, вирішальне значення мають температурні межі процесу.

При температурі охолоджуючої поверхні вище 0°C сконденсована з повітря волога осідає на холодній поверхні в рідкому вигляді, вільно стікає вниз і легко відводиться з системи. Конденсуючись в розчин, волога з повітря знижує його концентрацію. При температурах нижче 0°C конденсат висаджується у твердій фазі у вигляді снігової шуби і повинні передбачатися спеціальні заходи для її видалення.

При використанні всіх систем охолодження не допускається винесення крапель вологи або частини снігу, що істотно знижує ефект осушки. Для запобігання такого винесення використовують волого- і сніговловлювачі. У контактних повітроохолоджувачах при температурах вище 0°C застосовують холодну воду, нижче 0°C – розсоли.

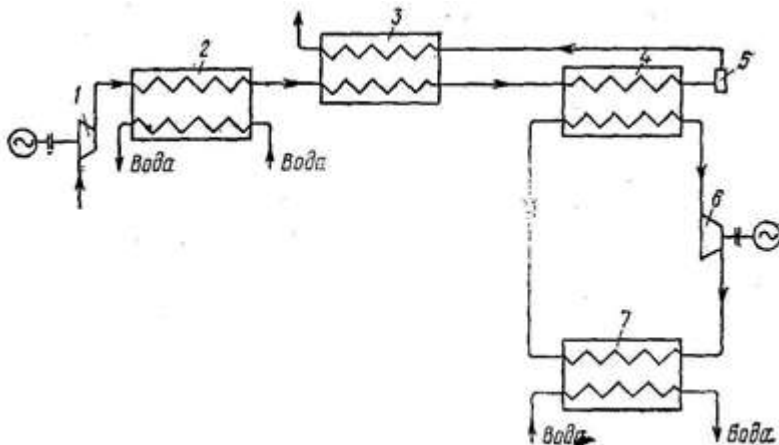
Найчастіше все споживане на підприємстві стиснене повітря піддають осушенню. У цьому випадку осушувальне обладнання розташовують у заводських компресорних станціях. Іноді при цьому в кожній компресорній установці встановлюють окремий осушувальний агрегат. В таких агрегатах застосовують парокомпресійні холодильні машини, що працюють на аміаку або фреоні.

Принципова схема осушувального агрегату, з теплообмінником «повітря-повітря» та фреоновою холодильною машиною, показана на рисунку 7.3.

Споживання стисненого повітря може різко коливатися, тому характеристика осушувальної установки повинна мати можливість пристосовуватися до змінного режиму для уникнення недопустимого зниження температури охолодження нижче точки роси і замерзання в періоди зниженої витрати повітря.

Вартість устаткування для осушення стиснутого повітря тиском $0,8\text{ МПа}$ складає до 50% вартості відповідного компресорного обладнання, а додаткова витрата енергії на осушку – близько 5% витрати енергії на стиснення повітря. Спеціалізована холодильна

установка ОВМ-15, що призначена для отримання осушеного повітря, яке використовується для роботи пневматичних механізмів, показана на рисунку 7.4.



1 – повітряний компресор; 2 – кінцевий холодильник компресора; 3 – повітряний теплообмінник; 4 – повітроохолоджувач; 5 – водовіддільник; 6 – фреоновий компресор; 7 – конденсатор холодильної машини

Рисунок 7.3 – Принципова схема осушувального агрегату до повітряного компресора

Таким чином, охолодженням досягають конденсації і відокремлення необхідної кількості води. Після чого стиснене повітря знову підігрівається до температури близької до кімнатної, тому на зовнішніх поверхнях системи трубопроводів не утворюється конденсату.

Установка являє собою єдиний агрегат, змонтований на металевій рамі, і включає в себе повний комплект обладнання холодильної машини і регенеративний теплообмінник «повітря-повітря». Конструктивно випарник «фреон-повітря» і теплообмінник «повітря - повітря» об'єднані в апаратний блок, причому в обох апаратах є спеціальна система відділення сконденсованої вологи. Зібрана вода відводиться в каналізацію за допомогою конденсаційного горщика.

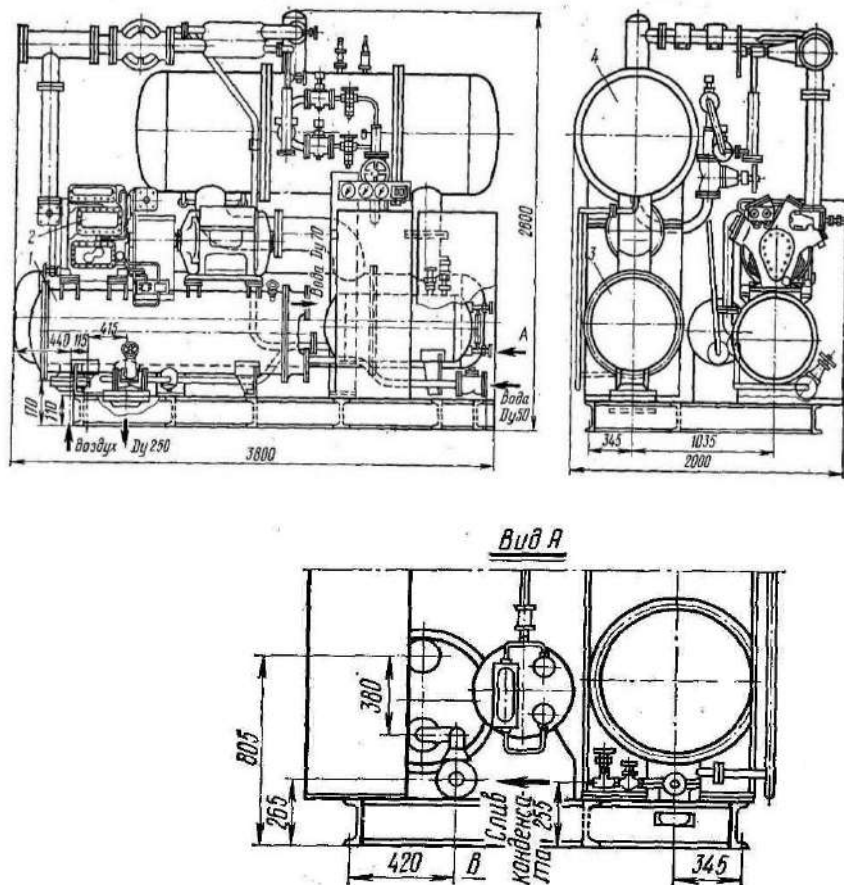


Рисунок 7.4 - Установка ОВМ-15 для осушения стисненого повітря охолодженням

Підігрів стисненого повітря перед споживачем

Стиснене повітря перед споживачами характеризується температурою t_{nc} , тиском P_{nc} і вологовмістом d_{nc} . Для забезпечення розширення «сухого» повітря споживачем необхідною умовою є сталість вологовмісту у будь-якій точці процесу. Виконання останньої умови можливо у тому випадку, якщо температура повітря

споживача не досягає точки насичення його парою (відносна вологість $\varphi < 1$).

Мінімальне значення температури перед споживанням (при заданих значеннях P_{nc} , d_{nc} і P_{zc}), коли можливий процес розширення повітря споживачем без випадіння вологи, розраховується за формулою:

$$T_{nc}^{min} = T_{zc} \left(\frac{P_{nc}}{P_{zc}} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (7.1)$$

де n – показник розширення повітря споживачем (показник політропи).

При значення температури повітря перед споживачем $T_{nc} < T_{nc}^{min}$ буде відбуватися випадіння вологи. Для усунення цієї умови необхідно підігріти стиснене повітря. Підігрів стисненого повітря призводить до підвищення його якості, що дозволяє у більшості випадків відмовитися від застосування установок осушення стисненого повітря і збільшує його ентальпію.

Оскільки підігрів повітря здійснюється в магістралі, то можна вважати, що $V_2/V_1 = T_2/T_1$. У пневматичних пристроях має місце об'ємна витрата, тобто витрачається незмінна за об'ємом кількість повітря V , м³/с.

Користуючись співвідношенням $m = V/\nu$, можна отримати відношення масової витрати повітря m_1 перед нагріванням до масової витрати після нагрівання m_2 :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (7.2)$$

звідки $m_2 = T_1/T_2 \cdot m_1$, а зменшення витрати повітря при його підігріві

$$\Delta m = m_1 - m_2 = m_1 \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right), \quad (7.3)$$

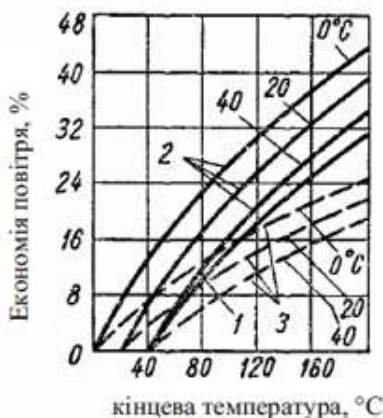
де m_1, m_2 – масові витрати повітря; v – питомий об'єм; T_1, T_2 – абсолютна температура повітря до і після нагріву, К.

Так, при підігріванні повітря від 25 °С до 185 °С витрата повітря при об'ємному його використанні зменшиться і складатиме

$$\Delta m = 100 \left(1 - \left(\frac{298}{458} \right) \right) = 35 \%. \quad (7.4)$$

Таким чином, підігрів стисненого повітря перед споживачем також дозволяє зменшити витрату повітря при постійній споживаній потужності.

Криві, що характеризують економію стисненого повітря при об'ємній його витраті при витіканні (пунктирна лінія) в залежності від його початкової температури (0; 20 і 40 °С) і кінцевої при його нагріванні, наведені на рисунку 7.5.

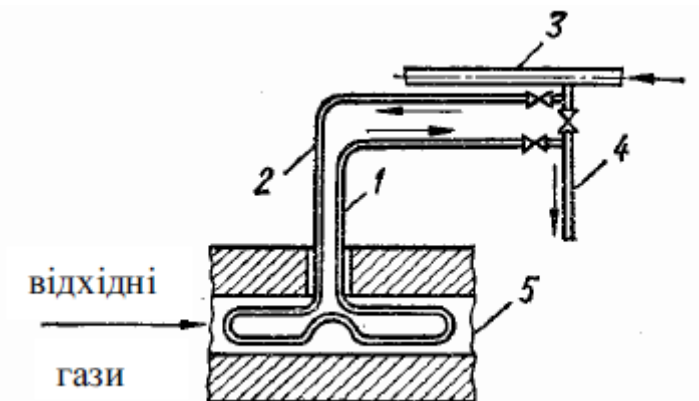


1 – середня витрата; 2 – корисна витрата; 3 – втрата.

Рисунок 5 – Криві, що характеризують економію стисненого повітря в залежності від ступеня підігріву.

Для підігрівання стисненого повітря може бути використане тепловиділення від трубопроводів, які транспортують нагріті середовища, наприклад, тепловиділення від паропроводів. Для цього паропровід і трубопровід стисненого повітря прокладають поруч у спільній ізоляції.

Схема установки повітропідігрівника у лежку промислової печі наведена на рисунку 7.6.



1 – трубопровід підігрітого повітря; 2 – трубопровід холодного повітря; 3 – трубопровід стисненого повітря; 4 – трубопровід до споживачів; 5 – лежак.

Рисунок 6 – Схема установки повітропідігрівника у лежку печі

Розподільні системи

Втрати з витоками створюють додаткові витрати і знижують енергоефективність. Витоки у системі розподілу, включаючи витоки в ємностях і пневмоінструментах створюють найбільшу частину втрат, але з іншого боку, є простим і дешевим для прийняття рішень способом щодо їх усунення і контролю.

