

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІДОКРЕМЛЕНИЙ СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ  
«ЛАДИЖИНСЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ  
ВІННИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ»**

## **ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ І ГІДРАВЛІКИ**

### **Навчальний посібник**

**Для здобувачів фахової передвищої освіти  
аграрних технікумів та коледжів заочного відділення спеціальностей  
208 «Агроінженерія» і  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

Основи теплотехніки і гідравліки. Навчальний посібник / О. В. Цуркан, Н. А. Прокопенко, Ю. А. Полєвода, О. В. Маньківський. Вінниця: ТОВ «Друк», 2021. 132 с.

**Укладачі:**

Цуркан О.В. – д.т.н., доцент, директор Відокремленого структурного підрозділу «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету»;

Прокопенко Н.А. – викладач Відокремленого структурного підрозділу «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету»;

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету;

Маньківський О.В. – викладач Житомирського агротехнічного коледжу.

**Рецензенти:**

Матвійчук В.А. – д.т.н., професор, декан інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету;

Комар В.О. – д.т.н., професор, доцент кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету;

Мягkota С.В. – д.ф.м.н., професор, завідувач кафедри фізики та інженерної механіки, Львівський національний аграрний університет.

Навчальний посібник розроблений згідно робочій програмі дисципліни «Основи теплотехніки і гідравліки» для здобувачів фахової передвищої освіти аграрних технікумів і коледжів по спеціальностях 208 «Агроінженерія» і 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та відповідає типовій програмі, затвердженій науково-методичним центром вищої та фахової передвищої освіти по підготовці фахових молодших бакалаврів та охоплює весь вивчений матеріал.

В контрольну роботу включенні питання, які розглядалися на теоретичних та практичних заняттях, а також входили до складу питань для самостійної роботи студентів.

Рекомендовано Вченою радою Вінницького національного аграрного університету (протокол №11 від 27 травня 2021 р)

ISBN 978-775-8369-54-0

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	4
<b>РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ГІДРАВЛІКИ І НАСОСИ</b>	6
Тема 1.1 Основні положення гідростатики	6
Тема 1.2 Основні положення гідродинаміки	10
Тема 1.3 Насоси	16
<b>РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ТЕХНІЧНОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ</b>	21
Тема 2.1 Основні положення термодинаміки.	21
Тема 2.2 Газові суміші і їх властивості. Теплоємність газу	25
Тема 2.3 Перший закон термодинаміки	26
Тема 2.4 Дослідження термодинамічних процесів	30
Тема 2.5 Другий закон термодинаміки	33
Тема 2.6 Ідеальні цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання. Компресори і компресорні установки	35
Тема 2.7 Водяна пара. Вологе повітря	40
<b>РОЗДІЛ 3. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕПЛООБМІНУ</b>	43
Тема 3.1 Основні поняття і визначення. Теплопровідність	43
Тема 3.2 Конвективний теплообмін. Променистий теплообмін	46
Тема 3.3 Теплопередача і теплообмінні апарати	48
<b>РОЗДІЛ 4. КОТЕЛЬНІ УСТАНОВКИ І ТЕПЛОГЕНЕРАТОРИ</b>	53
Тема 4.1 Паливо і його характеристики	53
Тема 4.2 Процес горіння палива і способи спалювання	56
Тема 4.3 Котельні установки і топкові пристрої	58
Тема 4.4 Котли і теплогенератори	61
<b>РОЗДІЛ 5. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОТИ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ</b>	63
Тема 5.1 Енергозаощадження в сільському господарстві.	63
Тема 5.2 Опалення і гаряче водопостачання сільськогосподарських приміщень	67
Тема 5.3 Вентиляція сільськогосподарських приміщень	70
Тема 5.4 Основи процесу сушіння	73
Тема 5.5 Застосування холоду в сільському господарстві	79
Тема 5.6 Основи зберігання сільськогосподарської продукції	82
Тема 5.7 Теплопостачання споруд захищеного ґрунту	84
<b>КОНТРОЛЬНА РОБОТА</b>	87
<b>БЛОК ДЛЯ ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ</b>	98
<b>ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ</b>	121
<b>ДОДАТКИ</b>	122
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	131

## ВСТУП

При вивченні дисциплін теплоенергетичного циклу велике значення має набуття студентами навиків використовувати теоретичні знання для розв'язання прикладних задач інженерного характеру та виконання теплотехнічних розрахунків. Цю задачу можливо ефективно вирішити, якщо певну увагу приділяти самостійній роботі, що в свою чергу вимагає наявності відповідних учбових посібників.

Мета вивчення дисципліни «Основи теплотехніки і гідравліки» – ознайомити з процесами вироблення і перетворення різних видів енергії і способами передавання теплоти від одного фізичного тіла до іншого, а також з основними законами гідравліки.

Початок розвитку практичної теплотехніки і теплоенергетики пішло від створення в 1775 році першої теплової машини І.І. Ползуновим. Парові машини стали використовуватись у парових автомобілях, парових судах, локомотивах, тягачах та в інших транспортних засобах.

Пізніше аналогічну машину побудував Джеймс Ватт, яка стала прототипом поршневого двигуна внутрішнього згорання.

Сучасну теплоенергетику ми не уявляємо без використання теплосилової установки паротурбінних електростанцій. Перетворення теплової енергії у механічну, а згодом у електричну неможливе без засвоєння основних принципів теплотехніки.

Закони теплотехніки використовуються у всіх галузях виробництва і різних технологічних процесах. Студенти повинні вивчити будову і принцип роботи теплових двигунів, компресорних установок, водяних насосів, топкових пристроїв, теплогенераторів та водогрійних котлів; ознайомитися із будовою систем опалення і гарячого водопостачання, вентиляційними системами, тепlopостачанням культивацийних споруд, застосуванням холоду в сільському господарстві, основами сушіння та зберігання сільськогосподарської продукції, а також ознайомитись з альтернативними джерелами енергії, які застосовуються в сільському господарстві.

Теоретичні положення, вивчені на курсі дисципліни, потрібно вміти підтверджувати прикладами з техніки і практичної діяльності людини.

Вивчення теоретичного матеріалу необхідно проводити у послідовності, що визначена програмою.

Для засвоєння матеріалу необхідно використовувати інноваційні методики викладання, які стають доступними для широкого кола здобувачів в сучасному освітньому процесі.

Сьогодні все більше навчальних закладів впроваджують в освітній процес дуальну освіту. Теоретичні знання повинні підкріплюватись практичними навичками на підприємствах, де відбувається виробництво та є можливість ознайомлення з технологічними схемами та процесами в цілому.

Доцільно проводити окремі заняття на підприємствах у вигляді екскурсій, де студенти можуть побачити не тільки теплотехнічні установки, а і процеси регулювання такого обладнання.

Закріплення знань необхідно проводити на практичних і лабораторних заняттях, розв'язуючи тестові завдання і практичні задачі, використовуючи при цьому діаграми, таблиці та довідкову літературу.

Для закріплення вивченого матеріалу студентам-заочникам необхідно виконати контрольну роботу по варіанту, яка складається із задач і теоретичних питань.

***В результаті вивчення дисципліни студенти повинні знати:*** основні положення гідравліки; типи і види насосів та їх основні характеристики; основи технічної термодинаміки і теорії тепломасообміну; будову і особливості роботи теплотехнічного обладнання і установок; будову і роботу холодильних та сушильних установок; способи і методи економії енергоресурсів при використанні альтернативних джерел енергії; способи захисту навколишнього середовища від забруднення тепловими установками.

***Студенти повинні вміти:*** розв'язувати практичні задачі, які пов'язані з теплопостачанням сільськогосподарських споруд, правильно обирати гідравлічне обладнання; володіти методами ефективного використання теплових ресурсів; користуватись методичною літературою і сучасною комп'ютерною технікою для рішення задач; користуватись вимірювальними приладами; виконувати необхідні регульовальні роботи на теплотехнічному обладнанні.

Отриманні знання в процесі вивчення дисципліни стануть базовою основою для вивчення суміжних предметів: «Трактори і автомобілі», «Сільськогосподарські машини», «Механізація сільського господарства», «Гідропривід с.-г. машин», «Основи енергозбереження», «Автоматизація сільського господарства» та інших.

# РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ГІДРАВЛІКИ І НАСОСИ

## Тема 1.1 Основні положення гідростатики

Характеристика гідравліки як науки і її значення в сільськогосподарській техніці. Характеристика рідини, її фізичні властивості і залежність їх від температури і тиску. Ідеальна рідина і її властивості. Основне рівняння гідростатики. Абсолютний і наднормальний тиск. Вакуум. Прилади для вимірювання тиску. Закон Паскаля і його застосування в гідравлічних машинах на прикладі гідравлічного пресу. Сила тиску рідини на плоску поверхню, центр тиску. Умова плавання тіл [1-3].

### Теоретичні відомості

Переміщення рідин по різних гідравлічних системам - застосування, гідропресів, гідропідійомників, гідрогальм, гідромурфт та інших гідравлічних механізмів в сучасному виробництві вимагає від професійного спеціаліста глибоких знань з гідравліки. Потрібно розуміти, що гідравліка вивчає крапельні рідини, які мають властивість мало змінювати свій об'єм, необмежено змінювати свою форму під дією відносно малих сил.

В залежності від умов, гідравліку поділяють на гідростатику і гідродинаміку.

Гідростатика – розділ гідравліки, що вивчає закони рівноваги рідини. Сили, які діють на рідину поділяють на поверхневі і масові. Якщо ці сили врівноважені, то рідина перебуває в стані відносного спокою.

Для вивчення рідин потрібно добре знати її певні фізичні властивості: густину, в'язкість, стисливість.

Густиною рідини називають масу речовини, яка міститься в одиниці об'єму та вимірюється в  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

В теоретичних розрахунках густину рідини приймають рівною  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Густина можливо знайти, скориставшись таблицями, аналітично, за допомогою формули або експериментально. Для цього використовують прилади. Наприклад, для вимірювання густини молокопродуктів користуються лактометром, для нафтопродуктів – денсиметром, для кислотного середовища – ареометром. Принцип дії у цих приладів дещо схожий і користуватись ними не складно, але потрібно пам'ятати про залежність густини від температури. Із збільшенням температури густина зменшується. Виключенням з цього правила є вода, яка має максимальну густину при температурі  $4^\circ\text{C}$  і складає  $1000 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Стисливість це властивість рідини змінювати свій об'єм в залежності від тиску і температури. Рідина малостискаема речовина, тим самим її використання у гідравліці актуальне. Для характеристики стисливості рідини користуються коефіцієнтом ізотермічного об'ємного стиску. Тобто числом, яке вказує на відносну зміну об'єму в залежності від зміни на одиницю тиску при незмінній температурі. Рідину вважають нестискаємою речовиною у всіх випадках, якщо це не стосується гідравлічного удару.

Величину обернену до коефіцієнту об'ємного стиску називають модулем об'ємної напруги рідини і вимірюють в Паскалях.

Відносна зміна об'єму при зміні температури на один градус при сталому тиску, називається коефіцієнтом об'ємного розширення.

Сили внутрішнього тертя, що виникають в рідині під час її руху, спричиняють появу зсуваючих напруг. В'язкість – це властивість рідини чинити опір цим напругам. Вона залежить від роду рідини і температури, з підвищенням якої, в'язкість зменшується. Ця властивість з'являється у рідині під час її руху. Але існують так звані «аномальні» рідини, в яких висока в'язкість очевидна і в стані рівноваги. Їх називають неньютоновськими рідинами. Для них характерні наявність напруженого стану і в стані рівноваги. Прикладом можуть бути нафтопродукти, різноманітні масла, масляні фарби та інші. Характеризується в'язкість коефіцієнтами кінематичної і динамічної в'язкості. В'язкість залежить від температури: із збільшенням якої, в'язкість зменшується.

Для спрощення теоретичних досліджень в гідравліці використовують поняття ідеальної рідини. Ідеальною рідиною приймають абсолютно нестисливу і нев'язку рідину. В рівняннях такої рідини не враховують сили тертя. Але насправді ідеальної рідини не існує, тому для використання законів гідравліки в реальному житті, потрібно використовувати певні зміни у вигляді коефіцієнтів або інших величин. Такі коефіцієнти отримують в результаті експериментальних досліджень або розрахунків.

Потрібно усвідомити існування гідростатичного тиску та вивчити його властивості:

1. Гідростатичний тиск завжди направлений перпендикулярно до площини, на яку він діє.
2. Величина гідростатичного тиску не залежить від положення в просторі площі, на яку він діє.

Важливе значення мають одиниці вимірювання тиску та перевідні коефіцієнти до них. В системі СІ тиск визначається у Паскалях (Па).

Основне рівняння гідростатики дасть можливість вирахувати абсолютний гідростатичний тиск:

$$p = p_0 + \rho gh ,$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;  $h$  – висота стовпа рідини.

З рівняння видно, що гідростатичний тиск в точці рідини є сумою тиску, який прикладений до вільної поверхні рідини і надлишкового тиску стовпчика рідини. Тиск, створюваний стовпчиком рідини висотою  $h$ , називається надлишковим або манометричним тиском:

$$p_m = \rho gh .$$

Гідростатичний тиск, який визначається основним рівнянням гідростатики називають абсолютним.

Вивчення гідравліки неможливе без знань принципу дії приладів для вимірювання тиску. Тому важливо розібратись з будовою, роботою і призначенням барометра, манометра, вакуумметра. Знати, що абсолютний тиск знаходять двома способами: як різницю нормального тиску і тиску розрідження або, як суму нормального і надлишкового тиску.

Одним з основних законів гідростатики є закон Паскаля, який вказує на те, що зовнішній тиск у будь-якій точці вільної поверхні рідини однаковий, але він не дорівнює внутрішньому тиску. Цим законом широко користуються в техніці під час конструювання різних гідравлічних машин та установок (гідравлічні системи тракторів та автомобілів, гідравлічні гальма, гідравлічний прес тощо).

Сила гідростатичного тиску – це добуток гідростатичного тиску на площу його дії, вимірюється в Ньютонах і визначається за формулою:

$$P = p \cdot F, \text{ Н}$$

де  $p$  – тиск, Па;

$F$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>.

Силу гідростатичного тиску можна розрахувати як на плоску так і на криволінійну поверхню, а також визначати необхідну товщину стінок труб трубопроводів, які знаходяться під тиском рідини.

### Практичні вправи

1. Визначити об'єм резервуара для зберігання 10 т дизельного палива густиною 860 кг/м<sup>3</sup>.

Розв'язання.

З формули для визначення густини  $\rho = m/V$ , визначаємо об'єм.

$$V = m/\rho = 10^3/860 = 11,6 \text{ м}^3.$$

Приймаємо об'єм  $V = 12 \text{ м}^3$ .



2. Циліндричний резервуар місткістю  $100 \text{ м}^3$  заповнений бензином до висоти  $5 \text{ м}$ . Визначити тиск бензину на бокову стінку.

Розв'язання: Визначаємо діаметр резервуара:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H; \text{ звідки } D = \sqrt{\frac{4V}{\pi H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 100}{3,14 \cdot 5}} = 5 \text{ м}.$$

Визначаємо силу тиску бензину на бокову стінку:

$$P = \rho g h_c F, \text{ Н}$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho = 735 \text{ кг/м}^3$  для бензину;

$g$  – прискорення земного тяжіння  $\text{м/сек}^2$ ;

$h_c$  – глибина занурення центра тиску на бокову стінку,  $\text{м}$ ;

$F$  – площа проекції бокової стінки на вертикальну площину,  $\text{м}^2$ .

$$F = DH = 5 \cdot 5 = 25 \text{ м}^2$$

$$h_c = \frac{H}{2} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ м},$$

Тоді:

$$P = 735 \cdot 9,81 \cdot 2,5 \cdot 25 = 450646,9 \text{ Н} = 0,45 \text{ МН}$$

3. Визначити сили тиску, що діють на дно і бокові стінки конденсаційного бака системи парового опалення допоміжних приміщень корівника, якщо довжина бака  $3 \text{ м}$ , ширина  $2 \text{ м}$  і висота  $1,5 \text{ м}$ . Бак повністю заповнений конденсатом.

4. Визначити товщину стінок труби сталюого зварного нафтопроводу, який перебуває під тиском  $2 \text{ МН/м}^2$ . Внутрішній діаметр трубопроводу  $400 \text{ мм}$ . Допустима напруга на розрив стінок  $\sigma = 137 \text{ МН/м}^2$ . Коефіцієнт запасу  $\alpha = 5$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Основні фізичні властивості рідини і їх залежність від тиску і температури.
2. Дати визначення ідеальної рідини та її властивостей.
3. Що таке гідростатичний тиск?
4. Поясніть основне рівняння гідростатики.
5. В чому суть закону Паскаля?
6. Що таке абсолютний і надлишковий гідростатичний тиск?
7. Поясніть поняття: п'єзометрична висота і гідростатичний напір.
8. Прилади для вимірювання тиску, їх принцип дії.

9. Як визначити силу тиску на вертикальну і горизонтальну плоску поверхню?

10. Що таке центр тиску?

## **Тема 1.2 Основні положення гідродинаміки**

Завдання гідродинаміки. Види руху рідини. Поняття встановленого руху потоку рідини. Лінія течії і елементарна струминка. Витрата рідини і середня швидкість потоку. Гідравлічні характеристики потоку: живий переріз, змочений периметр, гідравлічний радіус.

Рівняння нерозривності потоку рідини. Режими руху рідини, критерій Рейнольдса, умова турбулентності. Види енергії потоку рідини. Рівняння Бернуллі для ідеальної і реальної рідини і його практичне застосування. Поняття гідравлічного опору. Втрати напору на тертя і місцеві опори та їх визначення. Види місцевих опорів. Способи зменшення втрат напору.

Поняття гідравлічного удару. Визначення збільшення тиску при гідроударі.

<https://onlinetestpad.com/holjsboob66ls>

### **Теоретичні відомості**

Водопостачання сільськогосподарських приміщень, робота гідравлічних машин і систем пов'язана з переміщенням різних рідин, тому дуже важливо знати закони руху рідини.

В гідродинаміці вивчають потік рідини, який представляє собою сукупність елементарних струминок. Потрібно пам'ятати, що при вивченні законів руху реальної рідини необхідно враховувати її в'язкість.

Витрата потоку рідини залежить від швидкості рідини і перерізу потоку. Для потоку рідини користуються терміном «середня швидкість» – тобто швидкість, з якою мали би рухатись всі частинки рідини через переріз, щоб зберігалась витрата по дійсному розподіленню швидкостей в живому перерізі. Під терміном «живий переріз» розуміють уявну площину, яка проведена по нормалі до напрямку руху рідини.

Розрізняють види руху потоку рідини: рівномірний і нерівномірний, встановлений і невстановлений, напірний і безнапірний.

Напірний потік не має вільної поверхні рідини, тобто це рух рідини в замкнутому просторі (трубопровід).

В умовах встановленого руху потік рідини являє собою сукупність елементарних струминок. Витрата однієї елементарної струминки по всій її довжині залишається незмінною.

Рівняння нерозривності потоку говорить про те, що витрата рідини є величина стала для потоку ідеальної рідини, а змінними являються середні швидкості і площі живих перерізів.

$$Q_1 = Q_2 = Q = \text{const},$$
$$v_1 A_1 = v_2 A_2,$$

де  $A$  – площа живого перерізу,  $\text{м}^2$ .

Дане рівняння дає розуміння, що при встановленому русі через будь-який переріз потоку за одиницю часу проходить однакова кількість рідини.

Потік рідини має механічну енергію у вигляді потенціальної і кінетичної енергій. Крім цього існує ще і потенціальна енергія тиску. Якщо скласти всі види енергії для потоку рідини, отримаємо:

$$E = \frac{mv^2}{2} + pV + mgh.$$

Розділивши обидві частини рівняння на силу тяжіння однієї елементарної струминки, то можливо записати питому енергію струминки:

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + h, \text{ м}$$

при цьому:

$\frac{v^2}{2g}$  – називається швидкісним напором, м;

$\frac{p}{\rho g}$  – п'єзометричний напір, м;

$h$  – геометричний напір, м.

Цю величину називають повним гідродинамічним напором, вимірюють в метрах. Під напором розуміють енергію потоку рідини, виражену в метрах водяного стовпчика.

Гідродинамічний напір вздовж потоку ідеальної рідини є величина стала. Це доведено основним рівнянням гідродинаміки або, так званим, рівнянням Бернуллі. Воно показує, що енергія потоку рідини складається із кінетичної енергії, потенціальної енергії тиску і потенціальної енергії положення, а сума цих енергій називається повним гідродинамічним напором. Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини має вигляд:

$$H = \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + h_2, \text{ м.}$$

Але по відношенню для потоку реальної рідини це рівняння змінюється.

В природному середовищі розрізняють два режими руху рідини.

Рідина може рухатись хаотично (турбулентно) або без змішування (ламінарно), тобто окремими шарами. Експериментальним шляхом англійський вчений О. Рейнольдс довів це твердження. В результаті дослідів він визначив, що режим руху рідини залежить від швидкості, діаметру та в'язкості рідини. Безрозмірну величину, яка визначає режим називають критерієм (числом) Рейнольдса:

$$Re = \frac{v\rho d}{\mu}$$

Для руху потоку рідини в трубопроводі встановлено, що при  $Re > 2300$ , режим турбулентний, а при  $Re < 2300$  режим ламінарний.

У рівнянні Бернуллі для реальної рідини необхідно врахувати коефіцієнти Коріоліса, які враховують нерівномірність швидкості по перерізу при визначенні кінетичної енергії потоку. Значення коефіцієнту на практиці приймають: для турбулентного потоку – 1,1; для ламінарного – 2,0.

Під час руху рідини по трубопроводах виникають лінійні і місцеві втрати напору. А при раптовій зупинці потоку в трубах виникає раптове підвищення тиску, яке називається гідравлічним ударом.

### Контрольний тест

1. Гідростатика – це наука, яка вивчає ...
  - a) закони розповсюдження теплоти;
  - b) закони рівноваги рідини;
  - c) закони перетворення енергії;
  - d) закони руху рідини.
2. Вкажіть одиниці вимірювання тиску:
  - a) Ньютон;
  - b) Паскаль в секунду;
  - c) кг/м;
  - d) Паскаль.
3. Вкажіть одиниці вимірювання сили тиску:
  - a) Бар;
  - b) Ньютон;
  - c) кг/м;
  - d) Паскаль;
4. На якій глибині лежить центр тиску на вертикальній стінці?

- a) на повній глибині;
- b) на поверхні рідини;
- c) на половині глибини;
- d) на одній третині глибини.

5. Вкажіть закон Паскаля.

- a) сила тиску завжди прикладена по нормалі до поверхні, на яку діє;
- b) гідростатичний тиск діє завжди по нормалі до площини прикладення;
- c) тиск, який діє на поверхню рідини передається у всі точки рідини без зміни;
- d) абсолютний тиск не можна виміряти приладом, а тільки розрахувати за формулою.

6. Яка характеристика потоку рідини прийнята для порівняння прохідної властивості потоків різної конфігурації?

- a) змочений периметр;
- b) гідравлічний радіус;
- c) живий переріз;
- d) площа перерізу.

7. В яких одиницях вимірювання є покази п'єзометра?

- a) Паскалях;
- b) Ньютонах;
- c) мм. вод. ст.;
- d) Барах.

8. Чому дорівнює абсолютний тиск, якщо покази вакуумметра  $p = 5$  кПа при барометричному тиску  $p = 101$  кПа?

- a) 2,3 кПа;
- b) 1010 кПа;
- c) 56 кПа;
- d) 146 кПа.

9. Вкажіть формулу, яке виражає основне рівняння гідростатики:

- a)  $P = \rho ghF$ ;
- b)  $p = \rho gh$ ;
- c)  $p = p_0 + \rho gh$ ;
- d)  $G = mgh$ .

10. Прилад для вимірювання густини електроліту називають:

- a) ареометр;
- b) психометр;
- c) спиртометр;
- d) манометр.

11. В'язкість рідини залежить від:

- a) густини;
- b) об'єму;
- c) температури;
- d) тиску.

12. Який тиск вимірює манометр?

- a) атмосферний;
- b) абсолютний;
- c) надлишковий;
- d) тиск розрідження.

13. В скільки разів дасть виграш гідропрес в силі, якщо  $d = 10$  см, а  $D = 100$  см?

- a) в 4 рази;
- b) в 10 разів;
- c) в 100 разів;
- d) в 2 рази.

14. Гідравлічним ударом є коливальний процес, який виникає в трубопроводі з малостискаючою рідиною, при:

- a) раптовій зміні напрямку руху рідини;
- b) поступовій зміні швидкості руху рідини;
- c) раптовій зміні кількості рідини;
- d) раптовій зміні швидкості руху рідини.

15. Напір рідини визначається в:

- a) Паскалях;
- b) Джоулях;
- c) літрах;
- d) метрах.

### Практичні вправи

1. По водопроводу тваринницької ферми  $d = 100$  мм переміщується  $200 \text{ м}^3$  води за добу. Визначити секундну витрату води і середню швидкість її руху.

Розв'язання: Визначаємо секундну витрату води:

$$Q_{сек} = \frac{Q_{доб.}}{24 \cdot 3600} = 0,0023 \text{ м}^3 / \text{сек}$$

Визначаємо середню швидкість води:

$$v = \frac{Q_{сек}}{F} = \frac{Q_{сек}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4 \cdot 0,0023}{3,14 \cdot 0,10^2} \approx 0,3 м / сек.$$

2. Визначити втрати напору в трубопроводі від водонапірної башти до тваринницького приміщення, якщо довжина трубопроводу дорівнює 100 м, а його діаметр 100 мм. Швидкість води  $v = 1$  м/сек, коефіцієнт опору тертя  $\lambda = 0,024$ .