Система стисненого повітря з витоками менше 5% від загального споживання вважається відмінною, а система з витоками 10% - доброю. Для звичайної системи характерні втрати енергії з витоками до 30%. Під час передавання газодинамічної енергії трубопроводами неминуче виникають втрати. Ці втрати обумовлені втратами тиску на тертя і в місцевих опорах, що виникають під час

руху потоку газу магістраллю, а також різницею тисків у місцях всмоктування і нагнітання. Втрати потужності в магістралі

$$\Delta P_{\text{маг}} = \Delta p_{\text{маг}} \cdot Q, \quad (7.5)$$

де: $\Delta p_{\text{маг}}$ – втрати тиску на всіх ділянках магістралі, Па; Q – продуктивність компресорної установки, м³/с.

Споживачі. Одним з основних чинників економії енергії при виробленні і споживанні стисненого повітря є правильний вибір тиску з можливим допустимим, за технологією, зниженням тиску повітря у споживачів. Якщо навантаження компресора не постійне в часі, то його продуктивність повинна контролюватися і керуватися. Зниження навантаження досягається шляхом відключення неробочого пневмоінструменту або усуненням холостої роботи при постійному нульовому навантаженні.

Також одним із заходів економії енергії є поділ мережі на секції, передбачивши можливість вимикання окремих секцій за допомогою електромагнітних клапанів, таким чином забезпечивши управління споживанням стисненого повітря в ланках, що простоюють.

При використанні в одній системі різних рівнів тиску, доцільно розглянути можливість розділення її на дві або більшу кількість. Так, наприклад, при зменшенні тиску на деяких компресорах на 0,2 МПа, можна скоротити витрату енергії на 15%. В окремих випадках доцільна заміна пневмоінструменту на інструмент з електроприводом.

Проведення енергетичного аудиту в системах стисненого повітря та заходи з енергозбереження

Базовим елементом проведення енергоаудиту системи стисненого повітря є наявність достовірних даних про споживання стисненого повітря на підприємстві. За допомогою технології проведення прямих вимірювань витрати стисненого повітря, можна в найкоротші терміни визначити параметри витрат стисненого повітря в різних точках пневмомережі в динаміці. Для встановлення переносного приладу-витратоміра досить лише невеликого врізу на прямій ділянці трубопроводу. Для встановлення датчика і

проведення вимірювань витрати стисненого повітря необхідно в заданій точці пневмомережі встановити кульовий вентиль.

Результатом вимірювання є графік споживання стисненого повітря, отриманий під час проведення енергоаудиту системи стисненого повітря, за яким можна визначити зміну витрати стисненого повітря в часі. За допомогою цих графіків/таблиць можна визначити характер споживання стисненого повітря підрозділами підприємства. Це дозволяє вибрати устаткування максимально відповідне для того або іншого підрозділу.

За підсумками вимірювань розробляється техніко-економічне обґрунтування декількох варіантів розміщення устаткування. Дані варіанти оцінюються за енергоспоживанням і витратами на технічне обслуговування.

Порядок проведення енергоаудиту систем стиснутого повітря:

Об'єктами енергоаудиту систем стисненого повітря є:

- Компресорні установки;
- Системи охолодження повітря;
- Масло-та вологовідділювачі;
- Трубопровідні мережі і арматура;
- Повітрозбірники;
- Градирні;
- Електропривід;
- Режим вироблення стисненого повітря;
- Система обліку стисненого повітря.

Завдання енергоаудитора:

- Визначення доцільності використання стисненого повітря;
- Визначення втрат в елементах системи стисненого повітря;
- Визначення планової величини споживання стисненого повітря;
- Визначення питомого споживання стисненого повітря за технологіями цехами і підприємством у цілому;
- Оцінка рівня ефективності споживання стисненого повітря;
- Розробка рекомендацій з впровадження енергозберігаючих заходів.

Документальна інформація:

- Проектні рішення по компресорних станціях, перспективи їх розвитку;
- Схема виробництва і розподілу стисненого повітря;
- Режим споживання стисненого повітря;
- Тип, кількість, характеристики пневмоприймачів;
- Технічні характеристики основного і допоміжного устаткування, графіки тиску, роботи тощо;
- Техніко-економічні показники роботи;
- Експлуатаційно-ремонтна документація;
- Завантаження компресорів;
- Витрати і тиск повітря на вході в систему;
- Витрати і тиск повітря у споживача;
- Витрата і температура охолодженої води на вході і виході з системи охолодження компресора;
- Величина витoku в системі охолодження компресора.

Дії енергоаудитора:

- а) провести зовнішній огляд систем стисненого повітря;
- б) визначити:
 - наявність проектної документації і ознайомитись з нею;
 - витрати стисненого повітря і випуск продукції за технологіями;
 - місця витоків стисненого повітря і їх обсяг;
- в) скласти список споживачів стисненого повітря;
- г) побудувати:
 - схему розподілу стисненого повітря;
 - добовий графік споживання стисненого повітря споживачами і підприємством у цілому;
 - річний графік вироблення стисненого повітря;
- д) здійснити вимірювання параметрів всмоктувального і стисненого повітря;
- е) розрахувати:
 - величину питомого споживання стисненого повітря за технологіями цехів і підприємства в цілому;
 - втрати стисненого повітря в елементах системи постачання стисненим повітрям;
- є) проаналізувати:

- обсяг витоків;
- втрати тиску стисненого повітря;
- питоме споживання стисненого повітря;
- відповідність параметрів повітропроводів витратам повітря;
- графіки вироблення і споживання стисненого повітря;
- параметри повітря, що подається до споживача;
- систему регулювання вироблення стисненого повітря;
- схему розподілу стисненого повітря;
- доцільність використання стисненого повітря.

Можливості енергозбереження в системах стисненого повітря

Економія стисненого повітря

Зниження тиску на 0,1 МПа дає близько 6% економії електроенергії і знижує витoki на 12%.

Для задання мінімального робочого тиску в мережі необхідні:

- орієнтування на мінімально допустимий робочий тиск устаткування;
- правильний вибір перерізу трубопроводів;
- своєчасне обслуговування фільтрів;
- використання компресорів з сучасною системою регулювання;
- використання єдиної системи регулювання для компресорної системи.

Усунення витоків може дати значний ефект. Часто після усунення основних витоків необхідний об'єм повітря знижується на 30–50% і більше. Так, усунення одного витoku через отвір діаметром 5 мм у системі стисненого повітря з тиском 8 атм при умові роботи системи 5400 годин за рік, дає можливість ліквідувати втрати електричної потужності в 13 кВт і зберегти $13\text{ кВт} \cdot 5400\text{ год} = 70200\text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$ або близько 3000 доларів США.

Використання теплоти, що виділяється компресором

У процесі стиснення значна частина витраченої енергії перетворюється в теплоту. Основна частина теплової енергії розсіюється через систему охолодження. При установці додаткового блоку рекуперації енергії 70% спожитої енергії може бути повернено у вигляді гарячої води з температурою 80 °С. При використанні блоку

рекуперації енергії загальна вартість компресорної системи може бути зменшена на 40%.

При установці компресора з повітряним охолодженням можна використовувати гаряче повітря контура охолодження для опалювання сусідніх приміщень. У цьому випадку гаряче повітря в літній час видаляється в навколишнє середовище, а в холодну пору року – в опалювані приміщення.

Інші можливі енергоощадні заходи

Виробництво 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 вимикатися.

3. Регулярне очищення всмоктувального фільтра.

4. Удосконалення системи керування роботою мережі компресорів для досягнення оптимальної пріоритетності процесів вмикання і вимикання.

5. Відбір теплоти за наявності теплового навантаження.

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

7. Зменшення втрат електроенергії, шляхом заміни застарілих компресорів на сучасні.

Транспортування і розподілення стисненого повітря:

1. Вимикання окремих секцій мережі за допомогою вентилів.

2. Поділ системи на дві або більшу кількість систем, якщо в одній і тій самій системі використовуються різні рівні тиску.

3. Усунення витоків стисненого повітря з повітропроводів низького тиску.

4. Зменшення витоків стисненого повітря через нещільності в арматурі та шлангах.

Споживання стисненого повітря:

1. Вимкнення невикористовуваного пневмоінструменту.

2. Заміна стисненого повітря іншими енергоносіями.

3. Вибір оптимального робочого тиску стисненого повітря.

4. Підігрівання стисненого повітря перед пневмопримачами.

Контрольні питання

1. Які основні причини високої собівартості і низької якості стисненого повітря?
2. Назвіть основні категорії напрямків енергозбереження в системах стисненого повітря.
3. Назвіть основні методи запобігання виникненню втрат при експлуатації систем стисненого повітря.
4. У чому небезпека наявності води в системах стисненого повітря?
5. Які існують шляхи осушування стисненого повітря?
6. Як забезпечується осушування стисненого повітря шляхом охолодження?
7. Чим обумовленні втрати тиску, які виникають під час передавання стисненого повітря?
8. З якою метою здійснюють підігрів стиснутого повітря перед споживачем?
9. Якими параметрами характеризується стиснене повітря перед споживачем.
10. Які умови зменшення витрат стисненого повітря.

8. СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ЗАСТОСУ- ВАННЯ ВДЕ ТА ВЕР

8.1. Біопаливо та його застосування

Наявність біологічних видів палива в енергетичному балансі кожної країни стає все більше актуальним питанням для енергетичної і екологічної безпеки. Тому агропромисловий комплекс має важливе значення як постачальник сировини не тільки для харчової промисловості, але і для енергетичної галузі. Враховуючи великий аграрний потенціал України, можна частково забезпечити потреби у паливі власними біоенергетичними ресурсами, що буде сприяти зменшенню залежності від імпорту енергоносіїв і поліпшенню навколишнього середовища.

8.1.1. Підвищення ефективності використання твердих рослинних відходів

На сьогодні як у промисловості, так і у сільському господарстві актуальним є залучення до термохімічної переробки відходів лісового і сільського господарства.

Згідно Закону України від 14.01.2000 № 1391-XIV біомаса - це біологічно відновлювальна речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу (відходи сільського господарства (рослинництва і тваринництва), лісового господарства та технологічно пов'язаних з ним галузей промисловості, а також органічна частина промислових та побутових відходів).

Недолік рослинних відходів та деревного палива - невисока теплота згоряння, яка значно знижується при збільшенні вологості і зольності палива. Їх вологість може змінюватись у достатньо широких межах.

Енергетичне використання рослинних та деревних відходів шляхом спалювання є одним з ефективних способів їх утилізації. Однак відмінною їх особливістю є здатність інтенсивно поглинати вологу із зовнішнього середовища. При тривалому зберіганні за

рахунок атмосферних опадів та інших факторів такі відходи швидко зволожуються, що знижує ефективність їх спалювання.

Збільшення вологості палива знижує теплоту його згоряння, підвищуючи витрату теплоти на випаровування води. Внаслідок підвищення вологості палива знижується температура горіння, що призводить до скорочення теплосприйняття радіаційними і конвективними поверхнями нагріву і, як наслідок, до підвищення втрат теплоти з відхідними газами і перевитрати палива. Так, підвищення вологості палива на 10-15% призводить до зниження ККД енергетичної установки на 0,5-0,6%.

Найбільш широко застосовують тверде біопаливо, виготовлене з твердих рослинних та деревних відходів у вигляді пелет та брикетів. Таке паливо має високу конкурентоспроможність порівняно з іншими видами традиційного палива. Їх теплотворна здатність у 1,5 рази більше, ніж у звичайної деревини.

Проводяться дослідження по створенню композитного палива на основі рослинних відходів з використанням опалого листя, побутових відходів та місцевих видів палива.

Найбільш науково і технічно розробленими способами енергетичного використання біопалива є його пряме спалювання в топках і піроліз. Особливо привабливий другий метод, оскільки він є екологічно чистим та із застосуванням якого більш повно використовується енергетичний потенціал твердого палива.

Піроліз - це процес, при якому органічна сировина піддають нагріванню без доступу або недостатній кількості кисню для одержання похідних палив (твердих, рідких і газоподібних). Продуктами піролізу є генераторний газ (синтез-газ), рідкий конденсат у вигляді смол і масла, тверді залишки у вигляді вугілля і золи.

Рівняння теплового балансу піролізу палива без доступу кисню має вид

$$Q_n^p + Q_{nir} = g_{22} Q_n^{22} + Q_{\phi m}^{22} + g_{mв.3} Q_n^{mв.3} + Q_{\phi m}^{mв.3}, \quad (8.1)$$

де Q_H^p – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг; $Q_{\text{пір}}$ – теплота, яку необхідно підвести до палива, для здійснення піролізу, кДж/кг; $Q_H^{\text{гг}} Q_H^{\text{тв.з}}$ – теплота згоряння генераторного газу і твердого залишку, кДж/кг; $g_{\text{гг}}, g_{\text{тв.з}}$ – питомий вихід генераторного газу і твердого залишку; $Q_{\text{фт}}^{\text{гг}}, Q_{\text{фт}}^{\text{тв.з}}$ – фізична теплота генераторного газу і твердого залишку, одержана в процесі піролізу, кВт.

Газифікація - це піроліз, проведений з метою максимального отримання похідного газоподібного палива. Пристрої для часткового спалювання біомаси, проєктовані на отримання максимального виходу горючих газів, називаються газогенераторами.

Для здійснення процесу газифікації біопалива необхідно підтримувати рівноважну температуру близько 900 °С, а для отримання вугілля в результаті піролізу - температуру 600-700 °С.

Переваги газифікації палива:

1) при спалюванні палива з високим вмістом води неможливо отримати високі температури, тоді як при спалюванні газу, отриманого з цього ж палива, такі температури досяжні;

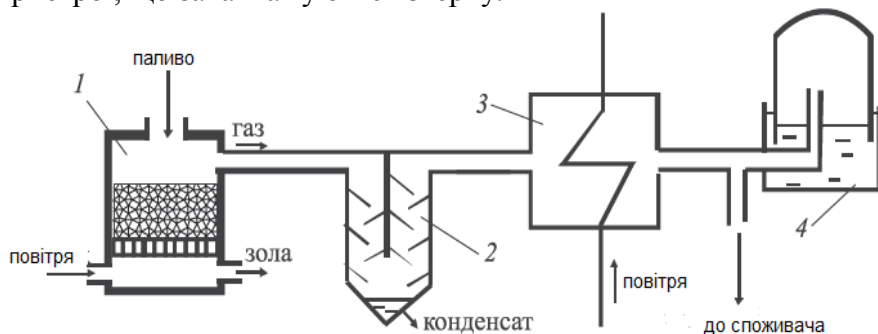
2) при спалюванні газу потрібна менша кількість надлишкового повітря ($\alpha = 1,02-1,05$), ніж для кускового палива ($\alpha = 1,2-1,3$), завдяки чому збільшується температура горіння і, як наслідок, підвищується ефективність вилучення енергії, що утримується у паливі;

3) легше автоматизувати процеси спалювання палива;

4) в процесі піролізу при температурі нижче 1000 °С не відбувається плавлення золи, а отже, не відбувається шлакування газогенератора.

Певну проблему для виробництва електроенергії з використанням газифікації являє низька теплотворна здатність генераторного газу у порівнянні з рідкими паливами і природним газом. Цей недолік усувається шляхом застосування спеціального устаткування - газових двигунів і турбін, спеціально сконструйованих для роботи на низькокалорійному паливі. Схема установки для здійснення піролізу приведена на рисунку 8.1.

Паливо надходить в газогенератор 1, вироблений газ подається в конденсатовідвідник 2, де від газу відділяється волога. Потім газ надходить в теплообмінник 3, де утилізується залишкове тепло газу для власних потреб установки (наприклад, для попереднього сушіння палива). Охолоджений газ подається або до споживачів, або в ємність для зберігання газу під тиском - газгольдер 4. Найбільш затребуваними вважаються вертикальні пристрої, що завантажуються зверху.



1 - газогенератор; 2 - конденсатовідвідник;

3 - теплообмінник; 4 – газгольдер

Рисунок 8.1 - Установка для здійснення піролізу

Існують різні схеми газогенераторних процесів. До більш простих належить шарова газифікація, яка може відбуватися при зустрічній подачі повітря і палива – прямий процес (рис. 8.2 а) та попутній подачі палива і повітря зверху -зворотний процес (рис.8.2 б).

У прямому процесі повітря подається в нижню частину газогенератора, де досягається максимальна температура горіння і найкращі умови для повного вигорання вуглецю палива, що знижує недопал до 1-2% від початкової кількості вуглецю. Топкові гази проходять шар палива від низу до верху, охолоджуються і збагачуються летючими смолистими фракціями і водою. Наявність водяної пари у генераторному газі призводить до зниження його теплоти згоряння. При охолодженні генераторного газу, збагаченого смолистими фракціями, відбувається забивання газових магістралей.

За зворотною схемою газифікації зони сухої перегонки і сушки розташовуються вище зони горіння, як і у прямому процесі, але летючі, смолисті фракції і волога проходять цю зону, і на вихідній її ділянці смолисті фракції згоряють, що забезпечує найкращі умови для реакцій відновлення.

При зворотному процесі кількість смолистих речовин і вологи у газогенераторному газі, що виробляється, мінімально.

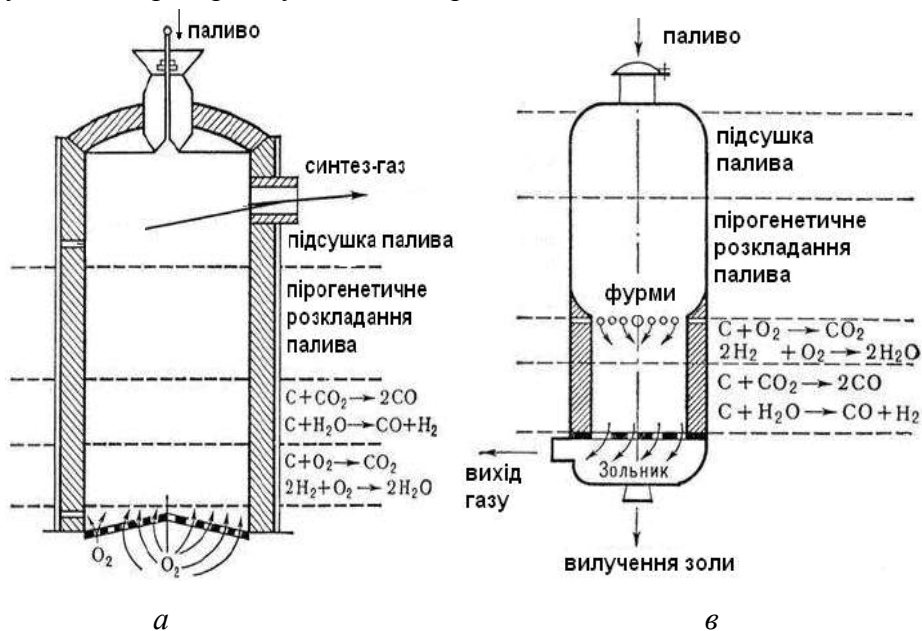


Рисунок 8.2 - Схема роботи газогенератора прямого (а) та зворотного (в) процесу газифікації та реакції окислення та відновлення

Рівняння теплового балансу при газифікації палива:

$$Q_m = Q_{ог} + Q_n + Q_{пир} + Q_{газ} + Q_{хим}, \quad (8.2)$$

де Q_m - потужність тепловиділення при згорянні частини палива, що подається в апарат, Дж/кг; $Q_{ог}$ - теплота, що йде на нагрівання димових газів, Дж/кг; Q_n - теплота, що йде на нагрівання незгорілої частини палива, сушки цього палива до нульової

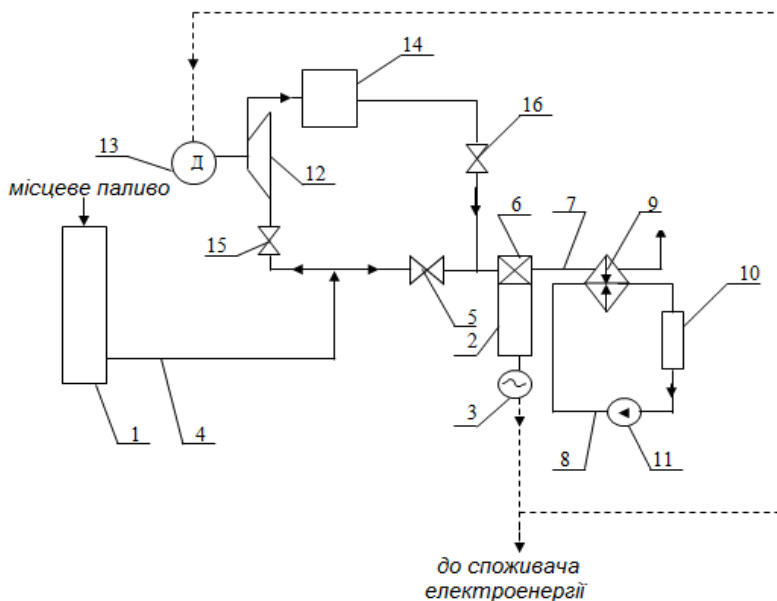
вологості, нагрівання абсолютно сухого палива до температури його термічного розкладання ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$) і нагрівання водяної пари, яка утворюється, до температури газифікації вугільного залишку, Дж/кг; $Q_{\text{нр}}$ – теплота, що йде на нагрівання летючих і напівкоксу (твердого залишку) при термічному розкладанні абсолютно сухої деревини до температури газифікації, Дж/кг; $Q_{\text{газ}}$ – теплота, що йде на нагрівання генераторних газів, що утворюються при газифікації вугільного залишку, Дж/кг; $Q_{\text{хім}}$ – теплота хімічних реакцій термічного розкладання абсолютно сухої деревини і газифікації вугільного залишку, Дж/кг.

Приклад застосування газогенератора у складі автономної КГУ, що живиться синтез-газом, виробленим з твердих рослинних відходів. Для рішення задачі забезпечення автономного енергопостачання промислових, сільськогосподарських, фермерських та інших невеликих підприємств і утилізації відходів рослинної біомаси може бути застосована автономна КГУ з газогенератором, що використовує паливо з твердих рослинних відходів або композитне паливо, схема якої наведена на рисунку 8.3.

Установка працює наступним чином. В газогенератор 1 завантажують тверде місцеве паливо (деревина, торф, відходи сільськогосподарського виробництва, тощо) в якому здійснюється його газифікація. Вироблений генераторний газ по магістралі генераторного газу 4 через відкритий регулюючий вентиль 5 надходить до камери згоряння 6 теплового двигуна 2, в якості якого використовують, наприклад, двигун Стірлінга. При цьому вентилі 15 і 16 знаходяться у закритому стані. В подальшому генераторний газ спалюється в камері згоряння 6 двигуна 2, а його тепла енергія продуктів згоряння використовується для отримання механічної роботи у циклі з наступним перетворенням її в електричну енергію в електричному генераторі 3.

Отриману електроенергію передають споживачеві. Відпрацьовані гази з камери згоряння 6 по магістралі відпрацьованих газів 7 подаються до теплообмінника-утилізатора теплоти відпрацьованих газів 9, де передають свою теплоту теплоносію системи зовнішнього теплопостачання 8. З теплообмінника-утилізатора теплоти відпрацьованих газів 9

гарячий теплоносіє в системі зовнішнього теплопостачання 8 надходить до споживача теплоти 10. Циркуляція теплоносія в системі зовнішнього теплопостачання 8 здійснюється за допомогою насоса 11.



1 – газогенератор, 2 – двигун, 3 – електрогенератор, 4 – магістраль синтез-газу, 5 – регулюючий вентиль, 6 – камера згоряння, 7 – магістраль відпрацьованих газів, 8 – система зовнішнього теплопостачання, 9 – теплообмінник-утилізатор, 10 – споживач теплоти, 11 – циркуляційний насос, 12 – компресор, 13 – електродвигун, 14 – ресивер-акумулятор, 15, 16 – вентилі.

Рисунок 8.3 – Схема автономної КГУ.