Розв'язання: Визначаємо лінійні втрати напору за формулою Дарсі:

$$h_c = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,024 \frac{100}{0,1} \cdot \frac{1^2}{2 \cdot 9,81} = 1,22 м. вод. ст.$$

Визначаємо місцеві втрати напору за наближеною формулою:

$$h_w = 0,1 h_c = 0,1 \cdot 1,22 = 0,122 м. вод. ст.$$

Визначаємо загальні втрати напору:

$$h = h_c + h_w = 1,22 + 0,122 = 1,342 м. вод. ст.$$

3. Визначити режим руху води у трубопроводі зовнішньої водонапірної мережі тваринницької ферми діаметром 100 мм при витраті води 2,5 л/сек. Температура води 15°C.

### Запитання для самоперевірки

1. Що таке витрата рідини і від чого вона залежить?
2. Поясніть поняття рівномірності руху потоку рідини.
3. Поясніть поняття: живий переріз потоку, змочений периметр, гідравлічний радіус.
4. Написати і пояснити рівняння нерозривності потоку рідини.
5. Що визначає число Рейнольдса?
6. Види енергії потоку.
7. В чому суть рівняння Бернуллі?
8. Поясніть що таке гідравлічний опір і коли він виникає?
9. Види гідравлічних втрат напору і їх визначення.
10. Що таке гідравлічний удар?

## Тема 1.3 Насоси

Призначення і застосування насосів. Основні типи насосів.

Будова і принцип дії поршневих насосів. Основні параметри роботи поршневого насоса: висота всмоктування, напір, подача. Повітряні ковпаки і їх призначення. Гідравлічний к.к.д. і потужність насосів.

Будова і принцип дії відцентрового насоса, схеми роботи пропелерного, гвинтового, струминного, шестиренчастого та пластинчастого насосів.

Класифікація насосів.

Регулювання подачі і напору насоса.

<https://onlinetestpad.com/hmt7inrfmfcyq>

### Теоретичні відомості

Основними типами насосів є поршневі, лопатеві (відцентрові та осьові) і роторні (шестеренчасті, гвинтові, пластинчасті і др.). крім цього, є струминні насоси, гідравлічні тарани і повітряні водопідійомники.

Робота насоса характеризується його подачею  $Q$ , напором  $H$ , висотою всмоктування  $h_{вс}$ , потужністю двигуна  $N$  і коефіцієнтом корисної дії (к. к. д.)  $\eta$ .

Подачею (витратою) насоса називають величину, яка дорівнює відношенню маси (чи об'єму) рідини, що її подає насос, до часу, протягом якого було подано рідину.

Напором насоса називають приріст питомих енергій потоку рідини на вході й виході з насоса, виражене в метрах водяного стовпа.

Манометричний напір, тобто напір насоса, що діє, визначають за показами манометра  $M$  і вакуумметра,  $B$  насосної установки за формулою:

$$H = h_{ман} + h_{вак} + Z_o + \frac{v_{наг}^2 - v_{вс}^2}{2g},$$

де  $H_{ман}$  і  $H_{вак}$  – покази відповідно манометра і вакуумметра, м;

$Z_o$  – відстань між точками приєднання манометра й вакуумметра, м;

$(v_{наг}^2 - v_{вс}^2)/2g$  – різниця швидкісних напорів у всмоктувальному і нагнітальному трубопроводах, м.

Теоретична висота всмоктування насосів становить 10 метрів водяного стовпа, а дійсна – тільки 6-7 метрів. Напір насоса складається з висоти всмоктування і висоти нагнітання.



Потужність і к. к. д. насоса. Подаючи об'єм  $V$  рідини на висоту  $H$ , насос здійснює корисну роботу:

$$W = V\rho gH, \text{ Дж}$$

Корисну потужність (у ватах) визначають за формулою

$$N_{\text{кор}} = QH\rho g,$$

де  $Q$  – об'ємна витрата рідини,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Проте корисна робота насоса супроводжується додатковими втратами енергії, яка витрачається:

- 1) на подолання гідравлічного опору в самому насосі, що враховується гідравлічним к. к. д.;
  - 2) на витікання частини рідини з робочої камери насоса, яке враховується об'ємним к. к. д.;
  - 3) на подолання тертя в механізмах насоса, що враховується механічним к. к. д.
- Повний к. к. д. насоса  $\eta$  дорівнює добутку згаданих трьох к. к. д.

$$\eta = \eta_{\text{г}} \eta_{\text{об}} \eta_{\text{мех}}$$

Звичайно повний к. к. д. насоса  $\eta = 0,6 \dots 0,85$ . Менші значення  $\eta$  стосуються насосів малої потужності (приблизно до 5 кВт), а більші – насосів більших потужностей.

Потужність, споживана насосом, вимірюється в ватах і дорівнює:

$$N_{\text{нас}} = N_{\text{нов}} / \eta = Q\rho gH / \eta$$

В поршневих насосах для рівномірності подачі води використовують повітряні ковпаки.

Потрібно ознайомитись з будовою і принципом роботи різних видів насосів практично.

### Контрольний тест

1. Що таке подача насосу?
  - a) відстань, на яку насос качає рідину;
  - b) висота, на яку насос піднімає рідину;
  - c) енергія, яку створює насос;
  - d) кількість рідини, яку перекачує насос за одиницю часу.
2. Що враховує гідравлічний к.к.д. насоса?
  - a) витрату енергії на роботу насоса;
  - b) втрати енергії на подолання гідравлічного опору;
  - c) сили тертя в механізмах насоса;
  - d) втрати енергії на подолання в'язкості рідини.

3. Поршневі насоси відносять до типу...

- a) Вихрових;
- b) лопатевих;
- c) об'ємних;
- d) струменевих.

4. Напором потоку рідини в насосі називають...

- a) енергію, виражену в метрах водяного стовпчика;
- b) приріст питомої енергії на вході і виході з насосу;
- c) енергію, з якою рідина діє на трубопровід;
- d) кількість рідини, яка проходить за одиницю часу.

5. Назвіть величини, від яких залежить потужність насоса...

- a) від подачі;
- b) від к.к.д. насоса;
- c) від подачі і напору;
- d) від конструкції насосу.

6. Насос, в якому рідина рухається під дією відцентрових сил, називають:

- a) лопатевий осьовий насос;
- b) лопатевий відцентровий насос;
- c) поршневий насос відцентрової дії.

7. Об'ємний к.к.д. насоса відображає втрати потужності, які пов'язані з:

- a) змінною витратою рідини в нагнітальному трубопроводі;
- b) внаслідок сили тертя між елементами насоса;
- c) внаслідок внутрішніх перетоків рідини в насосі через зазори рухомих елементів.

8. Механічний к.к.д. насоса відображає втрати потужності, які пов'язані з:

- a) змінною витратою рідини в нагнітальному трубопроводі;
- b) внаслідок сили тертя між елементами насоса;
- c) внаслідок внутрішніх перетоків рідини в насосі через зазори рухомих елементів.

9. Потужність, яка відводиться від насосу у вигляді потоку рідини під тиском називається:

- a) корисна потужність;
- b) механічна потужність;
- c) гідравлічна потужність.

10. Шестеренчасті насоси відносять до типу...

- a) об'ємних;

- b) лопатевих;
- c) струменевих;
- d) інжекторних.

### Практичні вправи

1. Насос з подачею 8 л/с подає воду по трубопроводу діаметром 100 мм. Діаметр всмоктувального патрубку 125 мм. Визначити повний напір і потужність, якщо покази манометра на нагнітальному патрубку 0,35 МПа, а покази вакуумметра на всмоктувальному патрубку 0,04 МПа. Відстань між точками приєднання манометра і вакуумметра дорівнює 1 м, к.к.д. насоса 0,7.

Розв'язання: Напір насоса визначаємо за формулою:

$$H = h_M + h_B + Z_0 + \frac{v_H^2 - v_B^2}{2g}, \text{ м. вод. ст.}$$

Покази манометра і вакуумметра в м. вод.ст.:

$$h_M = \frac{p_M}{\rho g} = \frac{0,35 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} = 35,5 \text{ м. вод. ст.}$$

$$h_B = \frac{p_B}{\rho g} = \frac{0,04 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9,81} = 4,1 \text{ м. вод. ст.}$$

За даною подачею і діаметрами патрубків визначаємо швидкість руху води у всмоктувальному і нагнітальному патрубках:

$$v_B = \frac{4Q}{\pi d_B^2} = \frac{4 \cdot 0,008}{3,14 \cdot 0,125^2} = 0,625 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_H = \frac{4Q}{\pi d_H^2} = \frac{4 \cdot 0,008}{3,14 \cdot 0,1^2} = 1,02 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

Тоді напір насоса:

$$H = 35,5 + 4,1 + 1,0 + \frac{1,02^2 - 0,625^2}{2 \cdot 9,81} = 40,71 \text{ мвод. ст.}$$

Або:

$$H = 40,71 \cdot \rho g = 40,71 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 399,4 \text{ кПа}$$

Визначаємо потужність, споживану насосом:

$$N = \frac{\rho Q H}{102 \eta} = \frac{1000 \cdot 0,008 \cdot 40,71}{102 \cdot 0,7} = 4,56 \text{ кВт.}$$

2. Визначити подачу і споживану потужність поршневого насоса подвійної дії, якщо діаметр поршня 0,2 м, діаметр штока 0,04 м, хід поршня 0,25 м. Частота обертання вала насоса  $90 \text{ хв}^{-1}$ , об'ємний к.к.д насоса 0,92. Повний к.к.д. насоса 0,8. Насос має напір 70 м вод. ст.

### Запитання для самоперевірки

1. Назвіть основні типи насосів.
2. Які параметри характеризують роботу насоса?
3. Що враховує повний к.к.д. насоса?
4. Які параметри вносять в марку насоса?
5. Від чого залежить потужність?
6. Яку роль має створюване в насосі розрідження?
7. Поясніть принцип роботи шестеренчастого насоса.
8. Що таке кавітація?
9. Поясніть застосування повітряного ковпака в поршневих насосах?
10. Принцип роботи гвинтових, осьових, струменевих і інших насосів.

## РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ТЕХНІЧНОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ

### Тема 2.1 Основні положення термодинаміки

Предмет і методи технічної термодинаміки. Робоче тіло і його параметри. Поняття про ідеальний газ. Рівняння стану ідеального газу. Поняття про реальні гази як про робочі тіла.

Теплоємність газу: дійсна і середня. Одиниці вимірювання теплоємності: масової, об'ємної, молярної. Залежність теплоємності від процесу.

Термодинамічна система. Термодинамічний процес.  
<https://onlinetestpad.com/hnqlabfhcsovк>

### Теоретичні відомості

Основною властивістю енергії є здатність перетворюватись з одного виду в інший, що випливає із закону збереження і перетворення енергії.

Теплота і робота – дві форми існування та передачі енергії, які можуть взаємно перетворюватись. Закони такого перетворення потрібно знати.

Одним із основних у технічній термодинаміці є поняття про термодинамічну систему. Таку систему створюють сукупність матеріальних тіл, що взаємодіють як між собою, так і з навколишнім середовищем. Прикладом термодинамічної системи може бути газ, що стискається або розширюється в циліндрі з рухомим поршнем.

Тобто для роботи теплових машин використовують так зване робоче тіло (продукти спалювання палива або водяна пара). Основними параметрами робочого тіла є абсолютний тиск, абсолютна температура і питомий об'єм.

В термодинаміці для спрощення розрахунків в якості робочого тіла приймають ідеальний газ (уявний газ, в якого відсутні міжмолекулярні взаємодії, а об'єм молекул нескінченно малий порівняно з об'ємом, який займає газ).

Залежності між параметрами стану робочого тіла називають газовими законами. Потрібно розглянути рівняння стану, як для 1 кг так і для довільної маси ідеального та реального газів та навчитися користуватися ними для розв'язання задач.

Для вивчення рівняння стану ідеального газу потрібно згадати основні газові закони.

Закон Бойля-Маріотта: при сталій температурі добуток абсолютного тиску на питомий об'єм є величиною сталою:

$$pv = \text{const.}$$

Закон Гей-Люссака: при сталому тиску питомий об'єм газу змінюється прямо пропорційно зміні абсолютних температур:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Закон Шарля: при сталому питомому об'ємі абсолютні тиски газу змінюються прямо пропорційно зміні абсолютних температур:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Для рівноважної термодинамічної системи існує зв'язок між параметрами стану, який називають *характеристичним рівнянням стану* газу або *рівнянням Менделєєва-Клапейрона*.

Для 1 кг ідеального газу воно записується таким чином:

$$pv = RT,$$

де  $R = 8,314$  Дж/(кг·К) питома газова стала ідеального газу.

Якщо в системі є реальний газ, то газову сталу можна визначати:

$R_i = R/\mu_i$ , де  $\mu_i$  – молярна маса реального  $i$ -того газу, тоді для будь-якої маси реального газу:

$$pV = mR_i T.$$

Зміна стану термодинамічної системи під дією зовнішнього середовища називається *термодинамічним процесом*. При цьому відбувається послідовна зміна параметрів стану робочого тіла.

Всі гази, що є в природі є реальними. В реальному житті прикладом «ідеального газу» по своїм властивостям при низьких тисках і високих температурах перегріву може виступати перегріта водяна пара.

Процес, при якому зміна стану газу проходить без теплообміну з навколишнім середовищем, називають *адіабатним* ( $q = 0$ ). Адіабатними вважаються процеси, які проходять з великим викидом енергії за дуже короткий проміжок часу. Наприклад, процеси розширення або стиску газу в двигунах внутрішнього згорання, можуть вважатися адіабатними. Рівняння даного процесу:

$$pv^k = \text{const},$$

де  $k$  – показник адіабати, який залежить від атомності газу.

Процес, при якому незмінною залишається теплоємність, називають *політропним* ( $c = \text{const}$ ).

Рівняння процесу:

$$pv^n = \text{const},$$

де  $n$  – показник політропи.

Усі процеси, які розглядались раніше, можуть вважатися політропними, якщо умова сталої теплоємності буде збережена.

### Контрольний тест

1. При якому процесі робота здійснюється за рахунок внутрішньої енергії?
  - a) ізохорному;
  - b) ізобарному;
  - c) ізотермічному;
  - d) адіабатному.
2. При якому процесі робота дорівнює нулю ( $l = 0$ )?
  - a) ізохорному;
  - b) ізобарному;
  - c) ізотермічному;
  - d) адіабатному.
3. Як називається процес зміни стану газу, при протіканні якого теплоємність залишається незмінною ( $c = const$ )?
  - a) ізотермічний;
  - b) адіабатний;
  - c) ізобарний;
  - d) політропний.
4. Як називається процес зміни стану газу виражений рівнянням
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$
  - a) ізохорний;
  - b) ізобарний;
  - c) ізотермічний;
  - d) адіабатний.
5. При якому процесі все тепло йде на зміну внутрішньої енергії газу?
  - a) ізохорному;
  - b) ізобарному;
  - c) ізотермічному;
  - d) адіабатному.
6. Як називається процес зміни стану газу, при якому відсутній теплообмін між газом і навколишнім середовищем?
  - a) ізохорний;
  - b) ізобарний;

- c) ізотермічний;
- d) адіабатний.

7. Як називається процес зміни стану газу, який відбувається при постійному тиску?

- a) ізохорний;
- b) ізобарний;
- c) ізотермічний;
- d) адіабатний.

8. Як називається процес зміни стану газу, який відбувається при постійному об'ємі?

- a) ізохорний;
- b) ізобарний;
- c) ізотермічний;
- d) адіабатний.

9. При якому процесі зміна внутрішньої енергії ідеального газу дорівнює нулю?

- a) ізохорний;
- b) ізобарний;
- c) ізотермічний;
- d) адіабатний.

10. Яке значення показника політропи ( $n$ ) окремого випадку політропного процесу відповідає ізобарному процесу?

- a)  $n = 1$ ;
- b)  $n = 0$ ;
- c)  $n = k$ ;
- d)  $n = \pm\infty$ .

### Практичні вправи

1. Визначити, яка маса повітря засмоктується в двигун внутрішнього згоряння, якщо його температура  $20^{\circ}\text{C}$ , тиск повітря 1,18 бар і об'єм  $20\text{ м}^3$ . Газова стала повітря  $R=283,7\text{ Дж}/(\text{кг град})$ .

Розв'язання.

Масу повітря визначаємо з рівняння стану ідеального газу для довільної маси:

$$pV = mRT, \text{ звідки знаходимо:}$$



$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{1,18 \cdot 10^5 \cdot 20}{283,7 \cdot 293} = 28,39 \text{ кг}$$

Перед підстановкою значень температури і тиск необхідно перевести:

$$T = 20 + 273 = 293 \text{ К}; p = 1,18 \text{ бар} = 1,18 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

2. Димові гази, що утворилися в топці парового котла, охолоджуються з температури 1100°C до 200°C. В скільки разів зменшиться їх об'єм, якщо тиск газів на початку і в кінці димоходу однаковий.

## Тема 2.2 Газові суміші і їх властивості. Теплоємність газу

Поняття про газові суміші. Закон Дальтона. Склад суміші у масових та об'ємних частках, та співвідношення між ними. Густина суміші. Уявна молярна маса суміші. Газова стала суміші.

### Теоретичні відомості

Газовою сумішшю називають суміш декількох ідеальних газів, які хімічно не взаємодіють між собою. Окремі гази, що входять до складу газової суміші, називаються компонентами.

Газовими сумішами є продукти згоряння палива в циліндрах двигунів внутрішнього згоряння, топках котлів та навколишнє повітря. Отже, робочим тілом у двигунах внутрішнього згорання і газових турбінах є газові суміші, тому студенту потрібно вміти проводити розрахунки, користуючись відповідними залежностями.

Крім того, студенту потрібно знати, формулювання закону Дальтона для газової суміші, яким чином можливо задати склад газової суміші та як визначається густина газової суміші.

Закон Дальтона полягає в тому, що тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків її компонентів. Парціальним називають тиск окремого компоненту газової суміші.

Склад суміші газів може бути заданий масовими або об'ємними долями.

Масова доля це відношення маси окремого компоненту суміші до маси

всієї суміші:  $g_i = \frac{m_i}{m_{\text{сум.}}}, \quad \Sigma g_i = 1.$

Об'ємна доля це відношення об'єму окремого компонента суміші до об'єму всієї суміші:  $r_i = \frac{V_i}{V_{\text{сум}}}$ ,  $\sum r_i = 1$ .

Розрахунки з газовими сумішами проводяться за тими ж рівняннями стану, що і для окремих ідеальних газів.

### **Практичні вправи**

Проаналізувати розв'язання задач 2-23, 2-24, 2-77, 2-79 за збірником задач [8].

### **Запитання для самоперевірки**

1. Як формується закон Дальтона для газової суміші?
2. Що таке парціальний тиск і парціальний об'єм компонентів газової суміші?
3. Що таке масова і об'ємна частки компонентів газової суміші і як вони визначаються?
4. Що таке уявна молекулярна маса і як вона визначається для газової суміші?
5. Як визначається газова стала суміші газів?

### **Тема 2.3 Перший закон термодинаміки**

Поняття внутрішньої енергії, роботи і теплоти. Перший закон термодинаміки. Зміст закону і його формулювання. Аналітичний вираз першого закону термодинаміки для закритих систем. Принцип еквівалентності теплоти і роботи. Внутрішня енергія і її властивості. Ентальпія газу. Робота газу, її визначення і графічне зображення у  $p$ - $v$ -координатах. Теплоємність газів.

<https://onlinetestpad.com/hnqlabfhcsovk>

### **Теоретичні відомості**

У термодинаміці розглядаються тільки рівноважні, оборотні термодинамічні процеси, хоч всі природні, реальні процеси є нерівноважними, а отже, і необоротними, оскільки, вони протікають з кінцевими швидкостями.

Тому вивчаючи цей матеріал, студент повинен навчитись зображати рівноважні термодинамічні процеси у координатах  $PV$ , оскільки третій параметр –  $T$  завжди може бути визначений з рівняння стану:  $pV=RT$ . Слід також усвідомити, що робота газу у процесі графічно зображується площею, розташованою між лінією процесу і віссю абсцис, яка з боків обмежена ординатами точок початку і кінця.

При розширенні газу роботу вважають додатною, а при стисканні – від'ємною. Робота розширення відбувається за рахунок підведеного до газу тепла, а робота стискання за рахунок прикладання зовнішньої сили.

Перший закон термодинаміки є конкретизацією всесвітнього закону збереження і перетворення енергії і вказує на те, що теплота може перетворюватись у роботу, а робота – в теплоту. Аналітично перший закон термодинаміки можна записати так:

$$Q = L + \Delta U,$$

де  $Q$  – теплота, Дж;

$L$  – робота, Дж;

$U$  – внутрішня енергія газу, Дж;  $\Delta U$  – зміна внутрішньої енергії.

Слід пам'ятати, що робота повністю перетворюється в теплоту, тоді як перетворення теплоти у роботу супроводжується тепловими витратами (коефіцієнт цього перетворення завжди менший одиниці).

Студенту також слід з'ясувати, що таке внутрішня енергія і ентальпія газу, як визначається їх величина для ідеального газу та їх зміна у будь-якому термодинамічному процесі.

Величину теплоти, яку потрібно підвести до тіла, щоб воно змінило свою температуру на  $1^\circ\text{C}$ , називають теплоємністю газу. Потрібно розуміти, що теплоємність залежить від кількості газу і процесу, який з ним відбувається. Розрізняють дійсну теплоємність і середню. Середня теплоємність може бути масовою, об'ємною і молярною, відповідно одиниці вимірювання відрізняються.

В залежності від процесу теплоємність поділяють на ізобарну та ізохорну, між якими є залежність, яка описана рівнянням Майера:

$$c_p - c_v = R,$$

де  $R$  – універсальна газова стала (у випадку ідеального газу), Дж/(кг·К).

Потрібно розуміти, що ізобарна теплоємність більша за ізохорну внаслідок того, що частина теплоти при ізобарному процесі витрачається на виконання роботи, а при ізохорному – вся теплота йде тільки на нагрівання тіла.

## Контрольний тест

1. Назвіть одиниці вимірювання енергії:

- a) Ньютон;
- b) Джоуль;
- c) Паскаль.

2. Робочим тілом в термодинамічній системі називають:

- a) поршень, що рухається в циліндрі;
- b) пальна суміш;
- c) газ, що розширюється.

3. Вкажіть рівняння Менделєєва-Клайперона:

- a)  $E = \frac{mv^2}{2}$ ;
- b)  $pv = RT$ ;
- c)  $Q = cm\Delta T$ .

4. Порівняйте температури по шкалі Кельвіна  $T=300\text{K}$  і Цельсія  $t=300^\circ\text{C}$ :

- a)  $t = T$ ;
- b)  $t < T$ ;
- c)  $t > T$ .

5. Закон Шарля відносять до процесу із сталим....

- a) об'ємом;
- b) температурою;
- c) тиском.

6. Закон Бойля-Маріотта має вигляд:

- a)  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_1}{v_2}$ ;
- b)  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1}{p_2}$ ;
- c)  $p_1v_1 = p_2v_2$ .

7. Які величини змінюються згідно закону Гей-Люссака?

- a) температура і об'єм;
- b) об'єм і тиск;
- c) тиск і температура.

8. Перший закон термодинаміки має вигляд:

- a)  $Q = L + \Delta U$ ;
- b)  $p_1v_1 = p_2v_2$ ;
- c)  $pv = RT$ .

9. Необхідною умовою для виконання роботи робочим тілом є зміна:
- a) тиску;
  - b) температури;
  - c) об'єму.

10. Як знайти теплоту при ізобарному процесі?

- a)  $Q = 0$ ;
- b)  $Q = c_p m \Delta T$ ;
- c)  $Q = c_v m \Delta T$ .

11. Вкажіть рівняння Майера:

- a)  $k = \frac{c_p}{c_v}$ ;
- b)  $c_p - c_v = R$ ;
- c)  $c_v = \frac{R}{k-1}$ .

12. В якому ізопроцесі робота не виконується?

- a) ізохорному;
- b) ізобарному;
- c) ізотермічному.

### Практичні вправи

1. При роботі двигуна у циліндр під час процесу всмоктування заходить 0,00068 кг повітря при початковій температурі 20°C. Від стінок циліндра повітря нагрівається до 80°C, Визначити, на скільки збільшиться внутрішня енергія і ентальпія повітря, що входить у циліндр. Теплоємність повітря вважати незалежною від температури.

Розв'язання: Рівняння приросту внутрішньої енергії для довільної кількості газу:

$$U = U_2 - U_1 = m c_v (t_2 - t_1), \text{ кДж}$$

Визначаємо значення масової Ізохорної теплоємності повітря:

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu_{нов}} = \frac{20,9}{28,84} = 0,724 \text{ кДж/(кгК)}.$$

Приріст внутрішньої енергії становитиме:

$$U = 0,00068 \cdot 0,724 (80 - 20) = 0,03 \text{ кДж}.$$

Рівняння приросту ентальпії для довільної маси газу:

$$I = I_2 - I_1 = m c_p (t_2 - t_1), \text{ кДж}.$$

Визначаємо значення масової ізобарної теплоємності повітря:

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu_{нов}} = \frac{29,2}{28,84} = 1,0012 \text{ кДж/(кгК)}.$$

Приріст ентальпії становитиме:

$$I = 0,00068 \cdot 1,012 (80-20) = 0,041 \text{ кДж}$$

### Запитання для самоперевірки

1. Який процес називають термодинамічним?
2. Як формулюється перший закон термодинаміки?
3. Що таке внутрішня енергія і ентальпія газу, їх визначення?
4. Запишіть і поясніть формулу першого закону термодинаміки.
5. Як виражається графічно і визначається аналітично робота газу у будь-якому термодинамічному процесі

### Тема 2.4 Дослідження термодинамічних процесів

Дослідження термодинамічних процесів. Порядок і метод дослідження. Політропний процес. Рівняння політропи. Визначення показника політропи. Співвідношення параметрів. Визначення роботи, теплоємності і теплоти процесу. Основні термодинамічні процеси: ізохорний, ізобарний, ізотермічний і адіабатний як часткові випадки політропного, їх зображення в координатах  $PV$  і  $TS$ .