В період зменшення споживання електроенергії, коли виробляється надлишкова частина генераторного газу, відкривають вентиль 15 (вентиль 16 закривають) і газ подається за допомогою компресора 12 у ресивер-акумулятор 14, де його накопичують та зберігають цю надлишкову частину. При цьому регулюючий вентиль 5 частково прикривають і частина генераторного газу продовжує надходити до камери згоряння 6 теплового двигуна 2, що

забезпечує вироблення електричної енергії електрогенератором 3. Роботу компресора 12 забезпечує електродвигун 13, який живиться від електрогенератора 3.

В період збільшення споживання електричної енергії, коли в газогенераторі 1 виробляється недостатньо генераторного газу для її виробництва, для збільшення виробництва механічної роботи у тепловому двигуні 2 подають на спалювання в камері згорання 6 збільшену кількість газу, яку утворюють змішуванням газу після газогенератора 1 при закритому вентилі 15 і відкритому регулюючому вентилі 5 та накопиченого генераторного газу у ресивері-акумуляторі 14, що подається на змішування через відкритий в цей час вентиль 16.

Запропонована автономна КГУ в умовах нерівномірного споживання виробленої електричної енергії забезпечує підвищення ефективності її роботи, що обумовлено включенням до її складу компресора, який має привод від електродвигуна та ресивера-акумулятора, внаслідок зменшення витрат місцевого палива та використання газогенератора і супутнього для обробки генераторного газу обладнання меншої продуктивності, ніж необхідно для виробництва газу при максимальних значеннях споживаної електроенергії.

Крім того, запропонована схема автономної КГУ може бути перетворена у тригенераційну, шляхом введення до її складу абсорбційного холодильника. Така установка повинна мати у своєму складі силовий агрегат, в якості якого найчастіше використовується тепловий двигун. Безпосередньо для його живлення використовувати тверде біопаливо неефективно, а в більшості випадків і неможливо. Тому виникає необхідність у газифікації твердого біопалива або композитного палива, що обумовлює застосування у складі КГУ газогенератора.

8.1.2. Застосування біомаси для виробництва біогазу

Виробництво біогазу є перспективною галуззю виробництва біопалива поряд з виробництвом біодизелю та біоетанолу. При чому його виробництво може бути найдешевшим через низьку

собівартість сировини і наявність можливостей побудови біогазових установок у кожному регіоні, якщо виникне така необхідність. Серед усіх поновлюваних енергій біогаз має особливий статус, оскільки він знаходить різноманітне застосування у сферах електроенергетики, виробництва тепла і використовується в якості пального, а також може постійно вироблятися відповідно до потреб на основі наявної місцевої сировини.

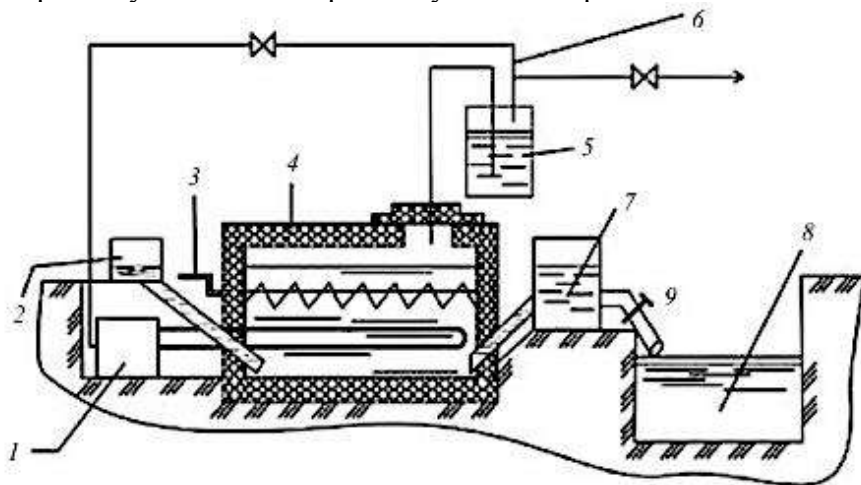
Як сировина для виробництва біогазу може використовуватись будь-який біологічний продукт: органічні добрива (гній, птишиний послід, змив від тварин), відходи землеробства (солома, кукурудзяний силос, бурякове і картопляне бадилля, листя), агропромислові відходи (яблучна та кукурудзяна барда, відходи від виробництва спирту, очистки овочів, фруктів тощо), відходи від забою свійських тварин, а також комунальні біовідходи.

В основі роботи біогазових установок (БГУ) закладені біологічні процеси бродіння та розкладання органічних речовин під впливом метаноутворювальних бактерій в анаеробних умовах, які характеризуються відсутністю вільного кисню, високої вологості і температурного середовища 15 – 20 °С для психрофільних, 30 – 40 °С для мезофільних і 50 – 70 °С для термофільних бактерій. Анаеробне бродіння здійснюється в герметичній ємності – реакторі звичайної циліндричної форми горизонтального або вертикального розташування. Для ефективного бродіння в порожнині реактора необхідно підтримувати постійну температуру відповідно до прийнятого режиму бродіння: мезофільного або термофільного і здійснювати регулярне перемішування зброджуваної сировини.

Найбільш ефективними вважаються біореактори, що працюють у термофільному режимі. На таких установках з триденною ферментацією гною вихід біогазу становить 4,5 л на кожен літр корисного об'єму реактора. У процесі бродіння відбувається виділення біогазу, який містить 40 – 70 % метану, 30 – 60 % вуглекислого газу, близько 1 % сірководню і невелику кількість азоту, водню та аміаку. Об'ємна теплота згоряння біогазу

складає 22 МДж/м³. При спалюванні 1 м³ біогазу можна отримати 1,7 кВт·год електроенергії або 2,5 кВт теплової енергії.

Технологічні схеми БГУ бувають різними, залежно від виду і кількості перероблюваних субстратів, від виду та якості кінцевих цільових продуктів і ряду інших чинників. Найбільш поширеними на сьогоднішній день є схеми з одноступеневим зброджуванням декількох видів субстратів, одним з яких, зазвичай, є гній (рис. 8.4). встановлена система підігріву реактора. Установа може працювати в мезофільному і термофільному режимі. Реактор біогазової установки підігрівається за допомогою водонагрівального котла, який працює на біогазі, що виробляється. Решта біогазу використовується безпосередньо у газових приладах.



1 – водонагрівальний котел; 2 – бункер завантаження; 3 – перемішувальний пристрій; 4 – реактор; 5 – водяний затвор; 6 – відвід біогазу; 7 – вивантажувальний бункер; 8 – ємність для зберігання біодобрих; 9 – вивантажувальна труба

Рисунок 8.4 - Схема біогазової установки з перемішуванням і підігрівом сировини в реакторі.

У випадку технологічної необхідності ефективної переробки окремих видів субстратів і підвищення загальної ефективності використання робочого об'єму біореакторів застосовують дво- або

триступеневі схеми. Для інтенсивного і стабільного процесу зброджування у БГУ.

Рентабельність біогазових установок є низькою. Це пов'язано як з низькою вартістю сировини, так і з неможливістю збільшити ціни на кінцеву продукцію, тимчасом як вартість установок є досить високою. Тому термін окупності капітальних вкладень може досягати 10–20 років. Саме тому виникають проблеми з впровадженням біогазових технологій.

Підвищити рентабельність і знизити термін окупності намагаються різними шляхами, зокрема збільшенням масштабів установки, реалізацією побічних товарних продуктів, спрощенням установки до можливих меж. Кожен із цих шляхів має свої переваги і недоліки. Однак існує ще один шлях підвищення ефективності — використання тепла димових газів, якщо біогаз спалюється на місці для одержання електроенергії, тобто залученням КГУ. Ще однією перевагою біогазових станцій, які споряджені когенераційними установками, є відсутність потреби у газгольдерах, оскільки товарна електроенергія відразу надходить до загальнодержавної електричної мережі.

8.1.3. Рідке біопаливо та його застосування

Серед рідких виді біопалива найбільше застосовуються біоетанол і біодизель. Біоетанол – це етиловий спирт (етанол), який отримують при переробці рослинної сировини, що містить крохмаль, цукор або целюлозу (картопля, цукровий буряк, рис, кукурудза, жито, солома тощо), та використовується як біопаливо для автомобільного транспорту.

Біоетанол відрізняється від алкогольно спирту відсутністю води в складі і скороченим процесом дистиляції. Якщо раніше біоетанол мав вузьке застосування як розчинник палива, то сьогодні це обов'язковий компонент бензину. Введення біоетанолу до складу бензину, дало можливість значно підвищити рівень кисню і зробити більш високим октанове число. Рідше дана речовина застосовується як самостійне паливо.

Розділяють три способи отримання біоетанолу:

- бродіння;
- гідролізне виробництво;
- виробництво з біологічної сировини.

Бродіння здійснюється під дією бактерій і ферментів дріжджів. В результаті отримується розчин з вмістом етанолу не більше 15%, в подальшому його потрібно концентрувати шляхом дистиляції. Виробництво етанолу з біосировини включає три етапи: подрібнення сировини, ферментація та брагоректифікація в спеціальних колонах.

Гідролізне виробництво спирту з целюлози є не рентабельним і у промислово розвинених країнах цей спосіб не використовується.

Біоетанол має ряд переваг: не токсичність, розчинність у воді, не має негативного впливу на навколишнє середовище, безвідходність його виробництва. До недоліків біоетанолу відносять: утворення парафіну при розшаруванні палива під впливом низьких температур та не дуже високі енергетичні властивості.

Біодизель звичайно виробляють з олійних культур (соя, кукурудза, ріпак тощо) та тваринних жирів. Виготовлена з сировини олія і використовується для одержання біодизеля.

Біодизель можна використовувати як суміш з дизельним паливом у сучасних двигунах. Розповсюджена суміш біодизеля з часткою 20% у дизельному паливі (B20). Чистий біодизель (B100) користується попитом у багатьох країнах, особливо у Німеччині.

Деякі недоліки біодизеля не знижують його цінність. Це біопаливо безпечне у використанні, піддається біологічному розпаду. Його застосування сприяє зменшенню викидів вуглеводнів та інших токсичних газів в атмосферу.

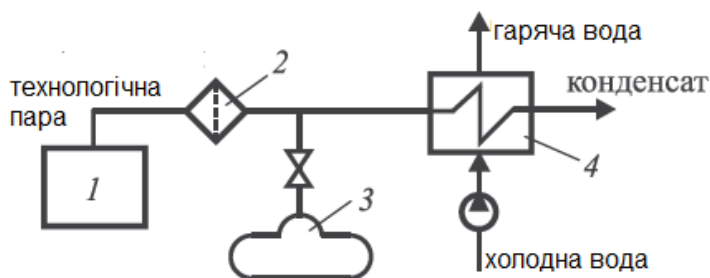
8.2. Використання ВЕР

8.2.1. Використання відпрацьованої пари для теплопостачання

Відпрацьована пара - це пара, що пройшла через технологічне обладнання (наприклад, ковальсько-пресове або автоклав) і має

тиск 0,15-0,25 МПа. У більшості випадків відпрацьований пар має низький тиск, забруднене хімічними і механічними домішками, і при змінних навантаженнях виробничих агрегатів утворюються переривчасті потоки пари. Така пара може використовуватися для теплопостачання, вироблення електроенергії та одночасного вироблення електро- і теплоенергії.

Після механічного очищення від масла та інших домішок відпрацьована пара може використовуватися для покриття різних теплових навантажень (рис. 8.5). При значних коливаннях витрати відпрацьованої пари передбачають установку пароводяних акумуляторів.