### Теоретичні відомості

Вивчати, матеріал цього заняття слід у такій послідовності:

- 1) визначити суть термодинамічних процесів: ізохорного, ізобарного, ізотермічного, адіабатного і політропного;
- 2) провести дослідження політропного процесу у порядку;
- 3) довести, що ізохорний, ізобарний, ізотермічний і адіабатний процеси є політропними при певних значеннях, показника політропи  $n$ .
- 4) навчитись зображати, всі вищезазначені процеси у  $PV$  і  $TS$  – координатах та визначати величину теплоти і роботи.

Зміна стану робочого тіла супроводжується та характеризується зміною його основних параметрів. Стан робочого тіла може змінюватись двома способами:

- підведенням або відведенням теплоти;
- механічним стиском або розширенням.

Математично можна виразити термодинамічні процеси рівняннями, які пов'язують між собою основні параметри стану: абсолютний тиск, абсолютну температуру і питомий об'єм.

При дослідженні всі процеси вважаються як рівноважні.

Існує додатковий параметр стану газу – ентропія  $S$ . Цей параметр вказує на напрямок процесу теплообміну між системою і зовнішнім середовищем. Одиницею вимірювання ентропії приймають кДж/К, або кДж/(кг К). Умовно вважають, що при  $0^{\circ}\text{C}$  і при будь-якому тиску ентропія які внутрішня енергія дорівнює нулю.

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \frac{\Delta q}{T}.$$

Введення ентропії як параметру стану робочого тіла дає можливість застосувати для дослідження термодинамічних процесів систему координат відношення ентропії від температури ( $Ts$ -діаграму). В цій діаграмі площа, яка обмежена перпендикулярами, опущеними на вісь ентропії з точок початку і кінця процесу, дає величину теплоти (підведеної або відведеної) в процесі.

При дослідженні термодинамічних процесів визначають:

1. Рівняння процесу і його графічне зображення в системі координат  $p, v$ .
2. Зв'язок між основними параметрами стану газу.
3. Зміну внутрішньої енергії газу і величину роботи розширення.
4. Кількість теплоти, яка підводиться або відводиться в результаті процесу.
5. Графічне зображення процесу в системі координат  $Ts$ .

В процесах, які пов'язані із практичним застосуванням розрахунків, вводять ще один параметр стану робочого тіла, який називають ентальпією або тепловмістом. Позначається ентальпія буквами  $I$  (Н), Дж, або питома –  $i(h)$ , Дж/кг.

$$i = u + pv = u + RT = c_p$$

При розрахунках частіше користуються значенням зміни ентальпії, а не її абсолютним значенням.

### Практичні вправи

1. В автомобільному двигуні внутрішнього згорання після згорання палива димові гази адіабатно розширюються, причому тиск зменшується від  $p_1=2,5$  МПа до  $p_2=0,5$  МПа.

Перед розширенням температура газів дорівнювала  $t_1 = 1800^{\circ}\text{C}$ , а об'єм, який вони займали, становив  $V_1=0,004$  м<sup>3</sup>. Показник адіабати  $k=1,4$ . Визначити температуру газів наприкінці розширення.

Розв'язання.

Із співвідношення між температурою і тиском газу в адіабатному процесі маємо:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}, T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 2073 \left(\frac{0,5}{2,5}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 1308 \text{ К.}$$

$$\text{Отже } t_2 = T_2 - 273 = 1308 - 273 = 1035 \text{ К}$$

2. 1 кг кисню розширюється адіабатно. Початок процесу характеризується початковим тиском  $p_1=1,0$  МПа, і температурою  $t_1=277^\circ\text{C}$ ; кінець процесу –  $p_2 = 0,1$  МПа. Визначити кінцеві параметри стану та роботу розширення газу.

Розв'язання.

З рівняння Клайперона знаходимо питомий об'єм:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{260 \cdot 550}{1 \cdot 10^6} = 0,143 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Кінцевий об'єм знаходимо із співвідношення між параметрами стану в адіабатному процесі, при умові, що показник адіабати для двохатомних газів  $k = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$ :

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = 0,143 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,74 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Робота в процесі:

$$l = \frac{1}{(k-1)} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = 173 \text{ кДж.}$$

Кінцева температура газу:

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,74}{260} = 285 \text{ К.}$$
$$t_2 = T_2 - 273 = 12^\circ\text{C.}$$

### Запитання для самоперевірки

1. Дати визначення основних термодинамічних процесів.
2. Написати формули рівнянь і залежностей між параметрами для основних термодинамічних процесів.
3. Поясніть фізичний зміст додаткових параметрів стану ентропії та ентальпії.
4. Показати, графічно кожен процес у  $PV$  - координатах.
5. Поясніть методику знаходження роботи процесу графічно на  $PV$  – координатах.
6. Поясніть методику знаходження теплоти процесу графічно на  $TS$  – координатах.
7. Яка відмінність між, адіабатним і політропний процесами?
8. Які процеси стиску і розширення відбуваються у двигунах внутрішнього згорання?



## Тема 2.5 Другий закон термодинаміки

Другий закон термодинаміки. Зміст закону і його формулювання. Колові процеси або цикли. Прямий і зворотний цикли. Термічний к.к.д. циклу і холодильний коефіцієнт. Цикл Карно. Загальні властивості оборотних і необоротних циклів. Аналітичний вираз другого закону. Ентропія газів.

Система координат  $TS$  і графічне знаходження теплоти процесу.

### Теоретичні відомості

Вивчаючи матеріал заняття, студент повинен перш за все з'ясувати поняття колового процесу, або циклу, Потрібно знати, що за прямими циклами працюють теплові двигуни, а за зворотними – холодильні установки. Для перетворення тепла у роботу в прямому циклі необхідно два джерела тепла з різною температурою: тепловіддавач (або верхнє джерело тепла) і теплоприймач (або нижнє джерело теплоти).

Потім потрібно вивчити і усвідомити суть другого закону термодинаміки, який має декілька еквівалентних формулювань, що наводяться у підручниках. Пропонується таке визначення: все тепло, підведене до робочого тіла у коловому процесі не може бути перетворене у корисну роботу, частина тепла неминуче повинна бути віддана нижньому джерелу тепла (втрачена).

Слід також знати, що відношення корисної теплоти (теплоти, перетвореної у корисну роботу) до всього підведеного за цикл, називається термічним к.к.д. циклу, тобто:

$$\eta_t = \frac{L}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

З цієї формули видно, що  $\eta_t < 1$ , оскільки за другим законом термодинаміки  $q_2 \neq 0$ .

Термічний к.к.д. є показником ефективності циклів теплових двигунів, (прямих циклів).

Як зазначалось, за зворотними циклами працюють холодильні установки, які за рахунок витрати роботи відбирають тепло від нижнього джерела тепла і передають його верхньому.

Показником, ефективності цих циклів є так званий холодильний коефіцієнт, який являє собою відношення відібраного тепла (виробленого холоду) до витраченої роботи, тобто:

$$E = \frac{Q_2}{L}$$

Для збільшення термічного к.к.д. теплового двигуна французький вчений Саді Карно запропонував свій цикл роботи двигунів, з яким студенту слід добре ознайомитися, навчитись визначати термічний к.к.д. прямого і холодильний коефіцієнт зворотного циклів Карно.

### Практичні вправи

1. Максимальна температура газів у кінці горіння палива у карбюраторному двигуні становить  $1800^\circ\text{C}$ . Мінімальна температура, з якою гази виходять з циліндра двигуна, дорівнює  $600^\circ\text{C}$ . Визначити максимально можливий термічний к.к.д., якщо припустити, що двигун працює за циклом Карно.

Розв'язання: за формулою термічного к.к.д. циклу Карно:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{600 + 273}{1800 + 273} = 0,58$$

2. В коловому процесі до газу підведемо  $1000$  кДж теплоти.

Термічний к.к.д. процесу  $\eta = 0,4$ . Визначити роботу газу за цикл.

3. В холодильній установці, яка працює за зворотним циклом Карно, від нижнього джерела тепла відведено  $250$  кДж. тепла, при цьому витрачена робота становить  $48$  кДж. Визначити холодильний коефіцієнт і кількість тепла, яке передається верхньому джерелу теплоти.

### Запитання для самоперевірки

1. Що таке коловий процес /цикл/ і як визначається його термічний к.к.д.?
2. Прямий цикл Карно і його термічний к.к.д.
3. Зворотний цикл Карно і його холодильний коефіцієнт.
4. Довести, що термічний к.к.д, колового процесу і прямого циклу Карно завжди менший одиниці.
5. Теорема Карно.
6. Суть другого закону термодинаміки і його формулювання.
7. Зображення циклу Карно у  $PV$ - координатах.
8. Зображення циклу Карно у  $TS$  - координатах.
9. Робота і теплота циклу.
10. Теплові втрати під час проходження циклу.

## Тема 2.6 Ідеальні цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання. Компресори і компресорні установки

Ідеальні цикли поршневих двигунів внутрішнього згорання. Цикл із змішаним підведенням тепла. Цикли з підведенням тепла при сталому об'ємі і з підведенням тепла при сталому тиску. Термічний к.к.д. циклу. Робота газу за цикл. Порівняння циклів.

Принцип роботи компресора. Робочий процес одноступінчастого поршневого компресора і зображення його в координатах  $PV$  і  $TS$ .

Призначення, типи і галузі застосування компресорних машин. Будова і робота поршневого компресора. К.к.д. компресора. Багатоступінчасті компресори.

### Теоретичні відомості

Відомо, що ідеальним циклом будь-якої теплової установки є цикл Карно, але практично здійснити процес у двигуні внутрішнього згорання за циклом Карно неможливо. Це пояснюється тим, що двигуни внутрішнього згорання працюють при великій різниці температур (1000-1700°C). Процес у двигунах внутрішнього згорання проходить з , дуже великим збільшенням тиску і температури. Максимальний тиск при цьому може досягнути величини 200-300 МПа, а ступінь стиску – до 400. Тому двигуни внутрішнього згорання працюють не за циклом Карно, а за іншими, менш економічними, але практично здійсненими циклами.

У даний час для двигунів внутрішнього згорання в залежності від способу підведення теплоти застосовують три цикли, відмінні від циклу Карно: цикл з підведенням тепла при  $V=const$  і цикл з підведенням тепла при  $p=const$  і цикл із змішаним підведенням тепла: при  $V=const$  і при  $p=const$ . Термічні к.к.д. цих циклів менші за термічний к.к.д. циклу Карно.

Перший цикл характерний для двигунів із зовнішнім сумішоутворенням (бензинові, газові).

Цикл із змішаним підведенням теплоти характерний для двигунів із внутрішнім сумішоутворенням.

Цикл із підведенням теплоти при  $p=const$  являє собою термодинамічний коловий процес, що протікає в компресорному дизелі, у якому розпал палива проходить в циліндрі стисненим повітрям. Ці двигуни зараз не застосовуються.

За наведеними підручниками потрібно ознайомитися з суттю цих циклів, зображенням їх у  $pV$ - координатах і формулами для визначення термічного к.к.д. для кожного з цих циклів.

Слід також знати, що цикл з ізохорним підведенням теплоти (рис. 2.1) лежить в основі роботи карбюраторних двигунів, а в основі роботи сучасних дизельних двигунів – цикл із змішаний підведенням теплоти.

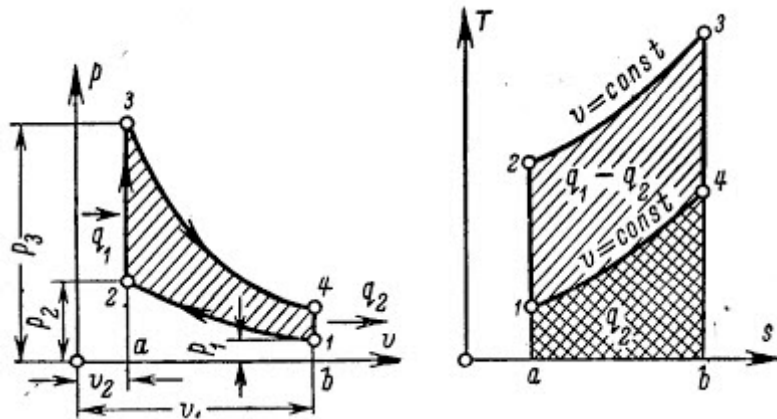


Рисунок 2.1 – Ідеальний цикл ДВЗ з ізохорним підведенням

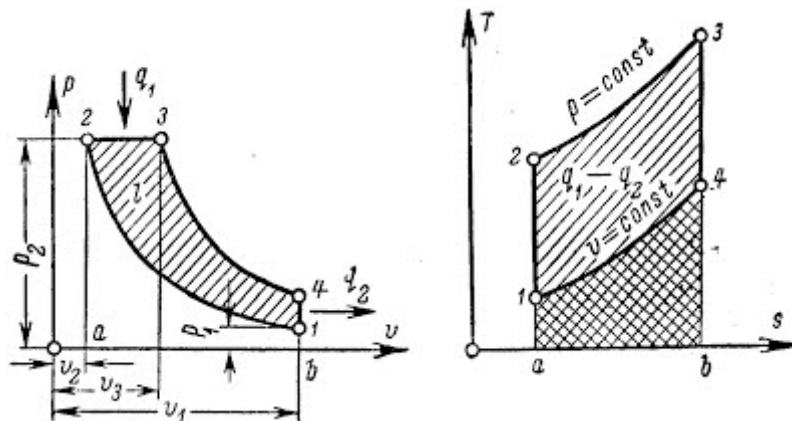


Рисунок 2.2 – Ідеальний цикл ДВЗ з ізобарним підведенням теплоти

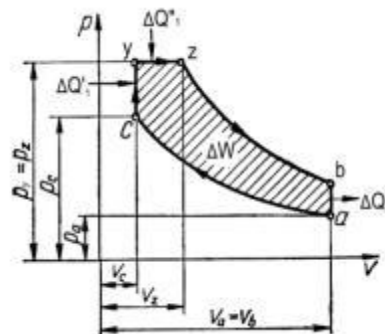


Рисунок 2.3 – Ідеальний цикл ДВЗ із змішаним підведенням теплоти

У сільському господарстві широко використовують стиснене повітря або інші гази. Їх стискають за допомогою компресорів, які бувають поршневыми і лопатевими (відцентровими і осьовими). Компресори застосовуються в холодильних установках, агрегатах з технічного обслуговування машинно-тракторного парку, пневматичних гальмових системах, соціальних компресорних станціях.

Слід добре вивчити будову і принцип роботи поршневих, одно- і багатоступінчастого компресорів, які найбільш застосовуються у сільському господарстві. Слід пам'ятати, що подачею компресора називається об'єм газу, який подає компресор за одиницю часу (наприклад за 1 секунду) при тиску і температурі газу на вході у компресор (кількість повітря, засмоктуваного компресором).

Потрібно також ознайомитись з основними правилами експлуатації компресорних станцій, а також з будовою і принципом дії ротаційних, відцентрових і осьових компресорних машин.

### Контрольний тест

1. Як називають шлях, виконаний поршнем від однієї мертвої точки до другої:
  - a) хід поршня;
  - b) такт;
  - c) стиск;
  - d) впуск.
2. На такті «впуск» в циліндр дизельного двигуна внутрішнього згоряння проходить:
  - a) метан, повітря, дизельне пальне;
  - b) дизельне пальне;
  - c) повітря;
  - d) метан.
3. Робочий об'єм двигуна вимірюється в:
  - a) Ньютонах;
  - b) Паскалях;
  - c) кілограмах;
  - d) літрах.
4. За яким ідеальним циклом працюють сучасні карбюраторні двигуни?
  - a) циклом із ізохорним підведенням теплоти;
  - b) циклом з ізобарним підведенням теплоти;

- c) циклом з змішаним підведенням теплоти;
- d) циклом Карно.

5. Карбюратор призначений для приготування і подачі в циліндр двигуна:

- a) робочої суміші;
- b) пальної суміші;
- c) повітря;
- d) бензину.

6. Для перетворення теплоти на механічну роботу служить:

- a) трансмісія;
- b) двигун;
- c) ходова частина;
- d) карбюратор.

7. Який термодинамічний цикл являється циклом теплової машини?

- a) прямий;
- b) обернений;
- c) повний;
- d) неповний.

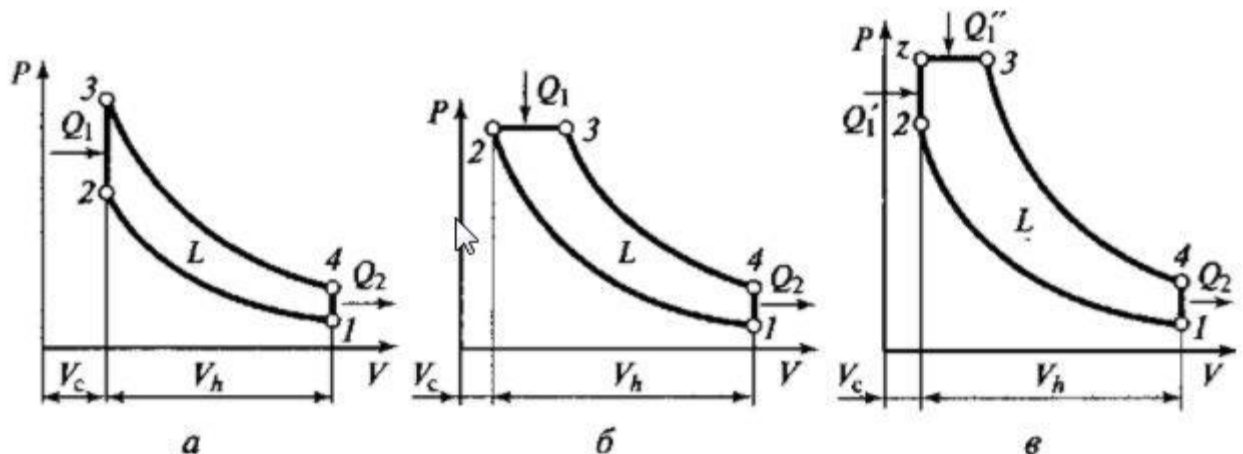
8. Чому в якості робочого тіла використовують гази або пари?

- a) гази і пари мають високі теплоємності;
- b) гази і пари можуть витримувати великі температури;
- c) гази і пари при зміні температури і тиску значно змінюють свій об'єм;
- d) гази і пари можуть існувати в різних агрегатних станах.

9. Назвіть вірний порядок роботи ДВЗ:

- a) стиск, впуск, робочий хід, випуск;
- b) такт, впуск, робочий хід, випуск;
- c) впуск, стиск, робочий хід, випуск;

10. Який з цих циклів відповідає роботі дизельного безкомпресорного двигуна ?



- a)
- b)
- c)

11. Що являється робочим тілом в ДВЗ?

- a) робоча суміш;
- b) пальна суміш;
- c) поршень;
- d) циліндр.

12. Як називають крайнє положення поршня?

- a) жива точка;
- b) такт;
- c) мертва точка;
- d) хід поршня.

13. На якому такті в карбюраторному двигуні відбувається розширення продуктів згоряння?

- a) першому;
- b) другому;
- c) третьому;
- d) четвертому.

14. Який двигун має більшу рівномірність ходу?

- a) 4-тактний;
- b) 2-тактний;
- c) 1-тактний.

### Практичні вправи

1. В циклі двигуна внутрішнього згоряння із змішаним підведенням тепла до робочого тіла підведено  $q_1=1034$  кДж теплоти, ступінь стиску газу –  $E=15$ , ступінь підвищення тиску у процесі ізохорного підведення теплоти –  $\lambda = 1,5$ , ступінь попереднього розширення газу в процесі ізобарного підведення тепла –  $\rho =1,6$ .

Визначити термічний к.к.д. циклу. За робоче тіло прийняти повітря з показником адіабати –  $K =1,4$ .

Розв'язання: Термічний к.к.д, циклу і з змішаним підведенням теплоти визначаємо за формулою:

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^\kappa - 1}{(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

$$= 1 - \frac{1,5 \cdot 1,6^{1,4} - 1}{(1,5 - 1) + 1,4 \cdot 1,5(1,6 - 1)} \cdot \frac{1}{1,5^{1,4-1}} = 0,634$$

### Запитання для самоперевірки

1. Назвіть умови, які приймають при розгляді ідеальних циклів двигунів внутрішнього згоряння.
2. Чому в реальних д.в.з. не можна здійснити ідеальний цикл Карно?
3. Запишіть і поясніть формули для визначення к.к.д. для кожного циклу.
4. За якими циклами працюють сучасні теплові двигуни?
5. Як працює одноступінчастий поршневий компресор?
6. Який процес стиску газу в компресорі є термодинамічно найвигіднішим і чому?
7. Як працює багатоступінчастий компресор?
8. Для чого застосовують багатоступінчасте стискання газу?

### Тема 2.7 Водяна пара. Вологе повітря

Фізичні та хімічні властивості води. Водяна пара, як робоче тіло. Процес утворення пари. Діаграми  $p$ - $v$ - і  $T$ - $s$  для водяної пари. Параметри стану рідини, вологої, сухої насиченої і перегрітої пари. Таблиці води і водяної пари. Фазові перетворення. Ентальпія пари.  $I$ - $s$ -діаграма водяної пари і принцип користування нею.

Вологе повітря. Його основні характеристики.  $I$ - $d$ -діаграма вологого повітря.

<https://onlinetestpad.com/hnu5ebg2tgsde>

### Теоретичні відомості

Значення водяної пари в енергетиці, сільському господарстві та інших галузях. Водяна пара – це реальний газ, тобто її параметри не можна знаходити за законами ідеальних газів. Всі розрахунки проводять за допомогою діаграм водяної пари і таблиць параметрів води і водяної пари.

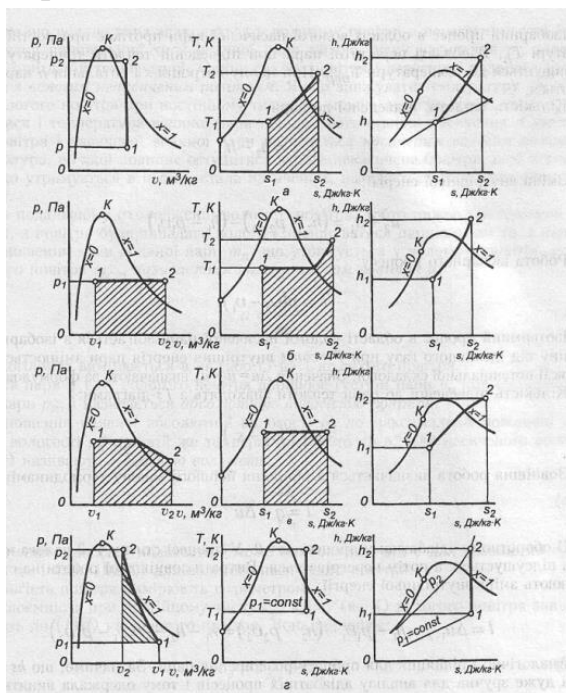


Вивчаючи водяну пару, потрібно з'ясувати яка пара є вологою, сухою, насиченою або перегрітою. Знати основні характеристики пари: міру сухості, міру вологості, міру перегріву. Необхідно розглянути залежність температури насичення від тиску.

Знати особливості користування таблицями води і водяної пари (додаток 1), а також використовувати діаграми водяної пари (додаток 10) і (рис. 2.4) для рішення практичних задач.

Потрібно знати, що основними розрахунковими величинами водяної пари є:

1. Тепло рідини (кількість тепла для нагрівання 1 кг води від 0°C до температури кипіння при даному тиску);
2. Тепло пароутворення (кількість теплоти, потрібну для перетворення 1 кг води в суху насичену пару);
3. Тепло перегріву пари (кількість теплоти, потрібну для перетворення 1 кг сухої пари в перегріту);
4. Внутрішня енергія і ентальпія пари або їх зміна; питомий об'єм, тиск і температура для різних тисків.



а – ізохорний; б – ізобарний; в – ізотермічний; г – адіабатний

Рисунок 2.4 – Діаграми процесів зміни стану пари

Повітря являється теплоносієм при вентиляції, опаленні, кондиціонуванні, а також при сушінні матеріалів, тому знання властивостей вологого повітря має велике значення.

Основними характеристиками вологого повітря є: вологовміст, абсолютна і відносна вологості. Знаходити ці величини зручно, користуючись *Id*-діаграмою вологого повітря (рис. 2.2).