1 - технологічний агрегат; 2 - фільтр; 3 - акумулятор;
4 - поверхневий теплообмінник

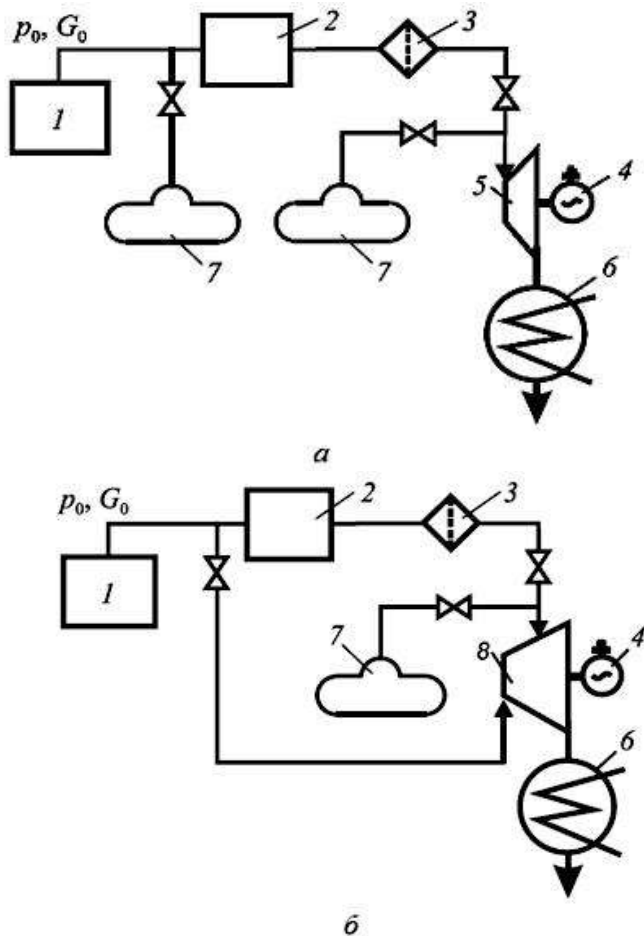
Рисунок 8.5 - Схема використання відпрацьованого пара для підігріву води.

Для економічної роботи теплообмінних апаратів, в яких відбувається конденсація грійної пари, необхідна його повна конденсація. При неповній конденсації грійної пари утворюється небажана пролітна пара, яка призводить до втрати теплоти і збільшення гідравлічного опору теплообмінника.

8.2.2. Використання відпрацьованої пари для вироблення електроенергії

Відпрацьована пара для вироблення електроенергії може використовуватися в турбінах м'ятої пари, в турбінах подвійного

тиску. Установки з турбіною 5 м'ятої пари (рис. 8.6, а) призначені для вироблення електроенергії тільки за рахунок відпрацьованої пари.



1 - котел; 2 - виробничий агрегат; 3 - пароочисник; 4 - генератор;
5 - турбіна м'ятої пари, 6 - конденсатор; 7 - паровий акумулятор; 8 -
турбіна подвійного тиску

Рисунок 8.6 – Схеми використання відпрацьованої пари для вироблення електроенергії: а - з турбіною м'ятої пари, б - з турбіною подвійного тиску.

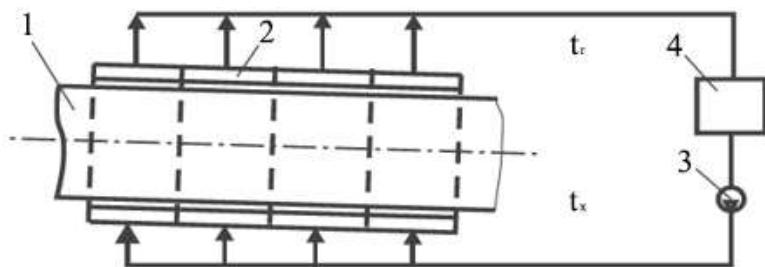
У зв'язку з тим, що можливі перерви у надходженні відпрацьованої пари від виробничого агрегату, теплові акумулятори 7, особливо акумулятор перед виробничим агрегатом, повинні виконуватися зі значною акумулюючою здатністю. Робота установки з турбінами подвійного тиску протікає у більш сприятливих умовах, оскільки в турбіну 8 (рис. 8.6, б) незалежно від роботи виробничого агрегату 2 безперервно надходить свіжа пара від котла 1.

8.2.3 Використання теплоти технологічних продуктів

Утилізацію теплоти технологічного продукту можна здійснювати наступними теплоносіями:

- газом - повітрям;
- рідиною - водою (радіаційним або конвективним способом).

Наприклад, втрати теплоти технологічними агрегатами від випромінювання в навколишнє середовище і зовнішнього охолодження складають 1-25%, тому можна застосувати схему використання теплоти, що випромінюється корпусом установки. Приклад такого агрегату з цементною піччю, що обертається, показана на рисунку 8.7.



1 - корпус обертової печі; 2 – кільцеподібні екрановані теплообмінники;
3 - насос; 4 - споживачі теплоти

Рисунок 8.7 - Схема використання теплоти випромінювання і зовнішнього охолодження.

гідравлічного опору за допомогою регулятора 13 на три секції 9. В кожній з них знаходиться підігрівач біомаси 3. Ковпак 2 встановлений з можливістю руху по напрямних 10 і містить труби споживача 6, які сполучені з кожною секцією 9. Також кожна секція 9 резервуару 1 має оглядові вікна 11. Ємність 5 із заслінкою 7 для збору біодобрих знаходиться в нижній частині резервуара 1.

Пластина-активатор 14 знаходиться в першій секції резервуару 1 та кінематично зв'язана зі штоком 17 підпружиненого гідроциліндра 18. Робоча камера гідроциліндра сполучена із напірною магістраллю 19 гідронасоса 16, до якої приєднаний імпульсний клапан-пульсатор 15. Крім того установка містить мережу ізольованих трубопроводів циркуляції теплоносія, яка складається з контуру подачі тепла 27 та контуру відбору тепла 28. В контурах 27 та 28 знаходиться циркуляційний насос 22, запірно-регульовальна арматура 20, спускник 21 і повітроспускник 23. Бак-аккумулятор 25 містить два теплообмінники, перший теплообмінник 24, розміщений у контурі відбору тепла 27 і містить підігрівач біомаси 3 та другий теплообмінник 26, що розмішений у контурі подачі тепла 28 містить в собі тепловий насос 31, геліоколектор 30 та термометр-манометр 29.

Біогазова установка працює таким чином. При завантаженні біомаси в резервуар 1 через шахти завантаження біомаси 12 подачу регулюють заслінками 8. Біомаса опиняється в першій секції 9 резервуару 1, де вона нагрівається підігрівачем 3 і проходить першу стадію бродіння. Після нагрівання за рахунок зміни гідравлічного опору колосникових решіток 4 за допомогою регулятора 13 біомаса опиняється в другій секції 9, де проходить другу стадію бродіння. В першу секцію 9 завантажується нова порція біомаси. Отриманий біогаз відводиться трубами споживача 6. Третю стадію бродіння біомаса проходить в третій секції 9 резервуара 1. Після завершення бродіння в третій секції біомаса потрапляє в ємність збору біодобрих 5, завантаження якої регулюється заслінкою 7. Процеси бродіння візуально оцінюють за допомогою оглядових вікон 11. При необхідності відкрити резервуар 1 ковпак 2 рухається по напрямних 10 і знімається. Регуляція гідравлічного опору провальних колосникових решіток відбувається регулятором 13.

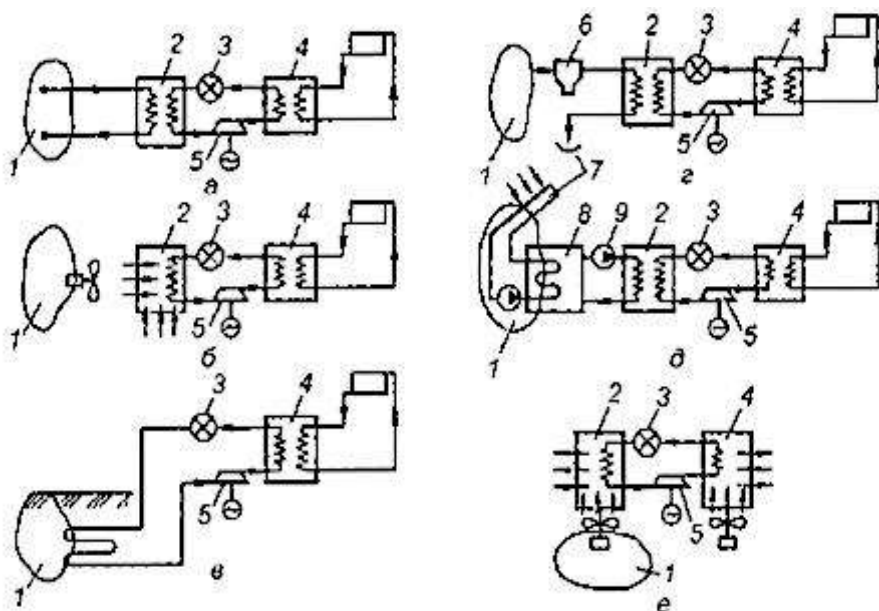
Гідронасос 16 з імпульсним клапаном-пульсатором 15 вимушують здійснювати коливальні рухи шток 17 підпружиненого гідроциліндра 18, що в свою чергу приводить у рух пластину-активатор 14. Робоча камера підпружиненого гідроциліндра 18 гідравлічно сполучена із напірною магістраллю 19 гідронасоса 16. Імпульсні коливання суміші дозволяють більш активно перемішуватись субстрату. Також, за рахунок омивання поверхні підігрівача 7 біомаси, інтенсифікується тепловіддача від стінки нагрівального елементу до середовища, причому прогрів буде рівномірним, за рахунок активного перемішування. Пульсація рідини сприяє біогазу більш легко прориватися крізь суміш та відбиратися через труби споживача 6. Підігрівач біомаси 3 виконує свої функції за рахунок тепла, що акумулюється у баці-акумуляторі 25 через теплообмінник відбору тепла 24. Він розміщений у контурі відбору тепла 28, в якому перенесення теплоносія здійснюється циркуляційним насосом 22. У контурі відбору тепла 28 циркуляційний насос 22 виконує функцію перенесення теплоносія від теплового насоса 31 чи геліоколектора 30 до теплообмінника подачі тепла 26, який віддає тепло в бак акумулятор 25. В денний час генерація тепла проходить у геліоколекторі 30 за рахунок сонця і акумулюється в бак акумулятор 25. Коли використання геліоколектора 30 стає не вигідним, то процес генерації тепла продовжується в тепловому насосі 31, за рахунок зміни напрямку руху теплоносія за допомогою запірнорегулювальної арматури 20, переважно в нічний час. При заповненні і спорожненні системи використовують повітроспускник 23 для видалення повітря та спускник теплоносія 21 для видалення теплоносія. Термометр-манометр 29 необхідний для візуального контролю температури та тиску теплоносія в первинному контурі.

Схеми теплопостачання з компресійними ТН, що використовують низькопотенціальну теплоту навколишнього середовища, показані на рисунку 8.9.

Для теплопостачання окремих насосних станцій зазвичай використовують перетворення електричної енергії в теплову за допомогою калориферів чи різних теплоелектронагрівачів (тенів). Сумарна потужність їх обмежена 30 кВт. Це викликає значні

труднощі для забезпечення необхідних розрахункових температур повітря усередині насосних станцій.

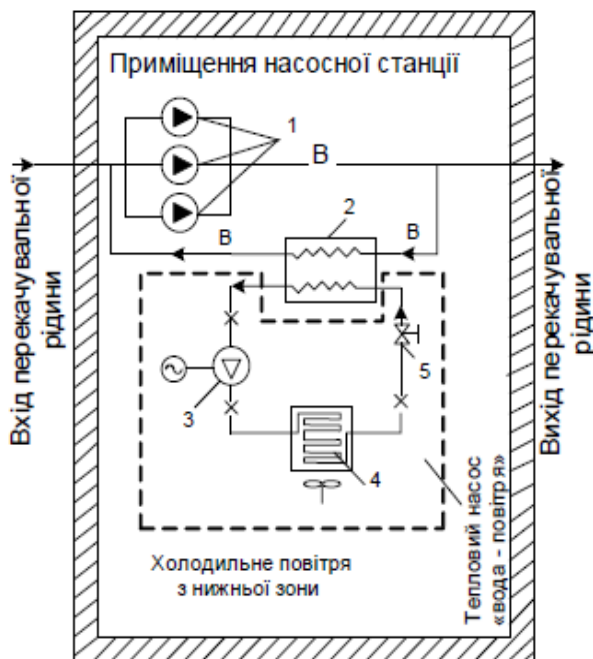
Для економії електроенергії пропонується застосовувати теплові насоси типу "вода - повітря". У насосних станціях джерелом низькопотенційної теплоти може служити рідина, що перекачується, а теплоносієм, який нагрівається - повітря станції. У цьому разі тепловий насос повинен знаходитись безпосередньо в насосній станції.