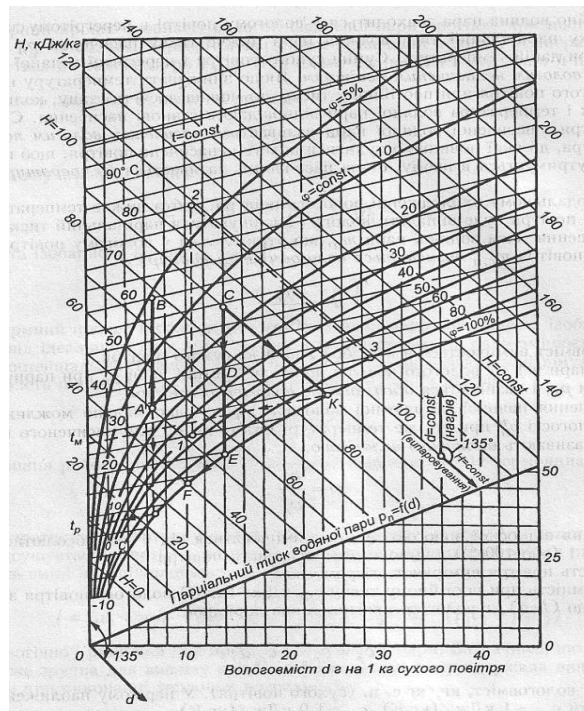


Рисунок 2.5 – *Id*-діаграма вологого повітря

### Запитання для самоперевірки

1. Як відбувається перетворення води в перегріту пару?
2. Від чого залежить температура насичення пари?
3. Дайте визначення вологості насиченої пари.
4. Поясніть суть поняття «міри сухості» пари і в яких межах вона може змінюватись.
5. Назвіть основні характеристики вологого повітря і поясніть методику використання діаграми вологого повітря.
6. Де у сільському господарстві застосовують вологе повітря?
7. Що таке абсолютна і відносна вологість повітря та вологовміст і як вони визначаються?
8. У конспекті вміти подати фрагмент *id*-діаграми і описати як вона побудована та як визначаються за нею основні параметри вологого повітря?

## РОЗДІЛ 3. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕПЛООБМІНУ

### Тема 3.1 Основні поняття і визначення. Теплопровідність

Предмет теорії теплообміну. Способи поширення теплоти. Тепловий потік, одиниці вимірювання теплового потоку. Температурне поле. Температурний градієнт.

Теплопровідність. Закон Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності та його значення для різних технічних матеріалів. Термічний опір поверхні, одиниці вимірювання.

Теплопровідність багат шарової стінки.

### Теоретичні відомості

При тепловій взаємодії тіл тепло передається від більше нагрітого тіла до менше нагрітого. Якщо різниці температур немає, то тепловий рух припиняється і настає термічна рівновага.

За другим законом термодинаміки під дією різниці температур відбувається процес переносу теплоти в просторі у бік менших значень температури. Самовільний необоротний перенос теплоти в просторі, із-за різниці температур, називається теплообміном.

Перенос маси відбувається при різниці концентрації речовини: випаровуванні, кипінні, конденсації та ін. Якщо одночасно проходить обмін і теплотою і масою, то такий процес називається тепломасообміном.

Теплообмін може здійснюватись трьома способами: теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням.

Теплопровідність (кондуктивний теплообмін) – це процес переносу теплоти при контакті тіл (або частин одного тіла), що мають різні температури. Теплопровідність обумовлена рухом мікрочасток речовини і можлива у твердих, рідких і газоподібних середовищах.

Конвекція – це процес переносу теплоти при переміщенні макрооб'єктів рідини або газу у просторі з області з одною температурою в область з іншою. При цьому на перенос тепла істотно впливає процес переносу самого середовища.

Тепловим випромінюванням називається процес переносу теплоти в просторі електромагнітними хвилями.

В дійсності в природі поширення теплоти відбувається одночасно різними видами теплообміну. Конвекція тепла завжди супроводжується

теплопровідністю (конвективний теплообмін), тому що при русі рідин та газів вони контактують з твердими поверхнями.

Процес передачі теплоти від однієї рідини до іншої через стінку називається теплопередачею.

До основних понять теплообміну відносять також температурне поле, яке являє собою сукупність значень температури для всіх точок простору в даний момент часу. Якщо температурне поле з часом змінюється, то його називають нестационарним, якщо не змінюється – стаціонарним.

Кількість теплоти, що проходить за одиницю часу через довільну поверхню  $A$  називають тепловим потоком  $Q$ , Вт.

Тепловий потік віднесений до одиниці площі поверхні називають щільністю теплового потоку або питомим тепловим потоком  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Основним законом теплопровідності являється закон Фур'є: кількість тепла, що проходить за одиницю часу через поверхню пропорційна градієнту температури.

$$Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} F, \text{ Вт}$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, який вказує на здатність тіла проводити теплоту, Вт/(м град);

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

Питомий тепловий потік або щільність теплового потоку визначається співвідношенням:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta}, \text{ Вт/м}^2.$$

Теплопровідність визначають експериментальним шляхом і вона залежить від роду речовини, її температури і тиску. Теплопровідність газів лежить в межах від 0,006 до 0,06 Вт/(м град). Для краплинних рідин – від 0,07 до 0,7 Вт/(м град).

Найкращими теплопровідниками є метали, в яких  $\lambda$  лежить в межах від 20 до 400 Вт/(м град). Із всіх металів виділяють срібло ( $\lambda = 410$  Вт/(м град)) і чисту мідь ( $\lambda = 395$  Вт/(м град)). Присутність сторонніх домішок знижує значення теплопровідності.

Теплопровідність будівельних і теплоізоляційних матеріалів має значення від 0,01 до 2,9 Вт/(м град).

Теплоізоляційними матеріалами називають тіла з низьким значенням теплопровідності (менше 0,2 Вт/(м град)).

Відношення  $\lambda/\delta$ , Вт/(м<sup>2</sup> град) називають тепловою провідністю стінки, а обернену величину  $R = \delta/\lambda$ , (м<sup>2</sup> град)/Вт – термічним опором теплопровідності стінки.

Термічний опір характеризує здатність тіла опиратися проходженню теплоти.

При розрахунку теплового потоку через багатошарову стінку закон Фур'є приймає вигляд:

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} F, \text{ Вт}$$

де  $\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}$  – сума термічних опорів тіла, (м<sup>2</sup>град/Вт).

Щільність теплового потоку визначається поділивши основну формулу на площу теплообміну  $F$ .

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\sum_1^n R_i}, \text{ Вт/м}^2.$$

При конструюванні різних теплотехнічних пристроїв підбирають тіла з меншим або більшим значеннями коефіцієнта теплопровідності. При розрахунках також має велике значення площа поверхні теплообміну і товщина поверхні. Потрібно розуміти поняття термічного опору поверхні. Закон Фур'є дає можливість розрахувати тепловий потік для одно- і багатошарової стінки

Процес теплообміну може бути тільки при умові, що в різних точках системи температури неоднакові. Температура розповсюджується по координатам і залежить від часу:

$$t = f(x, y, z, \tau).$$

### Запитання для самоперевірки

1. Які є способи поширення теплоти?
2. Як формулюють і записують основний закон теплопровідності (закон Фур'є)?
3. Як визначають густину теплового потоку для одно- і багатошарової плоскої і циліндричної стінки при теплопровідності?
4. Дайте пояснення поняттям теплової провідності та термічного опору поверхні.
5. У яких випадках теплопровідність циліндричної стінки розраховують за формулами плоскої стінки?

## Тема 3.2 Конвективний теплообмін. Променистий теплообмін

Закон Ньютона - Ріхмана. Коефіцієнт тепловіддачі та його залежність від різних умов теплообміну. Термічний опір при тепловіддачі.

Поглиналина, пропускна та відбивна здатності тіл. Поняття про абсолютно чорне та абсолютно біле тіла. Ступінь чорноти. Закони випромінювання.

### Методичні вказівки

Потрібно розібрати сутність конвективного теплообміну, тобто перенесення теплоти в рідинах та газах. Ознайомитись з математичним виразом закону Ньютона-Ріхмана. Потрібно пам'ятати, що коефіцієнт тепловіддачі залежить від багатьох факторів: властивостей рідини або газу, швидкості та характеру їх руху, форми поверхні, яка омивається тощо. Його визначають дослідним шляхом або розраховують, використовуючи теорію подібності.

Рухоме середовище, яке використовується для передачі тепла називають теплоносієм. На практиці конвекція завжди супроводжується теплопровідністю (існує постійний контакт твердих і рідких або газоподібних тіл) такий процес називають тепловіддачею. А тверда поверхня через яку проходить обмін теплоти – поверхнею теплообміну.

Інтенсивність тепловіддачі зростає із збільшенням швидкості теплоносія. На процес тепловіддачі впливають такі фактори: теплопровідність, питома теплоємність, густина, температуропровідність і в'язкість.

Для тепловіддачі справедливий закон Ньютона-Ріхмана:

$$Q = \alpha(t_c - t_p)F,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·град).

Чисельне значення даного коефіцієнту дорівнює кількості теплоти, яка віддається або сприймається з 1 м<sup>2</sup> поверхні теплообміну за одиницю часу, тобто характеризує інтенсивність тепловіддачі між стінкою і рідиною.

Значення коефіцієнту тепловіддачі визначають дослідним шляхом або розраховують, користуючись довідниками.

Тобто тепловий потік прямо пропорційний поверхні теплообміну і різниці температур поверхні і рідини. Необхідно пам'ятати, що тепловий потік не може мати від'ємного значення, тому температури розташовують у формулі таким чином: від більшої віднімають меншу.

Густина теплового потоку при тепловіддачі розраховується відповідно:

$$q = \alpha \cdot (t_c - t_p).$$

Теплообмін випромінюванням – це процес переносу теплоти електромагнітними хвилями. Цей процес відбувається у певній послідовності. Спочатку внутрішня енергія тіла перетворюється на енергію випромінювання і розповсюджується в просторі, потім ця енергія знову перетворюється на теплоту. Це єдиний вид теплообміну, який може відбуватися у вакуумі.

Ознайомтесь з поняттями абсолютно чорного та абсолютно білого тіл. Що таке випромінювальна здатність тіла і як від неї залежить ступінь чорноти. Запишіть математичні вирази законів випромінювання.

Випромінювання властиве всім тілам, температура яких більше 0°K.

Теплове випромінювання характеризують довжиною хвилі  $\lambda$  і частотою коливань  $\nu$ .

Між цими величинами існує залежність:  $\nu = C/\lambda$ , де  $C = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість поширення світла.

Випромінювання залежить від температури, в зв'язку з тим, що від  $\uparrow$  температури –  $\uparrow$  внутрішня енергія тіла і як наслідок, випромінювання тіла. Також воно залежить і від природи тіла. Більшість твердих і рідких тіл випромінюють енергію у всіх діапазонах хвиль.

В техніці користуються в основному помірними температурами, тому випромінювання відповідає довжині хвиль від  $0,8 \cdot 10^{-6}$  до  $0,8 \cdot 10^{-3}$  м. таке випромінювання відносять до теплового (інфрачервоного) випромінювання.

Променистий потік, випромінюваний за одиницю часу з одиниці поверхні в усіх напрямках називають випромінювальною здатністю тіла  $E$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Тіло, на яке падає променистий потік, частково поглинає його, частково відбиває і частково пропускає.

Тобто за законом збереження енергії:

$$E = E_A + E_R + E_D \text{ або } A + R + D = 1,$$

де  $A = E_A/E$  – поглинальна здатність тіла;

$R = E_R/E$  – відбивна здатність;

$D = E_D/E$  – пропускна здатність.

Якщо в тіла  $A = 1$ ,  $R = D = 0$ , то тіло називається абсолютно чорним.

Якщо  $R = 1$ ,  $A = D = 0$ , то тіло абсолютно біле.

Якщо  $D = 1$ ,  $A = R = 0$ , тіло діаметричне.

Для твердих тіл –  $D = 0$ .

Для абсолютно чорного тіла справедливий закон Стефана-Больцмана:

$$E_0 = \sigma_0 T^4,$$

де  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – стала Стефана-Больцмана.

Для технічних розрахунків цей закон записують так:

$$E_0 = C_0 (T/100)^4,$$

де  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) – коефіцієнт абсолютно чорного тіла.

### Практичні вправи

Проаналізувати рішення задач 3-29, 3-30 [8].

### Запитання для самоперевірки

1. У чому суть конвективного теплообміну?
2. Розмірність і фізичний зміст коефіцієнта тепловіддачі.
3. Як визначають густину теплового потоку і термічний опір при конвективному теплообміні?
4. Фактори, що впливають на величину коефіцієнта тепловіддачі.
5. Відмінність між абсолютно чорними, абсолютно білими і сірими тілами.
6. Поясніть поняття: поглинальна, відбивна, пропусчна здатності тіла.
7. Запишіть закон збереження енергії для випадку випромінювання.
8. Як записують закон Стефана-Больцмана?
9. Як визначають випромінювальну здатність сірого тіла?
10. Особливості випромінювання газів.

### Тема 3.3 Теплопередача і теплообмінні апарати

Процес теплопередачі. Теплопередача через одно- і багатошарову стінки. Коефіцієнт теплопередачі і термічний опір. Теплова ізоляція.

Теплообмінні апарати. Класифікація і основні положення теплового розрахунку. Тепловий баланс теплообмінного апарату. Середній температурний напір. Порівняльна характеристика теплообмінних апаратів з прямоточним, протиточним і з перехресним током теплоносіїв.



Характеристики теплоносіїв: переваги і недоліки.

<https://onlinetestpad.com/hn7f2zzre2cy4>

### Методичні вказівки

На практиці теплообмін проходить в сукупності. Наприклад, в котельній установці передача теплоти проходить від розжарених газів до води, що нагрівається через стінку топки. Тобто, спочатку теплота передається конвекцією і випромінюванням, а потім через стінку – теплопровідністю і далі до води конвекцією.

Передача теплоти від одного теплоносія до іншого через стінку називають теплопередачею.

Закон Ньютона для теплопередачі:

$$Q = k(t_1 - t_2)F$$

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

$F$  – площа поверхні теплообміну.

Густина теплового потоку при теплопередачі:

$$q = \kappa(t_1 - t_2).$$

Теплообмінними апаратами, або теплообмінниками, називають устаткування, призначене для передачі тепла від одного теплоносія до іншого, для реалізації теплового процесу – охолодження, нагрівання, конденсації й та ін. Як теплоносії можуть використовуватися водяна пара, вода, повітря, димові гази та інші тіла.

Традиційно теплоносієм, що має більш високу температуру й віддає тепло, називається гарячим (іноді первинним або тим, що гріє) теплоносієм, а сукупність поверхонь апарата, де він діє – гарячою стороною. Відповідно теплоносієм з нижчою температурою, що приймає тепло, називають холодним (вторинним або тим, що нагрівають) і поверхню його дії – холодною стороною.

Існуючі теплообмінні апарати можуть бути класифіковані за різними ознаками: способом передачі тепла; призначенням; типом поверхні, що передає тепло; видом теплоносіїв і їхнім агрегатним станом; компонованням поверхні нагрівання.

Рівняння теплового балансу теплообмінного апарату має вигляд:

$$Q = m^{\Gamma} c_p^{\Gamma} \Delta t^{\Gamma} = m^X c_p^X \Delta t^X, \text{ Дж},$$

де  $m^{\Gamma}, m^X$  – маса теплоносія, кг;  $c_p^{\Gamma}, c_p^X$  – ізобарні теплоємності, Дж/(кг·К);

$\Delta t^{\Gamma}, \Delta t^X$  – різниця температур.

При розрахунках теплообмінних апаратів частіше визначають площу поверхні теплообміну або потужність теплового потоку.

$$Q_1 = Q_2 = kF\Delta t,$$

де  $\Delta t$  – середній температурний напір між теплоносіями, який залежить від виду руху теплоносіїв.

При виборі того або іншого типу теплообмінника найважливішу роль відіграють теплоносії, що беруть участь у процесі теплообміну. Найбільш важливими, з погляду інтенсивності теплопередачі, є: щільність і теплоємність; теплопровідність; в'язкість; температура кипіння й плавлення.

### Контрольний тест

#### 1. Основний закон теплопровідності

- a)  $Q = \sigma_0 \cdot T^4$ ;
- b)  $Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} A$ ;
- c)  $Q = \kappa(t_1 - t_2)A$ ;
- d)  $Q = \alpha(t_1 - t_2)A$ .

#### 2. Конвективним теплообміном називають...

- a) теплообмін електромагнітними хвилями;
- b) теплообмін між твердою поверхнею і рідким тілом;
- c) перенос теплоти від одного теплоносія до іншого через стінку;
- d) перенос тепла в твердому тілі.

#### 3. Вкажіть одиниці вимірювання теплового потоку:

- a) Вт/м<sup>2</sup>;
- b) Вт;
- c) Вт/(м<sup>2</sup>град);
- d) (м<sup>2</sup>град)/Вт.

#### 4. Основний закон конвективного теплообміну має вигляд:

- a)  $Q = \kappa(t_1 - t_2)A$ ;
- b)  $Q = \alpha(t_1 - t_2)A$ ;
- c)  $Q = \sigma_0 \cdot T^4$ ;
- d)  $Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} A$ .

#### 5. Який матеріал являється кращим провідником тепла?

- a) повітря;
- b) метал;
- c) дерево;
- d) вода.

#### 6. Яке з тіл являється теплоізолятором?

- a) повітря;
- b) метал;
- c) дерево;
- d) вода.

7. Вкажіть закон Стефана-Больцмана:

- a)  $Q = \kappa(t_1 - t_2)A$ ;
- b)  $Q = \sigma_0 \cdot T^4$ ;
- c)  $A + R + D = 1$  ;
- d)  $Q = \alpha(t_1 - t_2)A$ .

8. Розрахуйте термічний опір при теплопередачі, якщо  $\kappa = 100 \text{ Вт/м}^2\text{град}$

- a)  $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{град})$ ;
- b)  $1 \text{ Вт/м}^2$ ;
- c)  $0,01 (\text{м}^2\text{град})/\text{Вт}$ ;
- d)  $0,1 \text{ Вт/м}^2$ ;

9. Вкажіть закон Ньютона для теплопередачі:

- a)  $Q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} A$ ;
- b)  $Q = \kappa(t_1 - t_2)A$ ;
- c)  $Q = \sigma_0 \cdot T^4$ ;
- d)  $Q = \alpha(t_1 - t_2)A$ .

10. Чому дорівнює тепловий потік через стінку площею  $2 \text{ м}^2$ , якщо густина теплового потоку складає  $400 \text{ Вт/м}^2$ ?

- a)  $4000 \text{ Вт}$ ;
- b)  $200 \text{ Вт}$ ;
- c)  $800 \text{ Вт}$ ;
- d)  $0,5 \text{ Вт}$ .

### Практичні вправи

Проаналізувати рішення задач 3-33, 3-37, 3-38, 3-40, 3-59, 3-62 [8].

### Запитання для самоперевірки

1. Що називається складним теплообміном (теплопередачею)?
2. Як обчислити кількість теплоти при теплопередачі через стінку за 1 год.?

3. Як визначити коефіцієнт теплопередачі? Якими є його розмірність і фізичний зміст?
4. За яких умов можна обчислити теплопередачу через циліндричну стінку, як для плоскої стінки?
5. Основні методи інтенсифікації теплопередачі.
6. Які матеріали використовують, як теплоізоляційні?
7. Як класифікують теплообмінні апарати?
8. Назвіть види теплоносіїв та дайте їм порівняльну характеристику.

## РОЗДІЛ 4. КОТЕЛЬНІ УСТАНОВКИ І ТЕПЛОГЕНЕРАТОРИ

### Тема 4.1 Паливо і його характеристики

Загальні відомості про енергетичне паливо і його класифікація. Елементарний склад твердого, рідкого і газоподібного палива. Формули перерахунку однієї маси палива на другу. Теплота згоряння палива – вища і нижча. Поняття умовного палива, тепловий еквівалент. Витрата умовного палива. Економічні аспекти використання паливно-енергетичних ресурсів.

#### Теоретичні відомості

Одним з основних джерел енергії у світі є органічне паливо. Паливом називають вуглецеву сполуку, яка в процесі хімічної реакції окислення виділяє велику кількість теплоти. Органічне паливо класифікують за агрегатним станом і за способом його отримання.

За своїм складом паливо є складною хімічною речовиною, яка складається з палих і непалих елементів. Тверде і рідке паливо за своїми компонентами однакові. Газоподібне – це суміш газів. Для побутових цілей газоподібне паливо переводять у рідкий стан.

Вміст елементів визначають у відсотках за масою. Паливо, яке йде на спалювання в топку називають робочим. Крім цього, розрізняють суху, пальну і органічну маси палива.

Основною характеристикою палива є його теплота згоряння, яка вказує на його енергетичну цінність. Визначається вища і нижча теплота згоряння за формулами Менделєєва.

Теплота згоряння це кількість теплоти, яка виділяється при повному спалюванні 1 кг або 1 м<sup>3</sup> палива.

Розрізняють вищу і нижчу теплоту згоряння і розраховують за формулами Менделєєва.

Нижча теплота згоряння для твердого і рідкого палива:

$$Q_{н}^p = 339C^p + 1025H^p - 108,5(O^p - S_{л}^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг,}$$

де  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$ ,  $S_{л}^p$  – елементи робочого складу палива, %;  $W^p$  – вологість палива, %.

Для порівняння енергетичної цінності різних видів палива та визначення витрати палива користуються поняттям «умовного палива» – це паливо, в якого теплота згоряння 29,3 МДж/кг.

При нормуванні і обліку витрати палива перераховують на витрату «умовного палива».

$$V_y = V_{\text{год}} \cdot E, \text{ кг/год}$$

де  $E$  – тепловий еквівалент, який є відношенням нижчої теплоти згоряння палива до теплоти згоряння умовного палива

$$E = \frac{Q_n^p}{Q_{\text{н.ум.}}^p}$$

Для поліпшення якості палива його переробляють механічним, термічним способом.

До механічного способу відносять промивку, сортування, брикетування мілкої фракції палива.

До термічного способу – суха перегонка палива (напівкоксування, коксування) і газифікацію.

Суха перегонка палива – це процес, який проходить при нагріванні палива без доступу повітря. При цьому процесі утворюється паливо – кокс та виділяються пари води, смоли, кислоти та інші речовини.

Газифікація – це процес, який проходить при високих температурах, в результаті якого утворюється генераторний газ за рахунок неповного спалювання палива. Генераторний газ – це енергетичне паливо, яке може використовуватись в будь-яких цілях. Газифікувати можна усі види твердого палива.

## Контрольний тест

1. Яке паливо являється штучним?

- a) кокс;
- b) сланці;
- c) антрацит;
- d) нафта.

2. Які елементи в паливі відносяться до баласту?

- a) сірка, азот;
- b) кисень, водень;
- c) кисень, азот;
- d) вуглець, водень.

3. В якому складі паливо поступає в топкові пристрої?

- a) органічному;
- b) сухому;
- c) робочому;
- d) пальному.

4. Прилад для вимірювання теплоти згоряння палива називається:

- a) манометр;
- b) калориметр;

- c) термометр;
- d) ареометр.

5. Хімічна неповнота згоряння палива є наслідком...

- a) хімічного складу палива;
- b) робочого складу палива;
- c) наявності баласту;
- d) наявності паливних елементів.

6. Який газ є результатом процесу газифікації?

- a) доменний газ;
- b) генераторний газ;
- c) біогаз;
- d) коксовий газ.

7. Назвіть одиниці вимірювання теплоти згоряння палива:

- a) Дж;
- b) Дж/кг;
- c) Вт;
- d) Вт/м<sup>2</sup>.

8. Яку теплоту згоряння має «умовне паливо»?

- a) 45,5 МДж/кг;
- b) 29,3 МДж/кг;
- c) 38,0 МДж/кг;
- d) 15,0 МДж/кг.

9. Що називають витратою палива?

- a) кількість палива, яке йде на розпалювання;
- b) процес окислення палива;
- c) кількість палива, яке згоряє за одиницю часу.
- d) теплота, яка виділяється при спалюванні 1 кг палива.

10. При якому спалюванні найбільша частка механічної неповноти згоряння палива?

- a) камерному;
- b) шаровому;
- c) факельному;
- d) вихр'явому.

### Практичні вправи

Проаналізувати рішення задач 5-1, 5-4, 5-11, 5-12, 5-65...5-67 [8].

### Запитання для самоперевірки

1. Що називають паливом і як його можна про класифікувати?
2. Які елементи входять до складу твердого і рідкого палива?
3. Поясніть поняття «баласту» палива.
4. Що таке теплота згоряння палива і як її визначають?

5. Яке паливо називають умовним? Що таке тепловий еквівалент?
6. Як визначити витрату умовного палива?
7. Запишіть формулу для визначення теоретичної кількості повітря, необхідної для спалювання палива.
8. Що таке коефіцієнт надлишку повітря?
9. Основні види палива.
10. Поясніть поняття механічної і хімічної неповноти згоряння палива.

## Тема 4.2 Процес горіння палива і способи спалювання

Суть процесу горіння. Теоретично необхідна і дійсна кількість повітря для горіння. Коефіцієнт надлишку повітря. Кінетичні і фізичні основи процесу горіння. Розрахунок продуктів згоряння. Ентальпія продуктів згоряння і теоретична температура горіння.

Шаровий, факельний і вихровий способи спалювання палива. Спалювання твердого палива. Горіння рідкого та газоподібного палива.

### Теоретичні відомості

В залежності від швидкості горіння розрізняють нормальне і вибухове горіння. Швидкість горіння – це швидкість розповсюдження полум'я. При нормальному горінні вона складає близько 20 - 30 м/с; при вибуховому – 2000-3500 м/с.

Важливою характеристикою є температура запалювання.

Для повного спалювання палива до нього необхідно підводити певну кількість повітря. При розрахунку користуються формулами теоретичної кількості повітря і дійсної. Потрібно знати, що різницею між ними є коефіцієнт надлишку повітря, який залежить від виду палива, його складу та способу спалювання.

Для спалювання палива використовують повітря, в якому є частка необхідного кисню. Кількість повітря для спалювання рідкого або твердого палива розраховують за формулами теоретичної і дійсної кількості.

Теоретична:

$$V_T = \frac{2.67C^p + 8H^p + S_L^p - O^p}{100 \cdot 0.21 \cdot 1.293}, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Дійсна:



$$V_d = \alpha V_T, \text{ м}^3/\text{кг},$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря, який залежить від виду палива і способу його спалювання.

При нестачі повітря паливо може згоряти неповністю. Слід знати поняття хімічної і механічної неповноти згоряння палива і методи їх усунення. В багатьох котельнях в димоходах встановлюють додаткові вентилятори, які збільшують тягу.

Необхідно пам'ятати, що процес спалювання палива супроводжується певними втратами, які описують поняттями хімічної і механічної неповноти згоряння палива:

- Хімічна неповнота згоряння відбувається внаслідок наявності в паливі баласту.
- Механічна – внаслідок неповного спалювання палива при нестачі кисню або при втраті палива із-за конструкції топкової пристрою.

Для спалювання палива використовують топкові пристрої. Розрізняють шарові і камерні топки.

Для шарової топки питома теплова напруга дзеркала горіння:

$$\frac{Q}{F_R} = \frac{BQ_H^p}{F_R}, \text{ кВт/м}^2,$$

де  $F_R$  – площа колосникової решітки,  $\text{м}^2$ .

Для камерних – питома теплова напруга топкового об'єму:

$$\frac{Q}{V_T} = \frac{BQ_H^p}{V_T}, \text{ кВт/м}^3,$$

де  $V_T$  – об'єм топкового простору,  $\text{м}^3$ .

Правильна організація топкового процесу дає можливість економити енергоресурси.

### **Практичні вправи**

Проаналізувати розв'язання задач 5-1; 5-4; 5-5; 5-11; 5-12, 77, 79 [8].

### **Запитання для самоперевірки**

1. Основні положення кінетичних і фізичних основ горіння.
2. Поясніть поняття хімічної і механічної неповноти згоряння палива.
3. Що таке коефіцієнт надлишку повітря?
4. Як визначити теоретичну і дійсну кількість повітря для спалювання палива?
5. Як визначити об'єм продуктів згоряння?

6. Що таке питома теплова напруга і як її визначають?
7. Дайте характеристику основних видів палива.
8. Що таке швидкість горіння і від чого вона залежить?

### **Тема 4.3 Котельні установки і топкові пристрої**

Котельні установки (КУ), їх типи і призначення. Принципова схема КУ. Основне і допоміжне обладнання КУ. Склад котельного агрегату.

Тепловий баланс і коефіцієнт корисної дії котельного агрегату. Годинна витрата палива.

Топки для спалювання палива. Схеми будови пальників. Очищення топок від золи і шлаку. Радіаційні поверхні і екрани в топках.

Водопідготовка. Підготовка палива для спалювання. Допоміжні поверхні нагріву.

Особливості експлуатації котлових установок.

<https://onlinetestpad.com/hom36c7bts2nq>

### **Теоретичні відомості**

Ознайомтесь з загальною схемою будови і роботи котельної установки. Необхідно вивчити формули теплового балансу і к.к.д. котельного агрегату. Аналізуючи дані формули розберіться з шляхами підвищення економічності та оптимізації роботи котельного агрегату.

Слід звернути увагу на допоміжні поверхні нагріву і їх використання в котельному агрегаті.

Підготовка і економічне використання палива має велике значення для виробничих котелень. Тому зверніть увагу на конструкції топок і способи спалювання палива.

Особливу увагу зверніть на правила експлуатації котельної установки, основні правила безпеки і пожежної безпеки при її роботі.

Котельна установка це комплекс пристроїв та агрегатів, призначених для одержання пари або гарячої води за рахунок спалювання палива або використання інших джерел теплоти.

Склад котельної установки визначається її призначенням і місцем використання. Котельна установка має допоміжне обладнання, що служить для підготовки та подавання палива, води, повітря, видалення і очищення димових газів, видалення золи і шлаку.

Класифікація котельних установок досить широка, але можна виділити

декілька основних параметрів.

За призначенням КУ поділяють:

- парові (для вироблення пари);
- водогрійні (для вироблення гарячої води).

2. В залежності від характеру споживачів:

- енергетичні;
- виробничо-опалювальні;
- опалювальні.

3. По циркуляції води і пари в КУ:

- з природньою циркуляцією;
- з примусовою, за допомогою насосів.

Основними характеристиками котельної установки визначають такі параметри:

для парових котлів: паропродуктивність, тиск пари, температура пари і живильної води;

для водогрійних котлів: теплова потужність, температура гарячої і зворотної води, розрахунковий тиск у котлі.

*Паропродуктивність* – це кількість пари, що виробляє котел за одиницю часу (т/год, кг/сек.). Номінальна продуктивність – це найбільша продуктивність, яку забезпечує котел.

*Теплова потужність* водогрійних котлів визначається кількістю теплоти, МВт, що відпускається котлом за одиницю часу.

В сільському господарстві застосовують котли тільки середньої і малої продуктивності.

Маркування парових котлів визначається стандартом, в якому вказують:

- тип котла (наприклад, Е – з природною циркуляцією пароводяної суміші, Пр – з примусовою циркуляцією, П – прямотоковий);
- паропродуктивність, т/год;
- тиск пари;
- вид палива (Г – газоподібне, М- мазут, Т – тверде паливо);
- система шлаковидалення (Т, Ж – тверде і рідке шлаковидалення);
- С – шаровий спосіб спалювання.

Наприклад, котел Е-1-Г – це паровий котел з природною циркуляцією, продуктивність – 1 т/год, працює на газі; КТ-500 – паровий котел виробляє 500 кг/год пари, працює на твердому паливі; КВ-ГМ-10 – котел (водонагрівач), працює на газі або мазуті, теплова потужність 10 Мкал/год.

Для оцінки роботи котельної установки складають тепловий баланс, який характеризує рівність між приходом і витратою теплоти, а також враховує теплові втрати:

$$Q_{\text{прих.}} = Q_{\text{кор.}} + Q_{\text{втр.}}$$

$$Q_{\text{прих.}} = V_{\text{год.}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \text{ кДж/год.}$$

Сума втрат теплоти може відрізнятися, в залежності від виду палива і способу спалювання.

$$Q_{\text{втр.}} = Q_{\text{д.г.}} + Q_{\text{н.с.}} + Q_{\text{х.н.}} + Q_{\text{м.н.}} + Q_{\text{шл.}}, \text{ кДж/год}$$

$Q_{\text{д.г.}}$  – втрати теплоти з димовими газами;

$Q_{\text{н.с.}}$  – втрати в навколишнє середовище;

$Q_{\text{х.н.}}$  – втрати від хімічної неповноти згоряння;

$Q_{\text{м.н.}}$  – втрати від механічної неповноти згоряння;

$Q_{\text{шл.}}$  – втрати теплоти із шлаком.

Розрахунок економічності роботи оцінюється термічним коефіцієнтом корисної дії.

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{кор.}}}{Q_{\text{прих.}}} = \frac{D(i_{\text{п.}} - i_{\text{ж.в.}})}{V_{\text{год.}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}} 100\% ,$$

де  $D$  – паропроодуктивність КУ, кг/год;

$i_{\text{п.}}$ ,  $i_{\text{ж.в.}}$  – ентальпії пари і живильної води, Дж/кг;

$V_{\text{год.}}$  – годинна витрата палива, кг/год;

$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – теплота згоряння палива, кДж/кг.

Важливим фактором роботи котельної установки є використання вторинної теплової енергії і очистка димових газів.

### Практичні вправи

Проаналізувати розв'язання задач 6-1; 6-17, 6-82, 6-83 [8].

### Запитання для самоперевірки

1. Наведіть класифікацію котельних установок.
2. З яких елементів складається котельна установка?
3. Запишіть і поясніть рівняння теплового балансу КУ.
4. Як визначити К.К.Д. котельної установки?
5. Поясніть як і для чого проводять підготовку живильної води?
6. Які прилади автоматики застосовують в роботі КУ?
7. Поясніть способи очищення димових газів?
8. Де і для чого можна використати теплоту димових газів?
9. Як визначити годинну витрату палива КУ?
10. Назвіть способи підвищення економічності котельного агрегату.

## **Тема 4.4 Котли і теплогенератори**

Котли малої продуктивності. Класифікація і марки котлів. Внутрішньокотлові процеси. Котли - утилізатори. Порядок гідравлічного випробовування котлів. Забезпечення надійності і економічності роботи котельних установок.

Призначення і будова теплогенераторів. Їх характеристики. Паливна система. Автоматичне регулювання.

Техніка безпеки і пожежна безпека при роботі з котлами і теплогенераторами.

Екологічні аспекти роботи котлів і теплогенераторів.

### **Теоретичні відомості**

Вивчаючи конструктивні особливості водогрійних і парових котлів, слід зосередити увагу на котлах малої і середньої продуктивності, які використовуються в сільському господарстві.

Велике значення мають внутрішньокотлові процеси: гідродинаміка і водний режим в котлі. Циркуляція води в ньому може відбуватися природнім або штучним способом. Швидкість циркуляції води знаходиться в межах 0,5-1,5 м/с; кратність циркуляції води в контурі – в межах 4-20 для екранів і 10-100 для контурів, що складаються з барабанів.

Теплогенератори відносять до вентиляційно-опалювальних установок, які широко використовуються в сільському господарстві для повітряного опалення і вентиляції виробничих приміщень. Зверніть увагу на формули теплового балансу і к.к.д. теплогенератора.

Потрібно звернути увагу на автоматизацію роботи теплогенератора.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Які типи котлів використовують в сільському господарстві?
2. Опишіть будову і принцип дії котла.
3. Як підготувати живильну воду і підтримувати рівень води в котлі?
4. Які правила експлуатації котлів?
5. Назвіть основні вимоги до циркуляційного контуру КУ.
6. Назвіть альтернативні способи отримання теплової енергії.
7. Що виробляє теплогенератор?
8. Поясніть принцип роботи теплогенератора.

9. Поясніть в чому полягає суть автоматичного регулювання котла і теплогенератора.

10. Назвіть основні правила техніки безпеки при експлуатації теплогенеруючого обладнання.

## РОЗДІЛ 5. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОТИ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

### Тема 5.1 Енергозаощадження в сільському господарстві

Роль тепла в енергетичному балансі сільського господарства. Сучасний стан і перспективи розвитку сільськогосподарської теплоенергетики та використання тепла в сільському господарстві. Загальна характеристика і класифікація споживачів тепла в сільському господарстві.

Енергозбереження в с.-г. Використання вторинних, поновлювальних джерел енергії.

Норми і графіки теплоспоживання. Визначення кількості тепла, необхідного для опалення, вентиляції, гарячого водопостачання і технологічних потреб.

Слід пам'ятати, що в загальному енергетичному балансі сільського господарства теплова енергія становить біля 90%. Велика кількість її витрачається на опалення виробничих, житлових і громадських приміщень, створення штучного мікроклімату в тваринницьких приміщеннях і спорудах захисного ґрунту, сушіння сільськогосподарської продукції, виробництво вітамінної трав'яної муки та на інші цілі.

Треба звернути увагу на те, що тепlopостачання сільського господарства суттєво відрізняється від централізованого тепlopостачання міст.

Споживачі тепла у сільському господарстві в більшості випадків є малопотужними і використовують його протягом року нерівномірно.

Переведення сільського господарства на промислову основу створює сприятливі умови для використання електричної і теплової енергії.

Потрібно засвоїти методику визначення витрати тепла для різних потреб за розробленими укрупненими нормами теплоспоживання.

Під енергетичними ресурсами розглядають природні джерела енергії, придатні для використання в народному господарстві. Потреба в них прийнято оцінювати в «умовному паливі». Теплота згоряння умовного палива була прийнята і, рівна 29,3 МДж/кг.

Згідно Положенню про державний енергетичний нагляд кожний новий технічний захід повинен бути обґрунтований з позицій раціонального використання енергії. Наприклад, у багатьох випадках по наведених витратах економічно опалювати приміщення електроенергією. Проте це може привести до перевитрати первинного енергоресурсу – вугілля, тому електроопалення часто не допускається.

Витрату природних енергоресурсів в сільському господарстві (в тоннах умовного палива) можна розрахувати по формулі:

$$B_y = \sum_1^n \frac{qB}{29.3 \cdot 10^6 \eta},$$

де  $n$  – вид енергоресурсу, що використовується;

$q$  – теплота згоряння робочого палива, кДж/ кг;

$B$  – витрата робочого палива;

$\eta$  – ККД добування палива й його транспортування до сільськогосподарського споживача.

Якщо в господарстві користуються штучно створеними енергоносіями, наприклад паром, електроенергією, гарячою водою й т. д., потреба в яких також потрібно враховувати, то розрахунок проводять за формулою:

$$B_y = \sum_1^m \frac{R_n W_n}{\eta_b},$$

де  $m$  – вид енергоносія;

$R_n$  – коефіцієнт переводу штучного енергоносія в умовне паливо;

$W_n$  – потрібна витрата енергоносія в сільськогосподарському виробництві, кВт·год / кДж; кВт·год, кг і т. п.);

$\eta_b$  – коефіцієнт корисного використання (к.к.в.) первинного енергоресурсу в сільськогосподарському виробництві.

Коефіцієнти перекладу еквівалентної енергії енергоносіїв в умовне паливо:

- електрична і механічна енергія –  $0,123 \cdot 10^{-3}$  кВт·год;
- теплова енергія –  $0,034 \cdot 10^{-5}$  кДж;
- енергія пари –  $91,5 \cdot 10^{-6}$  кг.

Коефіцієнт  $\eta_b$  відображає ефективність використання первинних енергетичних ресурсів на всіх стадіях виробництва: в добуванні ( $\eta_d$ ), при переправці ( $\eta_{тр}$ ), переформуванні в інший вид енергії ( $\eta_r$ ), його передачі ( $\eta_p$ ) й розподілі ( $\eta_r$ ), при користуванні споживачем ( $\eta_{сп}$ ). Величина  $\eta_b$  – може бути підрахована так:

$$\eta_b = \eta_d \eta_{тр} \eta_r \eta_p \eta_{сп}$$

При виборі ж енергозберігаючої технології слід застосовувати методи їх порівняльної оцінки.

Всі джерела енергії ділять на дві групи: з обмеженими і практично необмеженими запасами. До першої групи віднесені всі енергоресурси, що не відновлюються (вугілля, сланці, нафта, природний газ) і електроенергія, одержувана за рахунок їх спалювання.

Друга група включає відновлювані і вторинні енергоресурси, а саме: енергію вітру, променисту енергію сонця, енергію морських припливів й



відливів, водостоків, не освоєних «великою енергетикою», відходів виробництва, біоенергію, геотермальну енергію. Їх використання не приводить до виснаження запасів викопного палива. Враховуючи це, для вимірювання й визначення енергозберігаючої техніки й технології кожного технологічного процесу користуються формулою розрахунку потреби в енергоресурсах:

$$B_y = \frac{k_b \omega_n}{29,3 \cdot 10^6 \eta},$$

де  $k_b$  – коефіцієнт, що враховує частку невідновлюваних енергоресурсів, використаних в технологічному процесі;

$\omega_n$  – корисна витрата енергії в технологічному процесі на одиницю продукції, кДж.

Коефіцієнт  $k_b$  для невідновлюваних видів палива й енергії, одержуваної від енергосистем, приймають  $= 1$ ; для відновлюваних і вторинних енергоресурсів, а також одержуваної за їх рахунок електроенергії –  $k_b = 0$ .

Наприклад: Визначити потребу в умовному паливі процесу по приготуванню гарячої води на молочно - товарній фермі, що дає 1200 т молока в рік, якщо для нагрівання води використовується 70% електроенергії, одержуваної від енергосистеми ( $k_b = 0,7$ ;  $\eta_a = 0,28$ ), і 30% сонячної радіації, питома корисна потреба в тепловій енергії  $\omega_n = 0,252 \cdot 10^6$  кДж/т.

Розв'язок: Питома потреба в умовному паливі складає:

$$B_y = \frac{0,7 \cdot 0,252 \cdot 10^6}{29,3 \cdot 10^6 \cdot 0,28} = 0,0215 \text{ т}$$

Загальна для ферми  $B_y = 0,0215 \cdot 1200 = 25,8$  т.

В практиці часто корисна витрата енергії  $\omega_b$  – невідомий, але відома кількість енергоносія, що витрачається.

Коли порівняльні варіанти розрізняються дією на оточуюче середовище, то для усунення цих відмінностей потрібні додаткові енергоресурси.

У сфері навколишнього середовища сільське господарство в основному впливає на землю і воду. Наприклад, землю займають під різні забудови і відходи сільськогосподарського виробництва, а воду забруднюють хімікатами або витрачають для потреб сільського господарства і населення.

Відповідно додаткові затрати енергоресурсів  $B_d$  складається з таких складових:

$$B_d = \Delta B_3 + \Delta B_B,$$

де  $\Delta B_3$  – додаткова витрата енергоресурсів на відновлення землі;

$\Delta B_B$  – додаткова витрата енергоресурсів на відновлення води.

Додаткова витрата енергоресурсів  $\Delta B_3$  встановлена за умови, що в дану годину практично вже відсутні вільні землі, зручні для сільськогосподарського виробництва, і при відведенні орної ділянки під будівлі, споруди й т. д. потрібні енергозатрати на освоєння нових земель. Тому величину  $\Delta B_3$  можна розраховувати так:

$$\Delta B_3 = b_{нз} F E_n,$$

де  $b_{нз}$  – питома витрата енергоресурсів на освоєння нових земель (меліорація, планування і т. і.). В середньому  $b_{нз} = 600$  т у. т/га;

$F$  – площа займаної території, га;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень в сільському господарстві.

Збільшення витрати води вимагає перерозподілу водних ресурсів країни за рахунок будівництва зрошувальних систем.

Енергоресурси, які мають витрачатися для цього досягають питомої величини  $b_{нз} = 0,04$  т у. т. на  $1 \text{ м}^3$ . Розраховують загальну величину  $\Delta B_B$  буде:

$$\Delta B_B = b_{нз} V_B,$$

де  $V_B$  – потреба в додатковій витраті води,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Які перспективи поліпшення теплопостачання в сільському господарстві?
2. В чому полягає специфіка теплопостачання сільськогосподарських підприємств?
3. Назвіть основних споживачів тепла у сільському господарстві.
4. Поясніть поняття – «енергозбереження»
5. Поясніть поняття – «енергоефективність»
6. Значення використання альтернативних джерел енергії.
7. Які заходи потрібно застосовувати для зменшення енергетичного навантаження на обладнання?
8. Як можна зменшити витрати за рахунок використання біоенергоресурсів?

## **Тема 5.2 Опалення і гаряче водопостачання сільськогосподарських приміщень**

Класифікація систем опалення і значення для підприємств сільського господарства. Принцип розрахунку теплових втрат приміщенням. Водяне опалення з природною і примусовою циркуляцією. Нагрівальні прилади систем опалення. Розрахунок площі поверхні нагріву і підбір нагрівальних приладів.

Гаряче водопостачання (ГВП). Класифікація систем і принципові схеми ГВП. Витрата теплоти на ГВП, норми теплоспоживання.

### **Теоретичні відомості**

Використання теплової енергії для різноманітних потреб визначає теплове споживання людства.

Споживачів теплоти у сільському господарстві поділяють на дві групи: виробничі та комунально-побутові.

До виробничих споживачів теплоти відносяться: рослинницькі, тваринницькі підприємства, об'єкти загального виробничого призначення.

Комунально-побутові споживачі використовують теплоту для опалення, гарячого водопостачання та інші потреби. Для потреб сільського населення із загальної кількості теплоти, вироблюваної у сільському господарстві, використовуються 65...70% .

Згідно із призначенням споживачів теплоти поділяють на: вентиляційні, опалювальні, технологічні, гаряче водопостачання тощо.

Залежно від характеру зміни у часі теплові навантаження споживачів поділяють на сезонні та цілорічні.

Сезонними споживачами теплоти є системи вентиляції, опалення, та кондиціонування повітря. Основний вплив на величину і характер зміни сезонного теплового навантаження чинить температура зовнішнього повітря. Через невелику, зміну температури і значну акумулюючу здатність споруди, витрата теплоти протягом доби у сезонних споживачів змінюється відносно мало. Річний графік таких споживачів, навпаки, має різко змінний характер: найбільша витрата теплоти у найхолодніші зимові місяці і нульова витрата у літній період. Влітку теплота частково може бути використана для вироблення холоду в абсорбційних холодильних установках.

До цілорічних відносять технологічних споживачів і ГВП комунально-побутових споживачів. Деякі галузі промисловості, зокрема пов'язані із переробкою сільськогосподарської продукції, мають змінний характер.

Технологічне навантаження і гаряче водопостачання мало залежать від зовнішньої температури. Проте річні графіки технологічного навантаження ГВП певною мірою залежать від періоду року. Влітку теплове споживання менше, ніж узимку через більш високі температури, переробленої сировини, а також менші значення тепловтрат теплопроводів. Добовий графік теплоспоживання для технологічних потреб і гарячого водопостачання має змінний характер.

В сільській місцевості теплопостачання здійснюється часто індивідуально, але є можливість використання теплової мережі. В такому випадку є певні особливості, які пов'язані із значними коливаннями навантаження та розташуванню теплоспоживачів на великій площі.

Теплова мережа – система трубопроводів, по яких теплоносій (гарячої води чи пари) передається від генератора до споживачів тепла.

Тому схема теплової мережі визначається в залежності від певних факторів:

- розміщенням джерела теплопостачання і споживача теплової енергії;
- характеру теплового навантаження споживачів;
- видом теплоносія.

В загальному прокладають теплову мережу: магістральну, розподільну та відгалужену.

Теплові мережі за призначенням поділяють на мережі опалення, вентиляції і мережі гарячого водопостачання. Найбільш широко використовують водяні системи, але можуть бути використані і інші теплоносії.

Крім теплової мережі необхідно забезпечити комплекс пристроїв і апаратів, які будуть забезпечувати обігрів приміщень в холодний період року.

Опалювальна система в основному складається з таких компонентів, як генератор теплоти, теплопроводи, опалювальні прилади.

Передача тепла в системі може здійснюватися за допомогою різних теплоносіїв – води, пари, повітря, димових газів.

Завдання, які вирішує система опалення наступні:

- Дотримання санітарно-гігієнічних норм по температурі повітря приміщень.
- До того ж поверхні опалювальних приладів не повинні бути занадто гарячими, щоб не викликати опік, або мати спеціальні огороження.
- Згідно з нормативними документами система опалення повинна бути малошумною, екологічною і безпечною в роботі.

- Пристрій системи опалення має мати економічне обґрунтування. Система повинна бути спроектована таким чином, щоб мінімізувати витрати на обладнання, монтаж та експлуатацію.
- Опалювальні системи повинні бути надійними в експлуатації і довговічними.
- Сучасні системи опалення забезпечені системою автоматики, що значно спрощує управління та обслуговування.

Теплова потужність опалювальних приладів визначається на основі рівняння теплового балансу приміщення:

$$Q_{\text{оп.}} = Q_{\text{втр.}} - Q_{\text{над.}}$$

де  $Q_{\text{втр.}}$  – теплові втрати через огороження приміщення, Вт;

$Q_{\text{над.}}$  – теплові надходження, Вт.

Теплові втрати визначають як суму втрат теплоти через зовнішні огороження (стіни, стелю, підлогу, вікна, двері). Додаткові втрати тепла через зовнішні стіни і вікна складають 25% від загальних (15% на вітер і 10% на етажність будівлі). Витрати через підлогу визначаються за окремими зонами – смугами по двом паралельним зовнішнім стінам. Формуються зони, починаючи від стін. Втрати теплоти не враховуються, якщо різниця температур складає не більше 5°C.

Системи опалення класифікують:

1. Водяне опалення – обігрів приміщення, при якому, здійснюється за допомогою передачі тепла від рідкого теплоносія повітряному середовищу приміщення.
2. Повітряне – система опалення, принцип роботи якої полягає в обігріві приміщення потоком гарячого повітря.
3. Панельно-променисте опалення, де передача тепла відбувається шляхом інфрачервоного випромінювання від більш нагрітих поверхонь до менш нагрітих.
4. Парове – обігрів відбувається водяною парою низького (0,15...0,17 МПа) або високого тиску (0,17...0,47 МПа).
5. Пічне – опалення здійснюється печами.

### Запитання для самоперевірки

1. В чому особливість тепlopостачання сільськогосподарських підприємств?
2. Як класифікують системи опалення і гарячого водопостачання?
3. Методика визначення теплових втрат с.-г. приміщення.
4. Які нагрівальні прилади слід використовувати в с.-г. і як їх вибирати?

5. Назвіть нетрадиційні види теплопостачання с.-г. приміщень.
6. Назвіть способи зменшення теплових втрат приміщень.

### **Тема 5.3 Вентиляція сільськогосподарських приміщень**

Призначення і класифікація системи вентиляції. Шкідливі виділення і гранично допустимі концентрації їх у повітрі різних приміщень. Розрахунок повітрообміну за різними видами шкідливих виділень. Принципові схеми систем вентиляції. Підбір вентиляторів. Кондиціонування повітря. Експлуатація системи вентиляції.

<https://onlinetestpad.com/hmrtg6tm37mek>

#### **Теоретичні відомості**

На сучасному етапі розвитку сільського господарства дуже важливу роль відіграє створення оптимального мікроклімату в приміщеннях різного призначення. При високій вологості повітря і пониженій температурі збільшуються витрати кормів на 20%, зменшуються надой молока на 10%, знижується несучість курей на 4-5%. Порушення мікроклімату призводить до підвищеного розмноження бактерій і шкідливих мікроорганізмів.

В процесі роботи в с.-г. приміщеннях на фермах, теплицях, сховищах та інших до повітря надходять надлишки теплоти, вологи та шкідливих газів. Біохімічні процеси в посліді, гної, ґрунті також впливають на загальний мікроклімат приміщення. Від тварин теплота передається внутрішнім поверхням огороження як конвекцією так і випромінюванням.