1 – низькопотенціальне джерело теплоти; 2 – випарник; 3 – регулюючий вентиль; 4 – конденсатор; 5 – компресор; 6 – відстійник; 7 – геолоприймач; 8 – акумулятор; 9 – насос

Рисунок 8.9 - Принципові схеми ТН, що використовують джерела низькопотенційної теплової енергії: а – води (водоєм рік, озер, морів); б – повітря, що скидається; в – підземні води; г – стічні господарські води; д – сонячна радіація; е – повітря, що скидається.

Принципова схема опалення водопровідної насосної станції за допомогою теплового насоса типу "вода - повітря" наведена на рис. 8.10. Частина води, що перекачується насосами 1, подається на випарник 2, де вона охолоджується за рахунок теплообміну з робочим тілом теплового насоса, випаровуючи його. Охолоджена вода повертається назад у мережу.



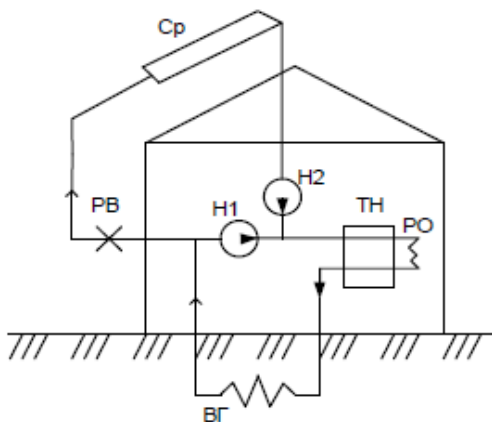
1- технологічні насоси; 2 – випарник; 3 – компресор; 4 – повітряний конденсатор з вбудованим вентилятором; 5- дросель; В – вода; Х – холодоагент (хладон-12), (пунктиром показана заводська поставка).

Рисунок 8.10 – Принципова схема опалювання насосної станції за допомогою теплового насоса «вода - повітря».

Пари робочого тіла, що утворилися (хладон-12), з випарника 2 відсмоктуються компресором 3 і стискаються ним до тиску, обумовленого температурою вхідного в конденсатор 4 повітря, де відбувається його нагрівання за рахунок теплоти конденсації

робочої речовини. Конденсат робочої речовини через дросель 5 подається знову у випарник 2 і цикл повторюється. Витрата електроенергії на прокачування води через випарник незначна. Для одержання теплової потужності 10 кВт насосу досить перекачати через випарник приблизно 2,5 м/год води, що складає приблизно менше 1 % обсягу прокачуваної води.

Схема одержання теплової енергії теплонасосною установкою з одночасним використанням теплоти ґрунту і Сонця показана на рисунку 8.11.



ТН – тепловий насос; ВГ – випарник ґрунту; Ср- сонячний радіатор; Н1 і Н2 – циркуляційні насоси; РО – радіатори опалювання; РВ – регульований вентиль для відключення сонячного радіатору

Рисунок 8.11 – Схема одержання теплової енергії теплонасосною установкою з використанням теплоти ґрунту і Сонця.

8.4. Використання енергії надлишкового тиску природного газу

Для промислових підприємств найбільш характерним ВЕР надлишкового тиску є газ або пара з тиском, що перевищує атмосферний. При цьому можливі наступні варіанти проблем, що обмежують можливість використання газу для технологічних потреб:

- тиск газу більше необхідного;
- тиск газу менше необхідного.

У першому варіанті потенційна енергія надлишкового тиску може використовуватися системами перетворення енергії тиску:

- турбінами (перетворення потенційної енергії тиску в механічну);
- вихровими трубами (перетворення потенційної енергії тиску в теплову);

- хвильовими детандер-компресорами (передача потенціальної енергії тиску від одного середовища до іншого).

У другому варіанті можуть застосовуватися пристрої підвищення тиску газу.

Виробництво холоду за рахунок дроселювання тиску природного газу

Природний газ надходить по магістральним трубопроводам високого тиску на газорозподільчі станції (ГРС), де його тиск редуцуються до середніх параметрів; газ середнього тиску в подальшому надходить на установки споживачів і його тиск знижується до низького. Зниження тиску газу відбувається у редуційних клапанах і є прямою втратою потенціальної енергії потоку.

Відомо, що у повітряних холодильних установках при застосуванні компресора-розширювача використовується ефект зниження температури повітря при його розширенні зі зниженням тиску. У системах газопостачання тиск природного газу після регулювальних пристроїв зменшується з відповідним зниженням температури, яка досягає величини:

$$Q_x = G_z \cdot c_z (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}). \quad (8.3)$$

де T_n, T_k – початкова і кінцева температури;

P_n, P_k – початковий і кінцевий тиски газу.

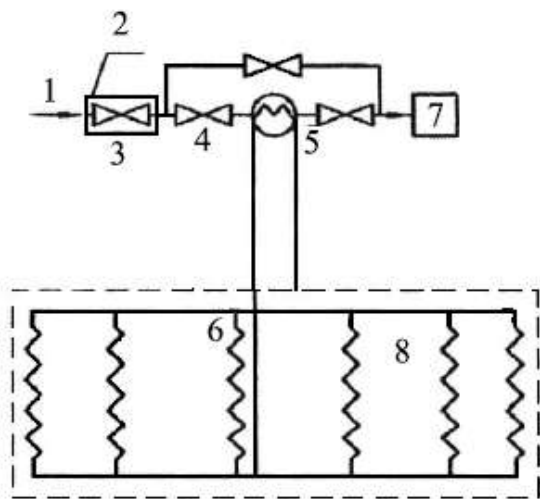
При дроселюванні потоку стиснутого газу на регулюючих пристроях його енергія не використовується. Подача охолодженого газу в енергетичні установки на спалювання знижує їх ефективність використання. Тому природний газ потребує попереднього підігріву

або змішування його з підігрітим повітрям, що при цьому втрачається як потенціальна енергія тиску, так і теплова енергія потоку.

Одночасно багато промислових підприємств мають потребу в енергії холоду (підприємства переробки сільськогосподарської сировини, харчові підприємства тощо), які для його виробництва використовують спеціальні холодильні установки, в яких висока собівартість холоду.

При наявності на підприємстві газорегуляторного пункту (ГРП), потребу у холоді або його частини можна вирішити за рахунок зниження температури газу при його дроселюванні.

На рисунку 8.12 представлена схема одержання холоду при використанні дроселювання природного газу у газопроводах.



1 – газопровід; 2 – ГРП; 3, 5 – регулюючі клапани; 4 – теплообмінник; 6 – вентилятор; 7 – пальники; 8 – споживач

Рисунок 8.12 – Схема одержання холоду при дроселюванні природного газу.

Природний газ з тиском приблизно 1,0 МПа по газопроводу 1 надходить на ГРП 2, де на регулюючих клапанах 3, 5 дроселюється до тиску 0,1 МПа зі зниженням його температури. Охолоджений газ

проходить через теплообмінник 4, охолоджуючи повітря, яке подається вентилятором 6. Після теплообмінника підігрітий газ направляється на пальники 7, що підвищує економічність технологічного процесу, а охолоджене повітря по повітропроводах подається до споживача.

Кількість одержаного холоду залежить від кількості газу і температурних рівнів:

$$Q_x = G_z \cdot c_z (t_{вх} - t_{ex}). \quad (8.4)$$

Як холодоносії можуть бути застосовані різні речовини, наприклад, повітря, розсіл тощо.

Виробництво електричної енергії за рахунок надлишкового тиску природного газу

Застосування детандер-генераторних агрегатів замість звичайних дросельованих пристроїв дозволяє виробляти електроенергію за рахунок використання надлишкового тиску природного газу. Детандер-генераторний агрегат включає детандер, генератор, теплообмінне обладнання, системи контролю і регулювання параметрів роботи. У детандері енергія газового потоку перетворюється в механічну роботу. Тиск і температура газу при цьому знижуються. Механічна енергія може бути перетворена в електричну в приєднаному до детандер генераторі.

Одночасно при адіабатному розширенні газу з віддачею зовнішньої роботи істотно знижується температура робочого тіла, величина цього зниження визначається відношенням тисків на вході і виході розширювальної машини (детандера).

Розрахунки показують, що при зниженні тиску газу з 1,2 до 0,3 МПа температура його знижується на 50-60 °С (в залежності від складу газу і ефективності детандера). При збільшенні ступені зниження тиску до 6 (від 1,8 до 0,3 МПа) різниця температур зростає до 70-80 °С. Якщо прийняти, що температура газу на вході в машину дорівнює 20 °С, температура потоку після розширення складе – 30...40 °С в першому і – 50...60 °С у другому випадках. Таким чином, в результаті зниження тиску природного газу у детандері

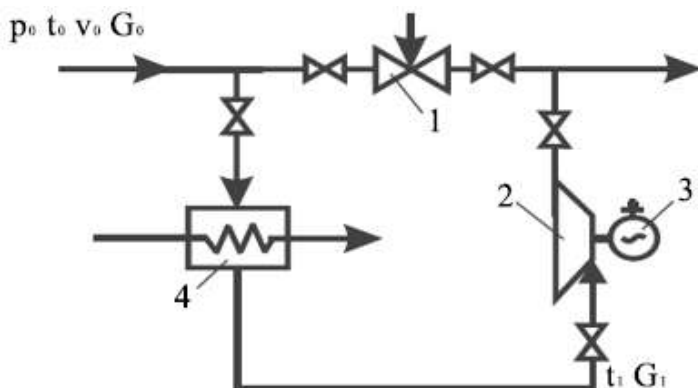
може утворитися конденсат, що призведе до погіршення ефективності роботи і швидкому зносу традиційних детандерів на основі газових турбін.

Дану проблему можна вирішити двома способами:

1) забезпечити попередній підігрів природного газу до таких температур, щоб після його розширення виключити випадіння конденсату;

2) використовувати розширювальні машини (детандери), які забезпечать ефективну і надійну роботу в даних умовах.

Схема використання надлишкового тиску природного газу з попереднім підігрівом представлена на рисунку 8.13.



1 - редуктор тиску ГРС; 2 - турбодетандер; 3 - електрогенератор; 4 - теплообмінник

Рисунок 8.13 - Принципова схема детандер-генераторної установки з попереднім підігрівом.

Природний газ з газопроводу високого тиску проходить через регульований клапан, підігрівач 4 і розширюється в турбіні 2. Віддавши свою енергію турбіні 2, газ через газопровід низького тиску надходить до споживача. Потужність турбіни передається генератору 3, що виробляє електричний струм.

Природний газ нагрівається у підігрівачі 4 для запобігання випадіння з нього води і важких фракцій (гідратів, пропану, бутану і т. п.), що може привести до зниження надійності турбіни.

Для цього необхідно, щоб температура газу за турбіною становила не менше $+ 5^{\circ}\text{C}$. Крім того, необхідно, щоб вона не перевищувала допустиму температуру, що гарантує надійну роботу теплоізоляційного і антикорозійного покриття газопроводу (не більше $+ 40^{\circ}\text{C}$). Підігрів газу підвищує його внутрішню енергію і, тим самим, потужність турбодетандера та його ККД. Підігрів газу від 0°C до $+ 80^{\circ}\text{C}$ підвищує потужність турбодетандера на 30-35%.

Контрольні питання

1. Які види енергії одержують від відновлюваних джерел?
2. Які особливості відновлюваних джерел енергії у порівнянні з традиційними невідновлюваними?
3. Наведіть приклад використання теплових ВЕР.
4. Які основні напрями перетворення і використання сонячної енергії у геліоенергетиці?
5. Опишіть способи використання сонячної енергії для вироблення електроенергії.
7. Вітроенергетичні установки: класифікація, основні напрями використання вітрової енергії.
9. Назвіть відомі енергетичні способи переробки та використання біомаси.
10. Перелічіть біохімічні та термохімічні методи переробки біомаси.
11. Зобразіть схему промислового газогенератора.
12. Як забезпечується виробництво холоду за рахунок дреслювання тиску природного газу.
13. Як забезпечується виробництво електричної енергії за рахунок надлишкового тиску природного газу.

Список літератури

1. Бельский А.П., Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. Учебное пособие. – СПб.: СПб ГТУРП, 2012. – 136 с.
2. Герасимов Г.Г., Енергоощадність в теплоенергетиці. Навчальний посібник. Рівне: Червінко А.В., 2015. – 382 с.
3. Данилов О.Л., Мунц В.А. Использование вторичных энергетических ресурсов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 154 с.
4. Данилов О.Л. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях, М.: МЭИ, 2004. – 206 с.
5. Дахин С.В. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. Учебн. пособие. – Воронеж, ГОУ ВПО Воронеж. Гос. ун-т. 2010. – 182 с.
6. Драганов Б.Х. та ін. Теплотехніка: Підручник. – Київ: «ІНКОС», 2005. – 504 с.
7. Клименко В.В., Кравченко В.І., Боков В.М., Гуцул В.І. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів: Монографія. / За ред. В.В. Клименка – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. – 162 с.
8. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 984 с.
9. Маляренко В.А. Енергетичні установки. Навчальний посібник. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 287 с.
10. Мунц В.А. Энергосбережение в энергетике и теплотехнологиях: конспект лекций. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 136 с.
11. Озарків І.М., Мисак Й.С., Копинець З.П. Використання сонячної енергії у промисловості: Навчальний посібник. – Львів: НВФ «Українські технології», 2007. – 276 с.
12. Ольшанский А.И. Основы энергосбережения: курс лекций / А.И. Ольшанский, В.И. Ольшанский, Н.В. Беляков. – Витебск: УО «ВГТУ», 2007. – 223 с.

13. Самойлов М.В. Основы энергосбережения: Учеб. пособие / М.В. Самойлов, В.В. Паневчик, А.Н. Ковалев. – Минск: БГЕУ, 2002. – 198 с.
14. Самохвалов В.С. Вторинні енергетичні ресурси та енергозбереження. – Київ: Центр учбової літератури, 2008. – 224 с.
15. Титко Р., Калініченко В. Відновлювальні джерела енергії. – Варшава-Краків-Полтава, 2010. – 533 с.
16. Ткаченко О.О. Високотемпературні процеси та установки: Підруч. – К.; А.С.К., 2005. – 480 с.
17. Фокин В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита – М.: Машиностроение – 1, 2006. – 256 с.
18. Толбатов В.А., Лебединський І.Л., Толбатов А.В. Організація систем енергозбереження на промислових підприємствах. Навчальний посібник. - Суми : Вид-во СумДУ, 2009.

ДОДАТОК

**НОРМИ ПИТОМИХ ВИТРАТ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ
РЕСУРСІВ ТА ВИРОБНИЦТВО ПРОДУКЦІЇ**

Типовий склад питомих витрат палива, електричної та теплової енергії [18]

Технологічна: Витрати палива, теплової або електричної енергії на виконання технологічних процесів, передбачаючи витрати на підтримку технологічних агрегатів у гарячому резерві, на розігріві і пуски після поточних ремонтів і холодних простоїв.

Загальновиробнича цехова:

1. Витрати теплової або електричної енергії, що входять до складу технологічних норм.

2. Витрати теплової або електричної енергії на допоміжні потреби цеху: опалення; вентиляцію; освітлення; внутрішньо-цеховий транспорт; цехові ремонтні майстерні; господарсько-побутові і санітарно-гігієнічні потреби цеху (душові, умивальники та ін.).

3. Технічно неминучі втрати енергії у внутрішніх цехових мережах і перетворювачах.

Загальновиробнича заводська:

1. Витрати теплової або електричної енергії, що входять до складу загальновиробничих цехових норм.

2. Загальні для підприємства витрати теплової або електричної енергії на водопостачання, виробництво стисненого повітря, холоду та ін.; виробничі потреби допоміжних підрозділів та служб (ремонтні, інструментальні цехи, майстерні, лабораторії, склади та ін.), передбачаючи освітлення, вентиляцію, опалення; транспорт; зовнішнє освітлення території підприємства.

3. Технічно неминучі втрати енергії в загальнозаводських теплових або електричних мережах і перетворювачах (до цехових пунктів обліку).

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НОРМ ПИТОМИХ ВИТРАТ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Визначення розрахункових витрат теплової енергії [18]

Витрати теплової енергії на технологічний процес електролізу

Теплова енергія в процесі електролізу використовується для нагрівання до необхідної температури водного розчину в електролізних ваннах.

Годинну витрату теплової енергії на процес нагрівання електролізного розчину, Мкал, в загальному випадку можна розрахувати на підставі залежності:

$$q = F_{т.об} \frac{\frac{t_{парі} - t_{ел.розч}}{I} + \frac{I}{\alpha_{ел.розч}}}{\alpha_{парі}} \cdot 0,86, \quad (1)$$

де $F_{т.об}$ – площа поверхні теплообміну (теплообмінника), м²;
 $t_{парі}$, $t_{ел.розч}$ – температура пари та електролітичного розчину, °С;
 $\alpha_{ел.розч}$, $\alpha_{парі}$ – коефіцієнт тепловіддачі пари та електролізного розчину, Вт/(м²·К); 0,86 – коефіцієнт перерахунку потужності, вираженої у ватах, ккал/год.

Річні витрати теплової енергії на технологічний процес електролізу розраховуються за формулою

$$Q_{тех} = q \cdot T_{роб} \cdot 10^{-6} \text{ Гкал/рік}, \quad (2)$$

де $T_{роб}$ – тривалість роботи електролізних ванн протягом року, год./рік.

За відсутності вихідних даних, необхідних для виконання розрахунку за формулами (1, 2), витрати теплової енергії на

нагрівання електролізного розчину в ваннах можна визначити, виходячи з паспортної (або визначеної експериментальним шляхом) годинної витрати пари на нагрівання електролізного розчину, на підставі залежності:

$$Q_{техн} = G_{т.об} \cdot n_{т.об} \cdot T_{роб} \text{ Гкал/рік}, \quad (8.27)$$

де $G_{т.об}$ – годинне споживання пари теплообмінником, виражене в одиницях теплової енергії, виходячи з параметрів пари, Гкал/год; $n_{т.об}$ $n_{тепл}$ – кількість теплообмінників, одиницях; $T_{роб}$ – річна тривалість роботи електролізних ванн, год.

Втрати теплової енергії в мережах

Додаткові витрати теплової енергії, Гкал, на компенсацію її втрат при транспортуванні теплоносіїв в теплових мережах визначаються за формулою:

$$Q_m = \frac{q_m \cdot (t_{cm} - t_z) \cdot T \cdot L_m}{10^6}, \quad (3)$$

де q_m – питомі втрати тепла на один метр довжини теплопроводу, ккал/(м·год·°С); t_{cm} – температура зовнішньої стінки теплопроводу, °С; t_z – температура зовнішнього середовища, °С; L_m – наведена довжина теплопроводу, м; T – тривалість роботи теплопроводу протягом відповідного календарного періоду, год.

Питомі втрати тепла на один метр довжини теплопроводу (q_m) визначаються на підставі відповідних нормативно-довідкових даних. Величина питомих втрат теплової енергії залежить від виду теплової мережі (внутрішня чи зовнішня), від виду та параметрів теплоносія (пара чи гаряча вода), від параметрів ізоляції та способу прокладання теплопроводу тощо.

Наведена довжина теплопроводу (L_m), м, розраховується за формулою

$$L_m = L + \sum_{i=1}^n (L_{ek} \cdot m_i), \quad (4)$$

де L – геометрична довжина теплопроводу (за проектом або за результатами вимірювань), м; L_{ek} – еквівалентна довжина додаткових опорів теплопроводу окремо для кожного (і-го) їх виду (фланців, вентилів, засувки тощо), м; m_i – кількість одиниць опору і-го виду.

У разі відсутності точних даних щодо теплових мереж підприємства втрати теплової енергії в цих мережах можуть бути визначені збільшено залежно від загального обсягу споживання теплової енергії на підприємстві. При цьому розмір втрат теплової енергії у відсотках від загального обсягу її споживання береться на підставі відповідних нормативно-довідкових даних.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НОРМ ПИТОМИХ ВИТРАТ ПАЛИВА (ПРИРОДНОГО ГАЗУ)

Визначення розрахункових витрат палива

Витрати палива плавильними печами

Годинну витрату палива (природного газу), Мкал, на виплавку металу у плавильній печі загальному випадку можна розрахувати на підставі залежності:

$$q = F_{m.об} \cdot \alpha \cdot (t_{n.г} - t_{розпл}) \cdot \frac{0,86}{8125}, \quad (5)$$

де $F_{m.об}$ – площа поверхні теплообміну (дзеркало печі), м²;
 $t_{n.г}$, $t_{розпл}$ – температура відповідно пічних газів та розплавленого металу, К; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); 0,86 – коефіцієнт

перерахунку потужності, вираженої у ватах, ккал/год; 8125 – теплотворна спроможність природного газу, ккал/м³.

Річні витрати палива у плавильній печі при цьому розраховуються за формулою

$$G_{ніч} = q \cdot T_{роб.ніч} \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

де $T_{роб.ніч}$ – тривалість роботи плавильної печі протягом року, год/рік.

За відсутності вихідних даних, необхідних для виконання розрахунку за формулою (8.38), витрати палива у плавильній печі можуть бути визначені виходячи з середньої годинної витрати природного газу, зафіксованої при проведенні регламентних випробувань печі зазначеної її режимній карті. У цьому випадку розрахункова річна витрата палива, м³/рік, плавильною піччю обчислюється за формулою :

$$G_{ніч} = g_{ніч} \cdot T_{роб.ніч}, \quad (7)$$

де $g_{ніч}$ – середня годинна витрата природного газу згідно з режимною картою печі, м³/год; $T_{роб.ніч}$ – тривалість роботи печі за рік, год.

Витрати палива термічними і нагрівальними печами

Годинну витрату палива (природного газу), Мкал, на виплавку металу у термопечах і нагрівальних печах у загальному випадку можна розрахувати на підставі залежності:

$$q = F_{m.об} \cdot \alpha \cdot (t_{n.г} - t_{заг}) \cdot \frac{0,86}{8125}; \quad (7)$$

де $F_{т.об}$ – площа поверхні теплообміну, $м^2$; $t_{н.г}$, $t_{заг}$ – температура відповідно пічних газів та нагрівальних заготовок, $К$; α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/(м^2 \cdot К)$; 0,86 – коефіцієнт перерахунку потужності, вираженої у ватах, $ккал/год$; 8125 – теплотворна спроможність природного газу, $ккал/м^3$.

Річні витрати палива, $тис. м^3/рік$, у термопечі і нагрівальній печі розраховуються за формулою:

$$G_{ніч} = q \cdot T_{роб.ніч} \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

де $T_{роб.ніч}$ – тривалість роботи термопечі або нагрівальної печі протягом року, $год./рік$.

За відсутності вихідних даних, необхідних для виконання розрахунку за формулою (7), витрати палива у термопечі і нагрівальній печі можуть бути визначені виходячи з середньої годинної витрати природного газу, зафіксованої при проведенні регламентних випробувань термопечі і нагрівальної печі, зазначеної в її режимній карті. У цьому випадку розрахункова річна витрата палива, $м^3/рік$, у термопечі і нагрівальній печі обчислюється за формулою:

$$G_{ніч} = g_{ніч} \cdot T_{роб.ніч}. \quad (9)$$

де $g_{ніч}$ – середня годинна витрата природного газу згідно з режимною картою термопечі і нагрівальної печі, $м^3/год$; $T_{роб.ніч}$ – тривалість роботи термопечі і нагрівальної печі за рік, $год$.