Повітря безперервно рухається. Рух повітря може бути вільним та примусовим. Цим обумовлена внутрішня конвекція, зовнішня відбувається за рахунок вітрового тиску.

Внаслідок виділення водяної пари і газів, крім теплообміну в приміщенні відбувається масообмін, що особливо важливо під час сушіння та кондиціонування.

Через огорожувальні конструкції теплота передається теплопровідністю. Пам'ятаємо, температура зовнішнього повітря постійно змінюється, як протягом доби так і відповідно до пори року. Змінюється також інтенсивність сонячної радіації, швидкість і напрямок вітру. Усе це створює нестаціонарний режим теплообміну через огороження.

Створення оптимального мікроклімату у приміщенні по температурі, швидкості руху повітря, його вологості, хімічній і мікробній чистоті та

запиленості – це основна задача для функціонування будь-якого виробництва.

Тепловий баланс кожної поверхні огорожуючи конструкцій записується рівнянням:

$$T_i + K_i + P_i = 0$$

де  $T_i$ ,  $K_i$ ,  $P_i$  – кондуктивна (теплопровідність), конвективна та промениста складові теплообміну в приміщенні. Цим рівнянням враховують параметри теплових потоків і так описує тепловий режим приміщення.

Усі огорожувальні конструкції будівель мають відповідати основним вимогам: надійність теплозахисту, довговічність, ремонтноздатність, вогнестійкість та відповідати технічним нормам.

Класифікація:

1. За формою та виглядом: рулонні та штучні вироби (плити, блоки та ін.);
2. Зовнішні огороження поділяють за:
  - кількістю шарів;
  - ступенем теплової інерції;
  - наявністю екранів;
  - розташуванням в плані будівлі.

До теплоізоляційних відносять матеріали з теплопровідністю не більше  $0,175 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  при температурі  $25^\circ\text{C}$  і густиною не більше  $600 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Більшість теплоізоляційних матеріалів – це складні капілярно-пористі тіла, пори яких заповнені повітрям або вологою в різному агрегатному стані. Зміна кліматичних умов може призвести до зміни теплофізичних характеристик будівельних матеріалів та конструкцій в цілому.

Основні теплофізичні характеристики: питома теплоємність, теплопровідність та густина (щільність). Також важливим є волого- і повітропроникність.

Збільшення пористості матеріалу призводить до зменшення коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$ , тобто повітря, яке має низьку теплопровідність збільшує термічний опір поверхні.

Із збільшенням вологості теплопровідність зростає і термічний опір зменшується досить суттєво. Для порівняння: будівельні матеріали мають теплопровідність в межах  $0,1 \dots 1,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , а теплоізоляційні –  $0,045 \dots 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Теплофізичні характеристики ґрунтів залежать від його природи та структури та від зовнішнього впливу вологи. Волога рухається в ґрунті, як у

вигляді пари так і у крапельному стані. Із збільшенням вологості теплопровідність зростає.

1) Природній повітрообмін не може забезпечити оптимальних параметрів мікроклімату в приміщенні, а він повинен бути стійким. Тому важливо пам'ятати про теплові втрати через огорожуючі поверхні.

Співвідношення між коливаннями теплового потоку і температурою на поверхні огороження називають коефіцієнтом тепло засвоєння  $Y$ , а залежність теплового потоку в огороженні від температури повітря – коефіцієнт тепло поглинання  $B$ . Співвідношення між ними та коефіцієнтом тепловіддачі конвекцією:

$$B = \frac{C}{\frac{1}{Y} + \frac{1}{\alpha_k}}$$

де значення  $C = 1,05$ .

Добуток коефіцієнту поглинання огорожень на площу поверхні визначає значення тепло поглинання приміщення:

$$P = \sum_{1}^n B_i A_i$$

Чим більше значення  $P$ , тим тепловий режим у приміщенні більш стійкий до коливань джерел і потоків теплоти.

2) Джерелами виділення вологи в с-г. приміщеннях є самі тварини, відкриті мокрі поверхні, засоби утримання тварин (напувалки, апарати подачі води і кормів тощо), а у теплицях і сховищах – виділення у вигляді випаруваної вологи.

Висока відносна вологість збільшує поширення інфекційних захворювань та збільшує тепловтрати приміщення.

Грамотно підібрана система вентиляції дозволяє вчасно вивести з приміщення надлишок вологи. Повітря, яке утримує в собі шкідливі домішки, концентрація яких перевищує допустимі норми, видаляється з приміщення і замінюється чистим атмосферним повітрям.

Без створення мікроклімату важко одержати високу продуктивність тварин. При пониженій температурі і високій вологості повітря на 20% збільшуються витрати кормів, на 10% зменшуються надої молока.

По призначенню вентиляційні системи діляться на витяжні, приточні і приточно-витяжні. По способу переміщення повітря вентиляція може бути природною і штучною, а по організації повітрообміну в приміщеннях – загальною, місцевою і змішаною. Подачу вентиляторів приймають на 10 – 15% більшою за необхідний повітрообмін.



Повітрообмін тваринницьких приміщень розраховують по теплоті та кількості надлишкової вологи з перевіркою на вуглекислоту.

Природній повітрообмін не може забезпечити оптимальних параметрів мікроклімату, тому приміщення обладнують припливно-витяжною вентиляцією.

Потрібно знати, що подачу вентиляторів приймають на 10...15% більшою за необхідний повітрообмін. А тепловіддача калорифера повинна бути на 15...20% більшою за розрахункову кількість теплоти для нагрівання вентиляційного повітря.

Студенти повинні ознайомитись з методикою розрахунку повітрообміну за наявності шкідливих виділень і підбору вентиляційного обладнання за кратністю повітрообміну.

Потрібно знати будову і принцип дії вентиляційно-опалювальних установок: теплогенераторів, калориферів, ПВУ, комплекту обладнання «Клімат», кондиціонерів.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Що таке мікроклімат, назвіть його параметри.
2. Які шкідливі виділення присутні в сільськогосподарських приміщеннях, їх допустима концентрація?
3. Поясніть принцип роботи газоаналізатора.
4. Як визначити необхідний повітрообмін у приміщенні?
5. Що таке кратність повітрообміну і в яких межах вона повинна бути для с.-г. приміщень?
6. Методика підбору вентиляторів та калориферів для с.-г. приміщення.
7. Вентиляційно-опалювальні установки «Клімат», застосування і принцип роботи.
8. Рекуперація повітря, види рекуператорів.

### **Тема 5.4 Основи процесу сушіння**

Основи процесу сушіння. Поняття про сушіння та його значення. Характеристика вологого матеріалу і агентів сушіння. Природне і штучне сушіння матеріалів. Основи теорії сушіння. Механізм і кінетика процесу сушіння. Тепло- і масообмін вологих матеріалів з агентом сушіння і оточуючим середовищем. Тривалість сушіння матеріалів.

Теплові режими сушіння. Способи сушіння і класифікація сушильних установок за способом підведення тепла, якістю і тиском сушильного агенту, характером роботи та іншими особливостями. Принципіальні схеми конвективних сушарок. Тепловий розрахунок конвективної сушарки.

Матеріальний баланс. Витрата сушильного агенту. Витрата тепла на сушіння. Теоретичний і дійсний процеси сушіння за *id*-діаграмою. Розрахунок процесу охолодження матеріалу. Визначення основних розмірів конвективної сушарки. Використання сонячної енергії для сушіння.

<https://onlinetestpad.com/hpcud3hyngaeay>

## Теоретичні відомості

У сільськогосподарському виробництві широкого розвитку набуло сушіння зерна, овочів, плодів, картоплі, зелених кормів для тварин і птиці тощо.

Особливу увагу слід приділити сушінню зерна як основного продукту сільського господарства

Для довготривалого зберігання зерно сушать до кондиційної вологості 14...16%. Щорічно підлягає сушінню величезна кількість зерна – біля 45% валового збору.

Процес видалення вологи з тіла супроводжується порушенням зв'язку вологи з матеріалом, на що витрачається енергія. Від характеру такого зв'язку залежить вибір режиму сушіння. Форми зв'язку вологи з матеріалом класифікують за енергетичним принципом (класифікація П.А. Ребіндера). Розрізняють хімічну, фізико-хімічну і фізико-механічну форми.

*Хімічний зв'язок* утворюється в результаті хімічної реакції. Тобто і волога може бути видалена тільки хімічно. В технологічних процесах така волога не видаляється.

*Фізико-хімічний зв'язок* включає в себе наступні форми: адсорбційну і осмотичну. Адсорбційна волога утримується на поверхні частин тіла і при підведенні теплоти видаляється у вигляді пари. Осмотична волога проходить всередину колоїдного тіла і викликає набухання тіла. Видаляється в результаті дифузії при наявності градієнту концентрації вологи.

До *фізико-механічного зв'язку* відносять поверхневу і капілярну вологу. Вона може бути видалена механічним способом або випаровуванням.

Незалежно від форми зв'язку розрізняють зовнішню і гігроскопічну вологу. Гігроскопічна волога в процесі сушки не видаляється повністю із тіла.

Теплоносієм, або сушильним агентом, при сушінні зерна може бути атмосферне повітря, підігріте у калорифері, або суміш повітря з пічними газами.

Сільськогосподарська продукція в основному має структуру колоїдно-капілярних тіл. Вологий матеріал складається із твердої основи і вологи. В порах основи є повітря, але його маса значно менша за масу вологи, тому масу повітря не враховують.

Для організації процесу сушіння необхідно вивчити властивості вологого матеріалу:

1. Структурні:

питома поверхня;

густина загрузки;

властивість створювати аеродинамічний опір.

2. Гідромеханічні:

вологість;

вологівміст;

концентрація вологи.

3. Теплофізичні:

питома теплоємність;

теплопровідність;

температуропровідність.

4. Технологічні:

допустима температура,

пожаро- і вибухонебезпечність;

небезпека розкладання продукту;

виділення ядовитих речовин.

*Структурні властивості вологого матеріалу:*

Питома поверхня – відношення поверхні частин продукту в 1 кг до об'єму, який вони займають.

Чим більша питома поверхня, тим легше відбувається сушіння.

Для пшениці – 170-175 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Для кукурудзи – 80-84 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

Густина загрузки – залежить від способу і висоти загрузки.

Наприклад – густина сіна:

в верхніх шарах 20-40 кг/м<sup>3</sup>;

на глибині 12 м – 140-170 кг/м<sup>3</sup>.

Властивість створювати аеродинамічний опір – при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ . Опір пшениці висотою 1 м при швидкості потоку агенту:

$v = 0,25 \text{ м/с} - 120 \text{ Па};$

$v = 1 \text{ м/с} - 1050 \text{ Па}.$

*Гідромеханічні властивості:*

Вологість матеріалу – відношення маси вологи до одиниці маси вологого матеріалу:

$$\omega = \frac{m_e}{m_0 + m_e}, \text{ кг / кг, \%}$$

Вологовміст матеріалу – відношення маси вологи до маси сухого матеріалу:

$$d = \frac{m_u}{m_0}.$$

Між цими величинами є зв'язок:

$$\omega = \frac{d}{1 + d}.$$

Концентрація вологи – маса вологи, яка приходить на одиницю об'єму.

$$\omega = \frac{d}{1 + d}.$$

*Теплофізичні характеристики вологого матеріалу.*

Теплоємність вологого матеріалу – кількість теплоти, яку потрібно підвести до тіла, щоб воно змінило свою температуру на один градус:

$$c_m = \frac{c_0(100 - d) + c_e d}{100}, \text{ кДж / (кг град)}$$

Для пшениці – 0,96...1,55 кДж/(кг град).

Температуропровідність матеріалу пов'язана з теплопровідністю і густиною матеріалу.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_m}.$$

Від значення  $a$  залежить ступінь нагрятості тіла.

Для пшениці при вологості 12...17%  $\alpha = 0,78...1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}.$

Теплопровідність – здатність тіла проводити теплоту,  $\lambda$ , Вт/(м град).

Ефективність процесу сушіння залежить від ефективності підведення теплоти, інтенсивності руху вологи в матеріалі та інтенсивності її відводу від поверхні тіла. Інтенсивність теплообміну та допустима температура нагріву зерна залежить від швидкості руху сушильного агента. Але збільшення швидкості приводить до збільшення аеродинамічного опору і внаслідок цього зниження економічних показників сушіння.

*Технологічні властивості вологого матеріалу*

До таких властивостей відносять:

1. Допустиму температуру сушки;

2. Виділення ядовитих речовин під час сушки;
3. Небезпека розкладання продукту;
4. Пожаро- і вибухонебезпечність.

Потрібно добре знати тепловий розрахунок сушарки, який зводиться до визначення її матеріального балансу, витрати сушильного агенту і тепла на сушіння.

За рівнянням матеріального балансу сушарки визначають масу вологи, яка випаровується з вологого матеріалу в сушарці.

Витрату сушильного агенту і тепла на сушіння визначають за допомогою *id*-діаграми вологого повітря. Тому студенту потрібно повторити вивчений матеріал і набути навичок у користуванні *id*-діаграмою.

Треба звернути увагу на теплові режими сушіння зерна різних культур, оскільки від цього залежить не тільки швидкість сушіння, але й якість висушеного зерна.

При підборі сушильної установки необхідно знати класифікацію:

1. За способом виконання сушіння: природня і штучна.
2. За способом підведення тепла до вологого матеріалу:
  - Конвективні – теплова енергія передається конвекцією;
  - Кондуктивні (контактні) – теплова енергія передається за допомогою теплопровідності;
  - Хвильові;
  - Терморадіаційні – теплова енергія передається за допомогою термовипромінювання;
  - Високочастотні – теплова енергія перетворюється з електричної;
  - Акустичні;
  - Комбіновані – передача тепла здійснюється за допомогою комбінацій вищезгаданих способів;
  - Сублімаційна – виморожування;
  - До конвективного способу відносять і активне вентилявання, яке здійснюється продуванням повітря через нерухомий шар об'єкту сушки.
3. По виду сушильного агенту сушарки конвективної дії використовують:
  - Нагріте повітря;
  - Димові або інертні гази;
  - Суміш повітря з димовими газами;
  - Перегріту або насичену пару;
  - Рідкий теплоносій;

- Електричний струм.
- 4. Залежно від напрямку руху матеріалу, що сушиться і сушильного агента в сушарках конвективної дії:

Прямоточні – напрямок руху матеріалу і сушильного агента збігається;  
 Протиточні – напрямок руху матеріалу і сушильного агента протилежні;  
 Перехресноточні – напрямок руху матеріалу перпендикулярно напрямку сушильного агента.

5. По виду об'єкта сушки: тверді, рідкі і пастоподібні.

6. По конструкції конвективні сушарки поділяють:

- Камерні;
- Шнекові;
- Барабанні;
- Тарілчасті;
- Шахтні;
- Вихрєві;
- Аерофонтанні;
- Пневматичні трубчасті.

Сушіння засновано на двох принципах: видалення вологи із матеріалу без зміни або із зміною агрегатного стану.

На першому принципі основані механічний і сорбційний способи сушки.

Другий принцип заснований на застосуванні теплоти для сушки матеріалів.

Матеріал цього заняття доцільно вивчати за підручником.

### Практичні вправи

Проаналізувати розв'язання задач 74, 75 [8]. Атмосферне повітря з відносною вологістю  $\varphi_0=50\%$  і температурою  $t_0=10^\circ\text{C}$  надходить у калорифер, де нагрівається до температури  $t_1=90^\circ\text{C}$ . При виході з сушильної камери повітря має температуру  $t_2=40^\circ\text{C}$ . Визначити вологовміст повітря до і після сушіння, витрату повітря і тепла на випаровування 1 кг вологи в ідеальній сушильній установці.

Задачу можна розв'язати за допомогою *id* - діаграми вологого повітря.

*Розв'язання.*

На діаграмі *id* знаходимо точку перетину ізотерми  $t_0=10^\circ\text{C}$  кривою постійної відносної вологості повітря  $\varphi_0 = 50\%$ . Ця точка і буде характеризувати стан вологого повітря до надходження його у калорифер.

Для цієї точки  $d_0 = 4$  г/кг, а ентальпія,  $i_0=20$  кДж/кг. Нагрівання повітря у калорифері відбувається при  $d=const$ , то із знайденої точки проводимо

вертикальну лінію, до перетину з ізотермою  $t_1=90^\circ\text{C}$ . В цій точці ентальпія нагрітого повітря  $i_1=100$  кДж/кг. Оскільки процес сушіння проходить при  $i = \text{const}$ , то переміщуючись по лінії ентальпії до перетину з ізотермою  $t_2 = 40^\circ\text{C}$ , одержуємо ще одну точку, яка відповідає стану вологого повітря на виході із сушарки. Для цієї точки  $d_0 = 25$  г/кг. Визначаємо витрату сушильного агента для випаровування 1 кг вологи:

$$L=1000/(d_2-d_0)=1000/(25-4)=47,7\text{кг/кг}$$

Визначаємо витрату тепла на випаровування 1 кг вологи з вологого матеріалу:

$$q= l(i_1-i_0)=47,7(100-20)=3810 \text{ кДж/кг.}$$

### Запитання для самоперевірки

1. В чому полягає суть тепло- і масообміну в процесі сушіння зерна?
2. Які фактори впливають на швидкість сушіння?
3. Назвіть види теплової сушки.
4. Які види сушки відносять до механічної?
5. Суть конвективного сушіння.
6. Що таке сушильний агент?
7. Які конструктивні особливості сушарок конвективної дії?
8. Методи користування діаграмою вологого повітря для розрахунку конвективної сушки.

### Тема 5.5 Застосування холоду в сільському господарстві

Споживачі холоду в сільському господарстві.

Основи холодильної техніки. Фізична суть охолодження.

Способи охолодження. Основи одержання штучного холоду.

Класифікація холодильних машин і установок. Холодильні агенти, їх властивості і вимоги для них.

Схема і цикл компресорної холодильної установки.

Холодопродуктивність і холодильний коефіцієнт.

<https://onlinetestpad.com/hmrtg6tm37mek>

## Теоретичні відомості

Одержання низьких температур (нижчих за температуру навколишнього середовища) називається виробництвом холоду. Цього досягають за допомогою холодильних машин.

Холодильна машина призначення для відведення теплоти від охолоджуваного об'єкту (тіла з більш низькою температурою) і передачі її у навколишнє середовище з більш високою температурою (повітря, воду і т.д.).

Кожна речовина може знаходитися в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому і газоподібному. Для переведення із одного стану в інший до речовини необхідно підвести необхідну кількість теплової енергії. Так, для того щоб заморозити 1 кг води, або розтопити 1 кг льоду, необхідно відповідно відвести або підвести 335,2 кДж. теплової енергії. Аналогічне явище спостерігається при переході рідини в газоподібний стан і під час перетворення газу в рідину (при конденсації). Кількість теплоти, необхідної для здійснення цих процесів, також є величиною постійною і для 1 кг води при нормальному атмосферному тиску рівна близько 2259 кДж.

Температура кипіння рідини змінюється в залежності від тиску. Чим вищий тиск, тим вища температура при якій рідина кипить або конденсується.

Відомо також, що теплота завжди переходить від тіла з високою температурою до тіла з більш низькою температурою. Перехід теплоти від холодного тіла до теплого можливий лише тоді, коли на це витрачається підведена зовні деяка кількість енергії.

Всі перераховані вище властивості використані в техніці для отримання штучного холоду.

Способи виробництва штучного холоду в значній мірі визначаються потрібною температурою охолодження і масштабом установки.

Розрізняють:

- 1) помірне охолодження (діапазон температур від кімнатних до  $-100^{\circ}\text{C}$ );
- 2) глибоке охолодження (до температур нижче  $-100^{\circ}\text{C}$ ).

Отримання температур нижче  $-100^{\circ}\text{C}$  класифікується:

- а) техніка глибокого охолодження (від  $-100$  до  $-218^{\circ}\text{C}$ );
- б) криогенна техніка (від  $40$  до  $0,3^{\circ}\text{K}$ );
- в) техніка ультранизьких температур (до  $0,00002^{\circ}\text{K}$ ).

Принцип дії холодильної установки визначається основним законом термодинаміки. В парокомпресійній холодильній установці для перенесення теплоти  $Q_0$  від більш холодного тіла (холодного джерела з температурою  $T_{х.д}$ ) в навколишнє середовище з більш високою температурою ( $T_{н.с}$ ) потрібно



затратити роботу  $L_k$  (в даному випадку робота компресора). Робоче тіло холодильної машини (холодильний агент) виконує замкнений цикл, періодично повертаючись в початковий стан.

В цьому коловому процесі теплота  $Q_k$  віддається навколишньому середовищу. На основі першого закону термодинаміки рівняння теплового балансу холодильної машини запишеться:

$$Q_k = Q_0 + L_k,$$

де  $Q_k$  – теплота, що віддається конденсатором в навколишнє середовище;

$Q_0$  – теплота відведена від охолоджуваного об'єкту ;

$L_k$  – робота компресора.

Термодинамічна ефективність циклу холодильної установки оцінюється холодильним коефіцієнтом  $\varepsilon$ . Тобто відношення кількості віднятого тепла  $q_2$  до затраченої в циклі роботи  $l_k$

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_r}.$$

Величина холодильного коефіцієнта залежить від граничних температур циклу і властивостей холодильного агента. При збільшенні температури у випарнику кількість тепла, що відбирається збільшується, а затрачувана робота відповідно зменшується.

Для забезпечення конденсації пари холодильного агента треба, щоб його температура була вища від температури охолодного середовища в компресорі, тоді і холодильний агент збільшиться.

В якості робочого тіла холодильних машин використовують легкокиплячі рідини: аміак ( $\text{NH}_3$ ), вуглекислоту ( $\text{CO}_2$ ), сірчистий ангідрид ( $\text{SO}_2$ ) і фреони.

Ці рідини мають ряд властивостей, які дозволяють отримувати низькі температури. Під час випаровування вони здатні поглинати велику частину теплоти.

### **Практичні вправи**

Проаналізувати розв'язання задач 76, 77 [8].

### **Запитання для самоперевірки**

1. Які типи холодильників ви знаєте?
2. Що таке холодильний коефіцієнт?

3. Які вам відомі робочі речовини, що використовують в холодильних установках, крім фреону і аміаку?
4. Назвіть властивості холодильних агентів.
5. Призначення та принцип дії компресора.
6. За рахунок якого фізичного явища відбувається охолодження?
7. З якою метою і де у сільськогосподарському виробництві використовуються холодильні установки?
8. Посніть графічне зображення циклу холодильної установки.
9. Яка різниця між холодильником та тепловим насосом?
10. Які теплоприпливи враховуються при калоричному розрахунку?

## **Тема 5.6 Основи зберігання сільськогосподарської продукції**

Теплотехнічні основи зберігання сільськогосподарської продукції. Народногосподарське значення організації зберігання і переробки сільськогосподарських продуктів на місці їх виробництва.

Класифікація фермерських, колгоспних і радгоспних підприємств для зберігання фруктів, овочів і продуктів тваринництва. Оптимальні параметри мікроклімату в сховищах. Способи створення оптимальних умов зберігання. Теплові схеми і компонування теплосилового обладнання. Схеми і апаратура автоматичного регулювання мікроклімату в овоче- і фруктосховищах.

### **Теоретичні відомості**

Важливу роль у сільському господарстві відіграють умови зберігання сільськогосподарської продукції. Недостатня кількість сховищ призводить до великих втрат продукції. Умови зберігання визначаються температурою, вологістю, а також складом середовища, у якому знаходяться продукти. Для кожного виду овочів і плодів існують найбільш сприятливі фактори. Харчову картоплю зберігають при температурі 2...4°C, картоплю, призначену для переробки або насінневу – при 3...5°C; коренеплоди – при  $t = 0,5...+1^{\circ}\text{C}$ ; капусту – при  $t = 2...-1^{\circ}\text{C}$ ; цибулю – в межах  $t = 0...+3^{\circ}\text{C}$ ; для цибулі-сіянки на початку зберігання –  $t = +17^{\circ}\text{C}$ , а з настанням морозів –  $t = 0...+3^{\circ}\text{C}$ ; для моркви ці значення  $t = 0...+1^{\circ}\text{C}$ . Значення температурного режиму доповнюються темпом охолодження.

Крім того, умови зберігання залежать ще і від вологості в приміщенні. Для картоплі, коренеплодів і капусти відносна вологість повітря має

бути 80...95%; для цибулі не перевищувати 60...70%; для моркви – 90...95%. Основні параметри зберігання регламентовані ОНТП 6-88.

Для зберігання продукції використовують спеціальні сховища. Об'єм сховищ залежить від:

- географічного положення (чим холодніша зона, тим більший об'єм сховища);

- господарської потреби (спеціалізовані господарства будують типові великі сховища для забезпечення цілорічного зберігання продукції з можливістю її сортування та реалізації у будь-яку пору року. Всі інші господарства, які будують сховища лише для зберігання невеликої кількості продукції для забезпечення власних потреб, повинні мати сховища як для тимчасового, так і для тривалого зберігання – підвали, холодильні камери місткістю 20 – 100 м<sup>3</sup>;

- цільового призначення продукції – технічного (залежно від сезону переробки), насінного (зберігання 7-9 міс), продовольчого (зберігання до нового врожаю);

- способу влаштування – географічного положення та рівня підґрунтових вод.

За конструкцією сховища бувають:

- наземні (високий рівень підґрунтових вод і невисокі температури в період основного зберігання продукції; в цих сховищах найважче регулювати температурний режим);

- напівзаглиблені (рівень підґрунтових вод невисокий; в цих сховищах більш стабільний температурний режим);

- заглиблені (будують у місцях низького залягання підґрунтових вод, а також там, де висока або дуже низька температура в період основного зберігання). Шар землі стабілізує температурний режим у сховищах: при високій температурі в обвалованому сховищі температура низька, а при великих морозах таке сховище менш інтенсивно охолоджується.