Витрати палива котельними установками

Річна кількість умовного палива, $т$, необхідного для виробництва на котельній заданої кількості теплової енергії, розраховується на підставі залежності:

$$B_{\text{кот}} = \frac{Q_{\text{відп}} \cdot k \cdot b_{\text{відп}}}{1000}, \quad (10)$$

де $b_{\text{відп}}$ – норма витрати умовного палива на 1 Гкал відпущеної теплової енергії, кг ум.п./Гкал; k – коефіцієнт, який враховує відхилення (погіршення) показників роботи котельної, викликане зниженням якості палива (для котельних установок, які працюють на природному газі, $k = 1$); $Q_{\text{відп}}$ – кількість теплової енергії, яка має бути відпущена протягом року (сума розрахункових витрат теплової енергії для всіх установок, агрегатів та систем підприємства, що отримують її від котельної, з урахуванням втрат теплової енергії в зовнішніх та внутрішніх мережах теплопостачання), Гкал/рік.

Норма витрати умовного палива, кг у.п./Гкал, на виробництво одиниці теплової енергії визначається з формули

$$b_{\text{відп}} = \frac{142,8}{\eta_{\text{к}}^{\text{нетто}}}, \quad (11)$$

де $\eta_{\text{к}}^{\text{нетто}}$ – ККД котельної нетто (тобто, з урахуванням витрат та втрат теплової енергії на власні потреби котельної), відносних одиницях.

ККД котельної нетто обчислюється за формулою:

$$\eta_{\text{к}}^{\text{нетто}} = (\eta_{\text{к}}^{\text{бp}})_{\text{cp}} \cdot (1 - k_{\text{вп}}), \quad (12)$$

де $(\eta_{\text{к}}^{\text{бp}})_{\text{cp}}$ – середнє значення ККД котельної бруто у розрахунковому режимі у відносних одиницях; $k_{\text{вп}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати та втрати теплової енергії на власні потреби котельної.

Значення $(\eta_{\text{к}}^{\text{бp}})_{\text{cp}}$ для групи котельних установок визначається на підставі залежності

$$(\eta_{\kappa}^{\bar{p}})_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\kappa}^{cp} \cdot \eta_{\kappa}^{\bar{p}} \cdot \tau_{\kappa})_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{\kappa}^{cp} \cdot \tau_{\kappa})_i}, \quad (13)$$

де $(Q_{\kappa}^{cp})_i$ – середня продуктивність і-го котла, запланована на відповідний календарний період, Гкал/год; $(\eta_{\kappa}^{\bar{p}})_i$ – ККД і-го котла бруто у розрахунковому режимі у відносних одиницях; $(\tau_{\kappa})_i$ – тривалість роботи і-го котла протягом відповідного календарного періоду, год.

Коефіцієнт k_{en} , що враховує витрати та втрати теплової енергії на власні потреби котельної, визначається за формулою:

$$k_{en} = \frac{\sum_{i=1}^n (b_{en})_i}{b_{\kappa}^e}, \quad (14)$$

де $\sum_{i=1}^n (b_{en})_i$ – сума окремих елементів нормативних витрат палива на власні потреби котельної, кг ум.п./Гкал, яка в загальному випадку вміщує: $b_{prod}, b_{dut}, b_{for}, b_{obd}, b_{roz}, b_{in}$ – відповідно, питомі витрати палива на продув котлів, парове дуття та розпалювання палива, на обдув поверхонь нагріву котлоагрегатів, на розпалювання котлів та інші господарські потреби котельної, кг ум.п./Гкал;

b_{κ}^e – питома витрата палива, що споживається у котельній, кг ум.п./Гкал, яка, у свою чергу, обчислюється на підставі залежності:

$$b_{\kappa}^e = \frac{142,8}{(\eta_{\kappa}^{\bar{p}})_{cp}}, \quad (15)$$

Для котельної, у якій встановлені котли різних типів, норму витрати палива необхідно розраховувати окремо для кожного з типів котлів.

Інші господарські потреби котельної в загальному випадку передбачаючи

- витрату теплової енергії на підтримання в гарячому резерві парових живильних насосів та на щозмінну перевірку їх готовності до роботи;
- випромінювання теплової енергії поверхнями внутрішніх трубопроводів котельної, насосів, баків і т.ін.;
- витрату теплової енергії на випробування запобіжних клапанів, втрати теплової енергії з різними витіканнями, випаровуваннями, а також втрати, які виникають в процесі ремонту обладнання;
- витрату теплової енергії на опалення службових приміщень котельної та витрату теплової енергії на власне гаряче водопостачання (умивальники, душові).

Питома витрата палива, кг ум.п./Гкал, на інші господарські потреби котельної обчислюється за формулою:

$$b_{in} = \frac{1,428}{(\eta_{\kappa}^{op})_{cp}}. \quad (16)$$

Якщо котельна має власний склад рідкого палива та витрачає теплову енергію на розігрів та зливання нафтопродуктів (Q_3), кг ум.п./Гкал то до суми питомих витрат палива на власні потреби котельної додається величина

$$b_3 = 0,014 \cdot \frac{Q_3}{(\eta_{\kappa}^{op})_{cp} \cdot Q_{відп}}, \quad (17)$$

Середню для котельної норму витрати, кг ум.п./Гкал, умовного палива на виробництво теплової енергії визначають як середню зважену величину:

$$(b_{\text{вiдн}})_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n (b_{\text{вiдн}} \cdot Q_n)_i}{\sum_{i=1}^n (Q_n)_i}, \quad (18)$$

де $(b_{\text{вiдн}})_i$ – норма витрати палива для і-го котла з урахуванням витрати на власні потреби, кг ум.п./Гкал; $(Q_n)_i$ – продуктивність і-го котла протягом відповідного календарного періоду, Гкал/год.

Виробництво теплової енергії на котельній

Норми питомої витрати палива на виробництво теплової енергії на котельній підприємства за своєю природою є технологічними.

Розрахунок технологічних норм питомої витрати палива на виробництво теплової енергії на котельній виконано відповідно до методики, наведеної раніше.

Приклад для розрахунку вихідних даних подано у таблиці 1.

Таблиця 1 - Вихідні дані для розрахунку норм питомої витрати палива на виробництво теплової енергії на котельній підприємства

№ пор.	Показник		Одиниця вимірювання	Значення	
				марка	кількість
1	Кількість і тип котлів	Парових	шт.	Е-1,0/0,9Г	2
		Водяних	шт.	ВК-21	2
2	Встановлена потужність котла	Парового	Гкал/год	Е-1,0/0,9Г	0,65
		Водяного	Гкал/год	ВК-21	1,89
3	Паспортні параметри теплоносія, що має вироблятися котлами	Тиск	МПа	Е-1,0/0,9Г	1,0
		Температура	°С		
		Тиск	МПа	ВК-21	0,6

продовження таблиці 1.

		Температура	$^{\circ}\text{C}$	ВК-21	115 $^{\circ}\text{C}$
4	Фактичні параметри свіжої пари	Тиск	МПа	Е-1,0/0,9Г	0,6
		Температура	$^{\circ}\text{C}$	Е-1,0/0,9Г	160
5	Марка палива	Природний газ	%		100
6	Нижча робоча теплота спалювання, $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$		ккал/м^3		8125
7	Кількість годин роботи котельної в 2007 р.		год		8760
	У тому числі:			Е-1,0/0,9Г	8760
				ВК-21	4176
8	Номінальний ККД котлів бруто	$\eta_{\text{к1}}^{\text{бр}}$	%	Е-1,0/0,9Г	90,03
		$\eta_{\text{к2}}^{\text{бр}}$	%	ВК-21	92,0
9	Рік пуску котлоагрегату до роботи		рік	Е-1,0/0,9Г	2003
				ВК-21	2003
10	Рік останнього режимного налагодження		рік	Е-1,0/0,9Г	2003
				ВК-21	2003
11	Наявність деаератора				існує

Виходячи з того, що в котельній встановлені котли різного типу, що працюють в різних експлуатаційних режимах, норми питомої витрати палива (природного газу) на виробництво теплової енергії визначаються окремо для парової котельної (котли Е-1,0/0,9 Г) і для водогрійної котельної (котли ВК-21).

Результати розрахунку питомих витрат палива на власні потреби парової та водогрійної котельні (у кг ум.п./Гкал) наведені відповідно в таблицях 2 і 3.

Таблиця 2 - Питомі витрати палива на власні потреби парової котельної (котли Е-1,0/0,9Г)

№ пор	Назва статті	Позначення	Одиниця вимірювання	Величина	Примітка (спосіб одержання величини, джерело інформації)
1	Питома витрата палива на нагрів води, що видаляється з котла з продувкою	$b_{\text{прод}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{ум.п.}/\text{Гкал}}$	1,3	[18]. Виходячи з досвіду роботи підприємства відсоток продування Р, 5%, $t_{\text{жив}}=50^{\circ}\text{C}$
2	Питома витрата палива на постійнодіюче парове дуття	$b_{\text{дуть}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{ум.п.}/\text{Гкал}}$	0	[18]. Парове дуття не використовується
3	Питома витрата палива на розпалювання	$b_{\text{фор}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{ум.п.}/\text{Гкал}}$	0	[18]. Паливо – природний газ
4	Питома витрата палива на обдувку котла	$b_{\text{обд}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{ум.п.}/\text{Гкал}}$	0	[18]. Обдувка не використовується
5	Сумарні витрати палива на розпалювання котлів	$b_{\text{розп}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{ум.п.}/\text{Гкал}}$	0,45	[18]
6	Витрати палива на інші господарські потреби котельної	$b_{\text{ін}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{ум.п.}/\text{Гкал}}$	1,6	[18] $\frac{1,428}{\eta_{\text{к1}}^{\text{оп}}} = \frac{1,428}{0,9003} = 1,6$
7	Загалом	$\sum b_{\text{заг}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{ум.п.}/\text{Гкал}}$	3,35	

Таблиця 3 - Питомі витрати палива на власні потреби водогрійної котельної (котли ВК-21)

№ пор.	Назва статті	Позначення	Одиниця вимірювання	Величина	Примітка (спосіб одержання величини, джерело інформації)
1	Питома витрата палива на нагрів води, що видаляється з котла з продувкою	$b_{прод}$	$\frac{кг}{ум.п./Гкал}$	0	[18]
2	Питома витрата палива на постійно діюче парове дуття	$b_{дут}$	$\frac{кг}{ум.п./Гкал}$	0	[18]
3	Питома витрата палива на розпалювання	$b_{фор}$	$\frac{кг}{ум.п./Гкал}$	0	[18]
4.	Питома витрата палива на обдувку котла	$b_{обд}$	$\frac{кг}{ум.п./Гкал}$	0	[18]
5	Сумарні витрати палива на розпалювання котлів	$b_{розп}$	$\frac{кг}{ум.п./Гкал}$	0,45	[18]
6	Витрати палива на інші господарські потреби котельної	$b_{ін}$	$\frac{кг}{ум.п./Гкал}$	1,55	[18] $\frac{1,428}{\eta_{к3}} = \frac{1,428}{0,92} = 1,55$
7	Загалом	$\sum b_{вп}$	$\frac{кг}{у.п./Гкал}$	2,0	

Навчальний посібник

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ТА УСТАНОВКАХ

Укладачі: В.В. Клименко
В.І. Кравченко
Р.В. Телюта

КЛИМЕНКО В. В., КРАВЧЕНКО В. І., ТЕЛЮТА Р. В.
Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках:
Навчальний посібник. – Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем, 2020.
– 219 с.

Підписано до друку __.__.20__. Здано до тиражування __.__.20__.
Формат 60x86 1/16.

Папір білий. Ум. друк. арк: 12,5. Тираж 100 прим. Зам. № ____/20__