Вимоги до сховищ.

Сховище має забезпечувати теплоізоляцію та гідроізоляцію. Температура повітря у ньому повинна бути на 2 - 3°C вищою за мінімальну температуру зберігання картоплі чи коренеплодів або дорівнювати оптимальній для певного виду продукції. Ці вимоги забезпечуються належною товщиною стін і стелі, використанням гігроскопічного або утеплювального матеріалу, обігріванням струменем повітря або охолодженням за допомогою вентилявання чи охолодження. Крім того, овочесховища затемнюють, оскільки переважна більшість овочів на світлі зеленіє, втрачаючи товарний вигляд і продовольчі якості.

Студенти повинні ознайомитись із способами і режимами зберігання продукції. Знати принцип дії камер з регульованим газовим середовищем. Розглянути тепловий розрахунок сховищ.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Яке народногосподарське значення має організація зберігання і переробки сільськогосподарської продукції на місці її виробництва?
2. Які оптимальні параметри мікроклімату у сховищах?
3. Які оптимальні параметри складу газового середовища у сховищах?
4. Опишіть способи створення і автоматичного регулювання мікроклімату в сховищах.
5. Використання альтернативних джерел теплоти для зберігання продукції.

### **Тема 5.7 Теплопостачання споруд захищеного ґрунту**

Споруди захищеного ґрунту. Класифікація і конструкції культивацийних споруд. Визначення тепловтрат, згідно теплофізичних характеристик споруди. Тепловий баланс для поверхні ґрунту, для огороження та об'єму споруди.

### **Теоретичні відомості**

Культивацийними спорудами захищеного ґрунту є виробничі споруди, які відокремлені від навколишнього середовища. Призначені для вирощування овочів, квітів, плодів, розсади. Відмінність вирощування в культивацийних спорудах полягає в захисті рослин від несприятливих умов в холодну пору року.

Будівництво може передбачати різні огорожуючі поверхні: скло, плівка, світлопрозорі синтетичні матеріали. Це дає можливість отримувати сонячне світло хоча б частково у світловий період доби.

Створюваний штучний мікроклімат, при якому враховують температурні, вологісні і світлові параметри, забезпечує швидке зростання. Незалежно від часового поясу, погоди та клімату ми можемо отримувати високий врожай.

Тепличні господарства з площами 60 і більше гектарів потребують досить високе теплове навантаження і є енергоємними споживачами теплової енергії.

Тепловтрати, згідно теплофізичних характеристик визначають відповідно до площ огороджуваних конструкцій:

$F_{\text{інв.}}$  – площа підлоги всередині конструкції;

$F_{\text{кор.}}$  – корисна площа, на якій вирощують рослини;

$F_{\text{огор.}}$  – площа огороджуваних конструкцій.

Коефіцієнт огороження, що вказує, яка площа огороження перевищує площу підлоги всередині споруди:

$$\eta_{\text{огор.}} = \frac{F_{\text{огор.}}}{F_{\text{інв.}}}$$

Для малогабаритних споруджень, які заглиблені в ґрунт (парників) коефіцієнт огороження приймають рівним 1; для надземних малогабаритних – 1,5-1,7; для ангарних теплиць – 1,3-1,4; для блочних – 1,25-1,4.

Відношення об'єму культивацийної споруди до її інвентарної площі є коефіцієнт об'єму:

$$\eta_{\text{об.}} = \frac{V}{F_{\text{інв.}}}$$

Умови створення мікроклімату напряму залежать від даного коефіцієнту. Для малогабаритних споруд значення менше 1 м. Для теплиць значення коливається для вантових – від 2,5 м, для ангарних і блочних від 2,75 м до 3 м.

Здатність поверхні відбиття сонячної радіації є одною з теплофізичних характеристик для споруд захищеного ґрунту. Називають її *альbedo, r*. Залежить ця величина від стану поверхні, кута падіння променів, від матеріалу та ін.

Для розрахунку альbedo використовують формулу:

$$r = r_m k_y,$$

де  $r_m$  – альbedo, при умові, що промені падають перпендикулярно до поверхні;

$k_y$  – коефіцієнт, що враховує кут падіння променів.

Для скла альbedo дорівнює 0,07; для полімерних плівок – приблизно в 1,5 рази більше.

Вибір джерела і засобів теплопостачання споруд захищеного ґрунту визначають їх економічну ефективність.

## Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення спорудам захищеного ґрунту і наведіть їх класифікацію.
2. Вкажіть на найбільш важливі конструктивні особливості парників і теплиць.
3. Наведіть основні теплофізичні характеристики культиваційних споруд.
4. Які є способи обігріву споруд захищеного ґрунту?
5. Розгляньте схеми обігріву шатра теплиць, а також опалення ґрунту.
6. Які є способи автоматичного керування мікрокліматом теплиць?
7. Способи вентиляції теплиць та їх відмінності.
8. Паровий, повітряний та газовий спосіб обігріву теплиць.
9. Яке устаткування необхідне для обігріву при різних способах тепло забезпечення?
10. Тепловий розрахунок теплиць.

## КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Контрольна робота включає 6 задач і 2 описових питання.

Завдання для контрольної роботи розроблені за стоваріантною системою і розподілені в таблиці 1.

Номер варіанта потрібно брати за двома останніми цифрами шифру учня. Наприклад, якщо шифр учня 247, то номер варіанта буде 47. У таблиці по вертикалі потрібно брати цифру «4», а по горизонталі – цифру «7». На перетині цих граф знаходять клітинку, яка містить 8 чисел (у нашому випадку 2, 16, 30, 34, 50, 53, 75, 90). Перші шість цифр означають номери варіантів до кожної з шести задач, а два останніх числа – номери описових питань. У нашому випадку слід взяти дані з 2-ї колонки; для другої задачі – з 16-ї колонки і т. д., а для розв'язання шостої задачі потрібно взяти дані з 53-ї колонки.

Крім того, учень повинен дати описові відповіді на питання 75 і 90 контрольної роботи.

Контрольну роботу слід виконувати тільки після вивчення програмного матеріалу, відповідей на запитання для самоперевірки і виконання практичних вправ.

### Номери контрольної роботи

1.	2.	3.	4.	5.	6.
----	----	----	----	----	----

### Номери занять за методичними вказівками

3; 5	7; 9	12; 14; 30	31	15; 26; 27; 28	16; 35
------	------	------------	----	----------------	--------

Контрольна робота виконується в обсязі учнівського зошита (12 аркушів). Всі записи в контрольній роботі потрібно робити чорнилом чітко, акуратно, залишаючи поля шириною 3-4 см для зауважень рецензента.

Малюнки і схеми необхідно виконувати олівцем з допомогою креслярських інструментів, додержуючись вимог діючих стандартів ЕСКД.

Розв'язання кожної задачі слід починати з нової сторінки.

В кінці роботи потрібно написати перелік використаної літератури і з зазначенням вихідних даних.

Для рецензії викладача в кінці зошита потрібно залишати декілька чистих сторінок.

Приступаючи до розв'язування задач контрольної роботи, потрібно уважно прочитати і переписати в зошит текст задачі, потім, користуючись

умовними буквеними позначеннями, виписати, що дано і що потрібно визначити. Після цього записати розв'язання.

Розв'язання задач обов'язково супроводити коротким пояснюючим текстом. Всі розрахункові формули треба розшифрувати і вказувати значення величин, що до них входять.

При цьому слід посилатися на літературу, звідки взяті числові значення тієї чи іншої величини, а також подавати всі проміжні розрахунки. Розв'язання задач треба проводити тільки в системі *СІ*. Якщо величина задана в одиницях іншої системи, то в умові задачі потрібно помістити і відповідний перерахунок.

Одержані в процесі розв'язання задач величини (проміжні або кінцеві) повинні супроводжуватись проставленням розмірностей.

Якщо в процесі розв'язання задачі учень посилається на таблиці і графіки, то потрібно вказувати джерело /сторінку, номер таблиці або графіка/, наприклад: /Черняк О.В. Рибчинська Г.Б., с. 28, табл. 12/.

По закінченню розв'язання кожної задачі потрібно зробити аналіз одержаних результатів і висновки за наслідками розв'язання.

Відповіді на питання контрольної роботи рекомендується виконувати таким чином.

Записати в зошит текст питання, відшукати в підручнику матеріал для відповіді, вивчити його, намітити план відповіді. Відповідь має бути короткою і чіткою, але вичерпною і пов'язаною з практикою. Якщо при цьому використовується математична формула, то потрібно пояснити її зміст. Основні положення відповіді повинні бути проілюстровані схемами установок, графіками, таблицями, фрагментами діаграм.

Не рекомендується переписувати текст підручника, за винятком точних формулювань основних законів і положень.

На обкладинці зошита потрібно написати повну назву предмета, шифр, за яким виконана контрольна робота, курс та групу, в якій навчаєтесь, прізвище, ім'я та по - батькові. Домашню адресу з зазначенням індексу поштового відділення написати у правому нижньому кутку обкладинки зошита.

Повністю виконану контрольну роботу слід надіслати у технікум для перевірки у строк, передбачений графіком.

Після одержання прорецензованої контрольної роботи треба ознайомитися із зауваженнями викладача і виконати всі його поради і вимоги. У випадку не зарахування учень виконує контрольну роботу повторно і надсилає її в коледж на перевірку.



## Задачі контрольної роботи

/1-60/

### Задача 1/1-10/

Визначити повний напір  $H$  і споживану потужність  $N$  водяного насоса діючої насосної установки, якщо подача насоса  $Q$ ; діаметр всмоктувального патрубку  $D_{вс}$ ; діаметр нагнітального патрубку  $D_{н}$ ; покази манометра  $P_{м}$ ; покази вакуумметра  $P_{в}$ ; відстань між точками вимірювання  $\Delta h$ ; к.к.д. насоса  $\eta=0,6$ .

#### Дані до задачі 1/1-10/

Величина	Номери варіантів									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q, \text{ л/с}$	3,0	3,8	4,0	4,5	5,0	5,6	6,0	2,4	2,6	2,8
$D_{вс}, \text{ мм}$	40	40	50	50	60	60	75	37	37	37
$D_{н}, \text{ мм}$	32	32	40	40	50	50	60	30	30	30
$P_{м}, \text{ МПа}$	0,35	0,3	0,25	0,2	0,45	0,4	0,35	0,4	0,35	0,3
$P_{в}, \text{ МПа}$	0,06	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04	0,06
$\Delta h, \text{ м}$	0,3	0,4	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,3	0,4	0,3

### Задача 2/11-20/

У камері згорання об'ємом  $V$  двигуна внутрішнього згорання знаходиться стиснута робоча суміш при тиску  $P_1$  і температурі  $t_1$ .

Після згорання палива тиск газів підвищився до  $P_2$ , а температура до  $t_2$ .  
Визначити кількість витраченого тепла  $Q$  і тиск газів  $P_2$ , якщо паливо згоряє при сталому об'ємі.

Відношення  $C_p/C_v=1,4$ .

#### Дані до задачі 2/2-20/

Величина	Номери варіантів									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V \cdot 10^4 \text{ м}^3$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
$P_1, \text{ МПа}$	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,3	0,4	0,45
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	80	70	60	50	40	30	60	50	40	30
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	1800	1700	1600	1500	1400	1800	1700	1600	1500	1400

### Задача 3/21-30/

Одноступінчастий поршневий компресор засмоктує  $V_1$ , м<sup>3</sup>/с повітря при температурі  $t_1$  і тиску  $p_1$ . Визначити температуру  $t_2$  і об'єм  $V_2$  повітря в кінці стискання і потужність  $N$  на одержання стиснутого повітря при стисканні за ізотермою, політропою ( $n=1,25$ ) і адіабатою ( $k=1,4$ ).

Результати розрахунків звести в таблицю:

*Дані до задачі 3/21-30/.*

Величини	Номери варіантів									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$V_1 \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
$P_1, \text{ МПа}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	15	27	17	20	25	16	18	15	17	20
$P_2, \text{ МПа}$	0,7	0,8	0,75	0,85	0,9	0,6	0,7	0,9	0,95	0,8

### Задача 4/31-40/.

Визначити ефективну потужність  $N_e$  чотирициліндрового чотирьохтактного двигуна внутрішнього згорання, якщо діаметр циліндра  $D$ , хід поршня  $S$ , частота обертання вала  $n$ , середній індикаторний тиск  $p_i$ , механічний к.к.д.  $\eta_m = 0,85$ .

Опишіть раціональні шляхи підвищення потужності двигунів.

*Дані до задачі 4/31-40/.*

Величина	Номери варіантів									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$D, \text{ мм}$	190	145	125	105	95	82	72	110	115	100
$S, \text{ мм}$	300	200	125	130	127	110	75	145	150	135
$n, \text{ с}^{-1}$	8,5	16,7	23,3	23,3	20	46,7	55	36,7	33,3	35
$P_i, \text{ МПа}$	0,8	0,85	0,9	0,85	1,1	0,6	0,52	0,6	0,7	0,75

Процес Стискання	Розрахункові величини		
	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$V_2, \text{ м}^3/$	$N, \text{ кВт}$
<i>Ізотермічний</i>			
<i>Політропний</i>			
<i>Адiabатний</i>			

### Задача 5/41-50/.

Котельна установка обладнана паровим котлом типу ДКВР, паропроодуктивністю  $D$  тиск пари  $p_1$ , температура пари  $t_2$ , температура живильної води  $t_{ж.в.}$ . К.к.д котельного агрегату  $\eta_{к.а} = 0,85$ .

Визначити годинну витрату робочого,  $V^{ргод}$  і умовного,  $V^{год}$  палива котельною установкою, якщо в топці згорає паливо з таким елементарним складом пальної маси:  $C^n$ ;  $H^n$ ;  $S_A^n$ ;  $O^n$ ;  $N^n$ ;  $A^p$ ;  $W^p$ .

Опишіть шляхи зменшення витрати палива котельною установкою.

### Дані до задачі 5/41-50/

Величина	Номери варіантів									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$D, м/год$	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
$P_n, МПа$	0,5	0,7	0,9	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
$t_n, ^\circ C$	150	165	175	188	192	195	201	207	212	217
$t_{ж.в.}, ^\circ C$	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165
$C^n, \%$	83	75	72	77	93,5	91,0	73,5	82,5	88,5	67,5
$H^n, \%$	5,1	5,5	5,0	4,0	1,8	3,5	4,7	5,8	4,2	5,0
$S^n, \%$	4,8	5,9	,9	1,0	2,0	2,5	1,1	0,7	3,3	6,1
$O^n, \%$	5,6	12	20,8	17,2	1,7	1,7	19,8	8,3	2,5	20,1
$N^n, \%$	1,5	1,6	1,3	0,8	1,0	1,3	0,9	2,7	1,5	1,3
$A^p, \%$	1,8	19,6	10,6	11,9	13,3	15,1	17,0	10,9	15,2	23,5
$W^p, \%$	6	13	32	21	5	5,5	26	9	5	33

### Задача 6/51-60/

В сушарку надходить повітря з відносною вологістю  $\phi$  підігріте у калорифері від  $t_0$  до  $t_1$ . При виході з сушильної камери повітря має температуру  $t_2$ .

Визначити вологість повітря  $d_0$  до сушіння і  $d_2$  після сушіння матеріалу, витрату повітря  $l$  і необхідну кількість тепла  $q$  на випаровування 1 кг вологи з вологого матеріалу в ідеальній сушарці.

Задачу розв'язати за допомогою  $id$  - діаграми вологого повітря. Показати робочий процес сушарки в  $id$  - діаграмі.

*Дані до задачі 6/51-60/*

Величини	Номери варіантів									
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
$\varphi, \%$	40	50	55	55	60	65	70	50	55	60
$t_0, ^\circ\text{C}$	10	12	20	20	18	16	15	16	17	19
$t_1, ^\circ\text{C}$	70	120	100	100	90	80	130	140	50	135
$t_2, ^\circ\text{C}$	30	60	85	45	35	40	60	65	25	65

**Питання контрольної роботи**

*/61-112/*

61. Що таке теплоенергетика і яка її роль у народному господарстві нашої країни? Стан і перспективи розвитку теплоенергетики сільського господарства.

62. Дайте визначення основним властивостям рідини: густина, об'ємна та відносна вага, в'язкість. Опишіть їх залежність від тиску і температури.

63. Що таке гідростатичний тиск і його основні властивості? Виведіть основне рівняння гідростатики і поясніть його. Що таке п'єзометрична висота і гідростатичний напір і як вони визначаються?

64. Дайте формулювання закону Паскаля. Наведіть схему будови і опишіть принцип дії гідравлічного преса з точки зору використання закону Паскаля.

65. Опишіть методику визначення сили гідростатичного тиску на плоскі і криволінійні поверхні.

66. Дайте визначення основним гідравлічним характеристикам потоку рідини: живий переріз, середня швидкість руху рідини і витрата рідини потоком.

67. Запишіть і дайте формулювання рівнянню нерозривності для потоку рідини.

68. Якими видами енергії володіє рідина масою  $m$ , що рухається зі швидкістю  $v$ , знаходиться під тиском  $p$  і перебуває на висоті  $z$  над енергетичною площиною порівняння?

Запишіть і поясніть структуру та фізичний зміст рівняння Бернуллі для потоку ідеальної і реальної рідини.

69. Які існують режими руху рідини? Як за допомогою критерію (числа) Рейнольдса визначити режим руху рідини? Які критичні значення має

критерій Рейнольдса?

70. Чому при протіканні реальної рідини мають місце втрати енергії? Як визначаються сумарні втрати енергії рідини у трубопроводах і як їх зменшити? Яка залежність між швидкістю руху рідини і втратами енергії при турбулентному і ламінарному режимах руху рідини?

71. Що таке гідравлічний удар у трубах, чому виникає це явище і як йому запобігти? Як визначається підвищення тиску у трубопроводі при гідравлічному ударі і необхідний час закривання вентилів?

72. Наведіть схему будови і опишіть принцип дії поршневих насосів. Як визначається висота всмоктування, подача, напір і потужність на валу насоса?

73. Наведіть схему будови і опишіть принцип дії відцентрових насосів. Як визначається висота всмоктування, подача, напір і потужність на валу насоса? Яка залежність між подачею, напором, потужністю і частотою обертання вала насоса? Що таке робоча характеристика відцентрового насоса, описати методику користування.

74. Наведіть схему будови і опишіть принцип дії осьових і відцентрових вентиляторів. Яка залежність між подачею, напором, потужністю і частотою обертання вала вентилятора? Опишіть методику вибору вентиляторів для конкретних умов роботи.

75. Що таке робоче тіло теплового двигуна і основні параметри його стану? Які речовини використовуються як робочі тіла теплових двигунів?

76. Назвіть основні газові закони і процеси, які вони характеризують. Яка залежність між змінними параметрами у цих процесах?

77. Як аналітично виражається об'єднаний закон Бойля - Маріотта і Гей-Люссака? Виведіть рівняння стану для 1 кг і довільної маси ідеального газу і поясніть величини, які до них входять.

78. Що таке газова суміш? Як може бути заданий склад газової суміші? Як визначають уявну молекулярну масу і газову сталу суміші ідеальних газів?

79. Що таке теплоємність газів? Види теплоємності (масова, об'ємна, мольна, дійсна, середня, теплоємність при сталому об'ємі і при сталому тиску). Як залежить теплоємність від температури і від атомності? Як визначають кількість тепла, необхідного для нагрівання речовини?

80. Як формулюється і аналітично виражається перший закон термодинаміки? Що таке внутрішня енергія і ентальпія газу? Довести, що ентальпія газу  $i = CpT$ , кДж/кг.

81. Дайте формулювання другого закону термодинаміки. Доведіть, що термічний к.к.д. будь-якого колового процесу, в тому числі й циклу Карно

завжди менший одиниці.

82. Доведіть, що ізохорний, ізобарний, ізотермічний і адіабатний термодинамічні процеси є частковими випадками політропного процесу, доведіть, що робота газом в ізохорному процесі не виконується.

83. Процес пароутворення у  $pv$ -координатах.  $Is$ -діаграма водяної пари, її побудова та користування нею. Як зображуються ізохорний, ізобарний, ізотермічний і адіабатний процеси в  $is$ -діаграмі?

84. Що таке вологе повітря? Що таке абсолютна і відносна вологість та вологовміст вологого повітря? Як побудована і як користуватися  $id$ -діаграмою вологого повітря? Як за  $id$ -діаграмою визначити температуру точки роси?

85. Наведіть схему паросилової установки. Зобразіть цикл Ренкіна у  $pv$ -координатах і опишіть за ним роботу паросилової установки. Як визначається термічний к.к.д. і питома витрата пари в циклі Ренкіна? Опишіть способи підвищення економічності паросилового циклу.

86. Наведіть схему парокомпресорної холодильної установки. Зобразіть її дійсний цикл у  $Ts$ -координатах і опишіть за ним роботу холодильної установки. Що таке холодопродуктивність і холодильний коефіцієнт холодильної установки і як вони визначаються? Яка відмінність у функціонуванні пара компресорної холодильної установки і теплового насоса?

87. Поширення тепла теплопровідністю. Як визначається густина теплового потоку і термічний опір при теплопровідності через одно- і багат шарову плоску стіну? Як і в якому напрямку впливає накип, сажа або інші забруднення стінки на її теплопровідність?

88. В чому суть конвективного теплообміну? Як визначається густина теплового потоку і термічний опір при конвективному теплообміні? Які фактори і в якому напрямку впливають на величину коефіцієнта тепловіддачі?

89. Суть променистого теплообміну. Види променистих потоків. Як аналітично записується закон Стефана-Больцмана для абсолютно чорного і сірого тіла? Яка характерна відмінність у випромінювальній і поглинальній здатності твердих тіл і газів? Як визначається густина теплового потоку і коефіцієнт тепловіддачі при променистому теплообміні між газами і поверхнями?

90. Що називається теплопередачею? Як визначається густина теплового потоку і термічний опір плоскої (одно- і багат шарової) стінки при теплопередачі? У якому випадку теплопередачу через циліндричну стінку можна розрахувати за формулами плоскої стінки?

91. Поняття про теплообмінні апарати та їх класифікація. Як записується рівняння теплового потоку і теплового балансу для теплообмінного апарату?

92. Що називається теплотою згорання палива? Яка відмінність між нижчою і вищою теплотою згорання палива і як вони визначаються? Як визначається кількість повітря, необхідного для спалювання палива? Яке паливо називається умовним? Що таке тепловий еквівалент палива і як він визначається?

93. З яких елементів складається котельний агрегат? Записати рівняння теплового балансу і зазначити приблизний розподіл тепла у котельному агрегаті. Як визначається термічний к.к.д. і годинна витрата палива котельним агрегатом. Опишіть способи підвищення економічності котельного агрегату.

94. Поняття про топкові пристрої, їх класифікація та вимоги до них. Основні параметри роботи топок: питома тепла напруга дзеркала горіння і об'єму топки та їх наближені значення для сучасних топок.

95. Призначення і загальна будова теплогенераторів. Автоматика керування і безпеки теплогенераторів. Основні неполадки теплогенераторів, причини їх виникнення, методи виявлення і усунення. Правила техніки безпеки при використанні теплогенераторів.

96. Чому багатоступінчасте стискання газу у компресорі є економічно доцільним? Як визначається робота на стискання і нагнітання газу компресором? Як визначається подача і потужність на валу компресора?

97. Загальна будова і принципи дії чотирикратного карбюраторного двигуна, його теоретичний цикл і індикаторна діаграма. Термічний к.к.д. ідеального циклу карбюраторного двигуна .

98. Зобразіть у  $p-v$ -координатах теоретичний цикл і індикаторну діаграму сучасного дизельного двигуна та опишіть за ними принцип дії двигуна. Як визначається термічний к.к.д. цього циклу?

99. Які існують способи організації двотактного процесу у двигунах. Зобразіть індикаторну діаграму двотактного двигуна у  $p-v$ -координатах і опишіть за нею принцип дії цього двигуна. Вкажіть на недоліки двотактного процесу.

100. Індикаторна і ефективна потужність двигунів, їх значення і раціональні шляхи підвищення. Яким чином наддування двигуна збільшує його потужність?

101. Рівняння теплового балансу двигуна, його структура і аналіз. Наведіть приблизний розподіл тепла у двигунах. Годинна і питома витрата палива двигунами та шляхи її зменшення.

102. В чому суть активного і реактивного принципів дії парових турбін? Наведіть схеми будови і опишіть принцип дії активної парової турбіни із ступенями швидкості і ступенями тиску.

103. Схема будови і принцип дії ТЕС. Економічні к.к.д. бруто і нетто ТЕС, їх визначення, наближені числові значення і раціональні шляхи підвищення. Річна і питома витрата палива на КЕС, їх визначення і шляхи зменшення.

104. Схеми будови та принципи дії АЕС і електростанцій з МГД генераторами, стан і перспективи їх розвитку в нашій країні.

105. Назвіть основних споживачів тепла у сільському господарстві. Наведіть приклади норм і графіків теплоспоживання. опишіть методику визначення витрати тепла на опалення, вентиляцію, гаряче водопостачання і технологічні потреби.

106. Яке народногосподарське значення для нашої країни має сушіння зерна? Наведіть теплові режими сушіння зерна різних культур і зазначте фактори, які впливають на ці режими. опишіть основні способи сушіння зерна і наведіть принципові схеми конвективних сушарок.

107. Зобразіть теоретичний і дійсний процеси сушіння матеріалів у *id* - діаграмі. Напишіть рівняння матеріального балансу сушарки і опишіть методику визначення витрат сушильного агента і тепла на сушіння.

108. В чому полягає фізична суть охолодження? Назвіть основних споживачів холоду у сільському господарстві і зазначте способи охолодження. Наведіть схему будови і опишіть принцип дії абсорбційної холодильної установки. Характеристика речовин, які використовуються як холодильні агенти в холодильних установках.

109. Яке народногосподарське значення має організація зберігання і переробки сільськогосподарської продукції на місці її виробництва. опишіть способи зберігання, зазначте оптимальні параметри мікроклімату і складу газового середовища у сховищах та способи їх створення і автоматичного регулювання.

110. опишіть види отримання альтернативної енергії. Вторинні енергетичні ресурси і їх застосування в сільському господарстві.

111. Енергозберігаючі технології. Використання поновлювальних енергетичних ресурсів.

112. Основи енергозбереження при теплової генерації.



**Таблиця 1 – Таблиця розподілу задач і контрольних питань за варіантами**

<i>Передостання цифра шифру</i>	<i>Остання цифра шифру</i>									
	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>0</b>	1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 104	2, 12, 22, 32, 42, 52, 62, 95	3, 13, 23, 33, 43, 53, 63, 96	4, 14, 24, 34, 44, 54, 64, 107	5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 108	6, 16, 26, 36, 46, 56, 66, 109	7, 17, 27, 37, 47, 57, 67, 100	8, 18, 28, 38, 48, 58, 68, 111	9, 19, 29, 39, 49, 59, 69, 110	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 105
<b>1</b>	2, 13, 24, 35, 46, 57, 71, 94	3, 14, 25, 36, 47, 58, 72, 95	4, 15, 26, 37, 48, 59, 73, 96	5, 16, 27, 38, 49, 60, 74, 97	6, 17, 28, 39, 47, 51, 75, 98	7, 18, 29, 40, 41, 52, 76, 99	8, 19, 30, 31, 42, 53, 77, 100	9, 20, 21, 32, 43, 54, 78, 101	10, 11, 22, 33, 44, 55, 79, 102	1, 12, 23, 34, 45, 56, 80, 103
<b>2</b>	3, 15, 27, 39, 42, 53, 81, 100	4, 16, 28, 40, 43, 54, 82, 101	5, 17, 29, 31, 44, 55, 83, 102	6, 18, 30, 32, 45, 56, 84, 103	7, 19, 21, 33, 46, 57, 85, 104	8, 20, 22, 34, 47, 58, 86, 105	9, 11, 23, 35, 48, 59, 87, 106	10, 12, 24, 36, 49, 60, 88, 107	1, 13, 26, 37, 50, 51, 89, 108	2, 14, 26, 38, 41, 52, 90, 109
<b>3</b>	4, 17, 30, 33, 48, 60, 91, 110	5, 18, 21, 34, 49, 51, 92, 111	6, 19, 22, 35, 50, 52, 93, 99	7, 20, 23, 36, 41, 53, 61, 76	8, 11, 24, 37, 42, 54, 62, 77	9, 12, 25, 38, 43, 55, 63, 78	10, 13, 26, 39, 44, 56, 64, 79	1, 14, 27, 40, 45, 57, 65, 80	2, 15, 28, 31, 46, 58, 66, 81	3, 16, 29, 32, 47, 59, 67, 82
<b>4</b>	5, 19, 23, 37, 43, 56, 68, 83	6, 20, 24, 38, 44, 57, 69, 84	7, 11, 25, 39, 45, 58, 70, 85	8, 12, 26, 40, 46, 59, 71, 86	9, 13, 27, 31, 47, 60, 72, 87	10, 14, 28, 32, 48, 51, 73, 88	1, 15, 29, 33, 49, 52, 74, 89	2, 16, 30, 34, 50, 53, 75, 90	3, 17, 21, 35, 41, 54, 54, 91, 94	4, 18, 22, 36, 42, 55, 92, 97
<b>5</b>	6, 12, 26, 38, 44, 52, 93, 98	7, 13, 27, 39, 45, 53, 61, 85	8, 14, 28, 40, 46, 54, 62, 86	9, 15, 29, 31, 47, 55, 63, 87	10, 16, 30, 32, 48, 56, 64, 88	1, 17, 21, 33, 49, 57, 65, 89	2, 18, 22, 34, 50, 58, 66, 90	3, 19, 23, 35, 41, 59, 67, 91	4, 20, 24, 36, 42, 60, 68, 92	5, 11, 25, 37, 43, 51, 69, 93
<b>6</b>	7, 14, 29, 32, 47, 54, 70, 94	8, 15, 30, 33, 48, 55, 71, 95	9, 16, 21, 34, 49, 56, 72, 96	10, 17, 22, 35, 50, 57, 73, 97	1, 18, 23, 36, 41, 58, 74, 98	2, 19, 24, 37, 42, 59, 75, 99	3, 20, 25, 38, 43, 60, 76, 100	4, 11, 26, 39, 44, 51, 77, 101	5, 12, 27, 40, 45, 52, 78, 102	6, 13, 28, 31, 46, 58, 79, 103
<b>7</b>	8, 16, 22, 34, 45, 55, 80, 104	9, 17, 23, 35, 46, 56, 81, 105	10, 18, 24, 36, 47, 57, 82, 106	1, 19, 25, 37, 48, 58, 83, 107	2, 20, 26, 38, 49, 59, 84, 108	3, 11, 27, 39, 50, 60, 62, 88	4, 12, 28, 31, 41, 51, 63, 89	5, 13, 29, 31, 42, 52, 64, 90	5, 19, 24, 36, 47, 56, 65, 91	6, 14, 30, 32, 43, 53, 66, 92
<b>8</b>	7, 15, 21, 33, 44, 54, 67, 93	9, 18, 25, 40, 50, 59, 68, 94	10, 19, 26, 31, 41, 60, 69, 95	1, 20, 27, 32, 42, 51, 70, 96	3, 12, 29, 34, 44, 53, 71, 97	4, 13, 30, 35, 45, 54, 72, 98	5, 14, 21, 36, 46, 55, 73, 99	6, 15, 22, 37, 47, 56, 74, 100	7, 16, 23, 38, 48, 57, 75, 101	8, 17, 24, 39, 49, 58, 76, 102
<b>9</b>	10, 20, 28, 36, 49, 58, 77, 103	1, 11, 29, 37, 50, 59, 78, 104	2, 12, 30, 38, 41, 60, 79, 105	3, 13, 21, 39, 42, 51, 80, 106	4, 14, 22, 40, 43, 52, 81, 107	5, 15, 23, 31, 44, 53, 82, 108	6, 16, 24, 32, 45, 54, 83, 109	7, 17, 25, 33, 46, 55, 84, 110	8, 18, 26, 34, 47, 56, 85, 111	6, 19, 27, 35, 48, 57, 86, 112

# БЛОК ДЛЯ ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

## Інструкційна картка 1

### Практична робота № 1

**Тема:** Вивчення ідеальних теоретичних циклів та визначення параметрів стану робочого тіла в двигунах внутрішнього згорання.

**Мета:** Вивчення роботи двигунів внутрішнього згорання. Вияснити відмінність ідеальних циклів від реальних.

**Матеріальне забезпечення:** інструкційні картки, контрольні тести <https://onlinetestpad.com/hn73wvzcaayase>.

**Теоретичні відомості:** Двигунами внутрішнього згорання є теплові машини, у яких в якості робочого тіла виступають продукти спалювання рідких або газоподібних видів палива, які спалюються в робочому циліндрі.

Поршневі ДВЗ класифікують:

- по способу виконання робочого циклу – двохтактні і чотирьохтактні;
- по способу отримання паливної суміші та її запалювання – із зовнішнім сумішеутворенням в карбюраторі та запаленням від електричної іскри (карбюраторні) і з внутрішнім сумішеутворенням та запалюванням від стиску (дизельні);
- по виду палива – на рідкому або газоподібному паливі;
- по призначенню – стаціонарні, мобільні, авіаційні та інші;
- по конструктивному виконанню – з вертикальним, горизонтальним розташуванням циліндрів, та з розташуванням під кутом.

Ідеальним циклом будь-якої теплосилової установки є цикл Карно, але практично здійснити процес у двигуні внутрішнього згорання за циклом Карно неможливо.

Процес у ДВЗ проходить з дуже великим збільшенням тиску і температури. Під час роботи тиск і температура значно змінюються. Це може привести до аварійних наслідків. Тому ДВЗ працюють не за циклом Карно, а за іншими, менш економічними, але практично здійсненними циклами.

У даний час для двигунів внутрішнього згорання застосовують три цикли, відмінні від циклу Карно: цикл з підведенням теплоти при  $v=const$ ; цикл з підведенням теплоти при  $p=const$  і цикл із змішаним підведенням теплоти при  $v=const$  і  $p=const$ . Термічні к.к.д. циклів менше за термічний к.к.д. циклу Карно.

Якщо порівнювати економічність даних циклів при однакових параметрах робочого тіла в кінці процесу підведення теплоти, то видно, що термічний к.к.д. з ізобарним підведенням теплоти більший ніж у циклі із змішаним підводом теплоти і набагато більший чим в циклі з ізохорним.

$$\eta_t^{(p)} > \eta_t^{(p,v)} > \eta_t^{(v)}$$

В основі роботи карбюраторних двигунів лежить цикл з ізохорним підведенням теплоти, а в основі роботи сучасних дизельних двигунів – цикл із змішаним підведенням теплоти.

### Завдання роботи

Визначити параметри стану робочого тіла в характерних точках ідеального циклу поршневого двигуна внутрішнього згорання з ізохорно - ізобарним підведенням теплоти, якщо відомі тиск  $p_1$  і температура  $t_1$  робочого тіла на початку стиснення.

Ступінь стискання  $E_1$ , ступінь підвищення тиску  $\lambda$ , ступінь попереднього розширення робочого тіла  $\rho$ , прийняти показник адиабати  $k=1,29$ .

Визначити термічний к.к.д. циклу  $\eta_t$ . За робоче тіло прийняти повітря.

### Дані до завдання

Величини	Номери варіантів									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p$ , МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$t$ °С	8	10	12	14	18	16	22	20	25	24
$E$	17	16	15	14	13	12	11	9	7	5
$\lambda$	1,5	1,0	1,0	1,0	1,4	1,0	1,0	1,3	1,6	1,0
$\rho$	1,0	1,4	1,3	1,5	1,0	1,6	1,3	1,0	1,0	1,7

### Хід роботи

#### ТОЧКА 1.

$t_1$  – початкова температура;  $p_1$  – початковий тиск.

Початковий об'єм тіла визначаємо за характеристичним рівнянням

$p_1 v_1 = R T_1$ : знаходимо:

$$v_1 = R T_1 / p_1, \text{ м}^3/\text{кг}$$

де  $R$  – питома газова стала робочого тіла,  $R = 287$  кДж/(кг К).

#### ТОЧКА 2.

Температуру робочого тіла в точці 2 визначаємо за рівнянням для процесу 1-2, який є адиабатним,  $q = 0$ .

$$T_2 = T_1 E^{k-1}, \text{ К}$$

де  $E = v_1/v_2$  – ступінь стискання робочого тіла.

Знаходимо  $v_2 = v_1/E$ .

Тиск робочого тіла в т. 2 визначаємо за характеристичним рівнянням для даного стану:

$$pv_2 = RT_2 \text{ знаходимо } p_2 = RT_2/v_2, \text{ МПа}$$

### **ТОЧКА 3.**

Ступінь підвищення тиску дорівнює:  $\lambda = p_3/p_2$  знаходимо  $p_3$ , МПа

Для процесу 2-3 ( $v = \text{const}$ ),  $v_3 = v_2$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} \text{ знаходимо } T_3 = \frac{T_2 P_3}{P_2}, \text{ К.}$$

### **ТОЧКА 4.**

Процес 3-4 – ізобарний ( $p = \text{const}$ ).

Ступінь попереднього розширення  $\rho = v_4/v_3$  знаходимо  $v_4$ , м<sup>3</sup>/кг.

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{v_4}{v_3} \text{ визначаємо } T_4 = \frac{T_3 v_4}{v_3}, \text{ К.}$$

### **ТОЧКА 5.**

Процес 5-1 ізохорний, то  $v_5 = v_1$ .

Тиск робочого тіла в т. 5 адіабатного процесу 4-5 визначаємо:

$$\frac{P_5}{P_4} = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^k \text{ знаходимо } P_5 = P_4 (v_4/v_5)^k, \text{ МПа.}$$

Для процесу 5-1 ( $v = \text{const}$ ).

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{P_5}{P_1} \text{ знаходимо } T_5 = \frac{T_1 P_5}{P_1}, \text{ К.}$$

Термічний к.к.д. циклу:

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)} \cdot \frac{1}{E^{k-1}} \cdot 100\% .$$

Параметри	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
$p$ , МПа					
$v$ , м <sup>3</sup> /кг					
$T$ , К					

Виконати схематичне зображення циклу на  $pv$ -координатах, відповідно до розрахунків.

### Запитання для самоперевірки:

1. Які умови приймаються при розгляданні ідеальних циклів двигунів внутрішнього згоряння?
2. Чому у двигунах внутрішнього згоряння не можна здійснити ідеальний цикл Карно?
3. Як зобразити у  $pV$  - координатах цикл із змішаним підведенням теплоти і як описати роботу двигуна за цим циклом?
4. Як зобразити у  $pV$  - координатах цикл з ізохорним підведенням теплоти і як описати роботу двигуна за цим циклом?
5. Як записати і пояснити формули для визначення термічного к. к. д. для кожного із циклів?
6. Назвіть основні такти Д.В.З. і поясніть принцип його роботи.
7. Чому к.к.д. ДВЗ завжди менше 1?
8. Що таке ступінь стиску і як його визначити?
9. При яких значеннях  $\lambda$  і  $\rho$  цикл із змішаним підведенням теплоти стане циклом з ізохорним підведенням теплоти?
10. Від чого залежить показник адіабати  $k$ ?

## Інструкційна картка 2

### Практична робота №2

**Тема:** Вивчення методики користування - діаграмою водяної пари, визначення параметрів водяної пари і порівняння з табличними даними.

**Мета:** Оволодіти методикою розрахунку параметрів водяної пари за допомогою таблиць водяної пари і води. Ознайомитись з будовою, призначенням і методиками користування  $Is$  - діаграми водяної пари.

**Матеріальне забезпечення:** Таблиця водяної пари і води,  $Is$  - діаграма водяної пари, інструкційні картки, програмовані тести <https://onlinetestpad.com/hnu5ebg2tgsde>

**Теоретичні відомості:** Водяну пару використовують як робоче тіло теплових двигунів і як теплоносій в теплообмінних апаратах під таким тиском і при такій температурі, що не дають можливості розглядати її як ідеальний газ.

Розрізняють пару *насичену* і *ненасичену*. *Насиченою* називається пара, що знаходиться в термічній і динамічній рівновазі з рідиною, з якої вона утворилася. При цьому безупинно одна частина молекул переходить з рідини в пару (випаровування), а інша – з пари в рідину (конденсація).

Насичена пара може бути *вологою* і *сухою*. Пара, яка має температуру насичення при даному тиску і не містить рідкої фази, називається *сухою насиченою парою*. Пара, в якій температура більша за температуру насичення при даному тиску називається *перегрітою*.

Характеристикою водяної пари є міра сухості – що являє собою масову долю сухої пари у вологій парі ( $x$ ). Змінюється від 0 до 1. Для сухої пари  $x=1$ , для киплячої рідини  $x=0$ .

Величину  $(1-x)$  називають мірою вологості – масова доля води у вологій парі.

Експериментально було визначено, що температура кипіння води залежить від тиску і може змінюватись від 0,01 до  $273,115^{\circ}\text{C}$ .

### Завдання роботи

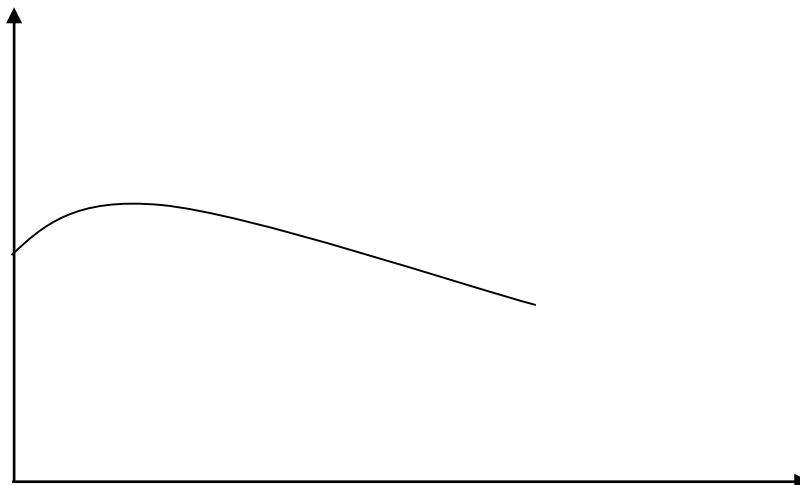
1. Визначити параметри водяної пари за допомогою  $Is$  - діаграми.
2. Виконати схематичне зображення на  $Is$  - координатах послідовність виконання завдання.
3. Визначити величину роботи, яку виконує водяна пара за даний процес та теплоту процесу

4. За допомогою діаграми знайти температуру сухої насиченої пари і визначити уточнені параметри для стану пари за допомогою таблиць водяної пари і води (дод.1).

**Дані до завдання**

Параметри по точкам	Номер варіанту									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1$ , бар	70		10		30			10		
$v_1$ , м <sup>3</sup> /кг		5,0		1,8		0,2				2,0
$t_1$				200	500			400	250	
$s_1$ , кДж/кгК	6,5								7,2	
$i_1$ , кДж/кг			3500			3000	2400			
$x_1$		0,90					0,85			0,92
т/д процес	Адiabатний	Изобарний	Изохорний	Изотермічний	Адiabатний	Изохорний	Изобарний	Изобарний	Изотермічний	Изохорний
$p_2$ , бар										
$v_2$ , м <sup>3</sup> /кг	0,2									
$t_2$		100					200			
$s_2$ , кДж/кгК				6,0		6,5			5,8	
$i_2$ , кДж/кг								2500		3200
$x_2$			0,95		0,85					

**Дайте схематичне зображення рішення задачі**



### **Визначити за таблицями води і водяної пари (додаток 1)**

1. Визначити різницю ентропії при температурі  $t = 235^{\circ}\text{C}$ .
2. Знайти в ізобарному процесі при  $p = 80$  бар питому теплоту.
3. Чому дорівнює теплота пароутворення при температурі  $t=150^{\circ}\text{C}$ .
4. Чому дорівнює міра вологості при  $x=0,7$ ?
5. При атмосферному тиску визначити температуру перегріву, якщо температура перегрітої пари  $t = 550^{\circ}\text{C}$ .

### **Запитання для самоперевірки:**

1. Які види водяної пари ви знаєте?
2. Від чого залежить температура насичення?
3. Яку величину називають мірою сухості і як вона змінюється?
4. Чим відрізняється суха пара від перегрітої?
5. Що таке конденсат?
6. Чому в області перегрітої пари немає ліній мір сухості?
7. Зобразити основні термодинамічні процеси на  $IS$  - координатах.
8. Яку величину називають мірою перегріву?
9. Чому водяну пару використовують в якості робочого тіла?
10. Пояснити призначення та принцип дії паросилової установки.



## Інструкційна картка 3 Практична робота № 3

**Тема:** Визначення потрібного повітрообміну в сільськогосподарському приміщенні.

**Мета:** Вивчити призначення, будову і принцип дії вентиляційно-опалювальних установок. Ознайомитись з методикою розрахунку повітрообміну в с-г. приміщенні.

**Матеріальне забезпечення:** Інструкційні картки, *id* - діаграми вологого повітря, додатки з таблицями, програмовані тести <https://onlinetestpad.com/hmrtg6tm37mek>.

**Теоретичні відомості:** Без створення мікроклімату важко одержати високу продуктивність тварин. При пониженій температурі і високій вологості повітря на 20% збільшуються витрати кормів, на 10% зменшуються надії молока.

Природній повітрообмін не може забезпечити оптимальних параметрів, тому тваринницькі приміщення обладнують системами вентиляції. Повітря, яке утримує в собі шкідливі домішки, концентрація яких перевищує допустимі норми, видаляється з приміщення і замінюється чистим атмосферним повітрям.

По призначенню вентиляційні системи діляться на витяжні, приточні і приточно-витяжні. По способу переміщення повітря вентиляція може бути природною і штучною, а по організації повітрообміну в приміщеннях – загальною, місцевою і змішаною. Подачу вентиляторів приймають на 10 – 15% більшою за необхідний повітрообмін.

Тепловіддача калориферів повинна бути на 10 - 20% більшою за розрахункову кількість теплоти, необхідної для нагрівання вентиляційного повітря.

Повітрообмін тваринницьких приміщень розраховують по теплоті та кількості надлишкової вологи з перевіркою на вуглекислоту.

### **Завдання роботи.**

Визначити необхідний повітрообмін в приміщенні для утримання тварин на *n* голів з середньою живою масою *m*, кг.

Внутрішні розміри приміщення для тварин *a-b-c* (довжина, ширина, висота).

Розрахункові параметри зовнішнього і внутрішнього повітря: температура  $t_{в}, t_{з}, ^\circ\text{C}$ ; відносна вологість повітря  $\varphi_{в}, \varphi_{з}\%$ . Тиск атмосферного повітря 760 мм. рт. ст.;  $q_{в}$  – питома вентиляційна характеристика будівлі, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $c'$  – об'ємна теплоємність повітря, прийняти 1,2 кДж/(м<sup>3</sup>·К).

### Дані до завдання

№	Параметри	в а р і а н т и			
		1	2	3	4
1.	Кількість тварин	300	350	400	450
2.	Тип тварин	корови лактуючі	телята до 1 міс.	телята 3- 4 міс.	телята 4 міс.
3.	Середня маса, кг	600	50	150	180
4.	Розміри приміщення, м	40	38	46	45
		28	20	25	28
		2,6	2,5	2,7	2,6
5.	Температура зовнішнього повітря $t_3$	Дод. 4	Дод. 4	Дод. 4	Дод. 4
6.	Відносна вологість зовнішнього повітря $\varphi_3$	45	40	35	50
7.	Температура внутрішнього повітря $t_в$	Дод. 2	Дод. 2	Дод. 2	Дод. 2
8.	Відносна вологість внутрішнього повітря $\varphi_в$	80	70	70	60
9.	Місце розташування	По варіанту	По варіанту	По варіанту	По варіанту
10.	Питома вентиляційна характеристика будівлі, $q_в$ Вт/(м <sup>3</sup> К·К)	1,147	1,048	1,251	1,231

### Хід роботи

Визначаємо повітрообмін для видалення надлишкової теплоти визначають за формулою:

$$L_Q = \frac{3,6}{c'} \left( \frac{nq}{t_e - t_3} - V_{пр} q_e \right), \text{ м}^3 / \text{год}$$

- де  $c'$  – об'ємна теплоємність повітря, прийняти рівною 1,3 кДж/(кг·К);  
 $q$  – виділення вільної теплоти однією твариною (дод. 3);  
 $V_{пр}$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;  
 $n$  – кількість тварин;  
 $q_в$  – питома вентиляційна характеристика будівлі, Вт/(м<sup>3</sup>·К).

Визначаємо повітрообмін для видалення надлишкової вологи:

$$L_w = \frac{1,1Wn}{(d_e - d_z)\rho}, \text{м}^3 / \text{год}$$

де  $W$  – кількість води, яку виділяє одна тварина (дод. 3); випаровування води з мокрих поверхонь приміщення складає 10% від загальних вологовиділень тварин;

$d_z, d_v$  – вологовміст зовнішнього і внутрішнього повітря визначаємо по  $id$  - діаграмі вологого повітря при температурі і відносній вологості повітря.

Густина повітря при атмосферному тиску визначаємо за формулою:

$$\rho = \frac{346}{273 + t_e}, \text{кг} / \text{м}^3.$$

Визначення повітрообміну по вуглекислоті:

$$L_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}n}{c_e - c_z}, \text{м}^3 / \text{год}$$

де  $V_{CO_2}$  – об'єм вуглекислоти, який виділяє одна тварина (дод. 3);

$c_v$  – допустима концентрація  $CO_2$  в тваринницькому приміщенні, 2,5 л/м<sup>3</sup>;

$c_z$  – вміст  $CO_2$  в зовнішньому повітрі, приймаємо рівним 0,3 л/м<sup>3</sup>;

$n$  – кількість тварин.

Серед отриманих результатів повітрообміну приймаємо найбільший і розраховуємо кратність повітрообміну.

Для сільськогосподарських приміщень кратність повинна бути в межах від 3 до 5.

$$m = \frac{L_{\max}}{V_{np}}, \text{год}^{-1}$$

де  $V_{np}$  – об'єм приміщення.

### **Запитання для самоперевірки:**

1. Що потрібно змінити, якщо кратність повітрообміну не лежить в заданих межах?
2. Що таке мікроклімат, його параметри.
3. Наведіть класифікацію вентиляції.
4. Охарактеризуйте природні види вентиляції.
5. Як визначити необхідний повітрообмін в с.-г. приміщенні?
6. Поясніть принцип користування діаграмою вологого повітря.
7. Дайте визначення, що таке вологе повітря і як визначають його вологовміст?
8. Що таке повітрообмін, в яких одиницях вимірюють його?
9. В яких межах повинна бути кратність повітрообміну в с.-г. приміщеннях?
10. Наведіть приклад ВОУ і поясніть принцип її роботи.

## Інструкційна картка 4

### Практична робота №4

**Тема:** Розрахунок теплових втрат сільськогосподарського приміщення.

**Мета:** Знайомство з принципом і порядком визначення теплових втрат приміщення для подальшого розрахунку та підбору системи опалення.

**Матеріальне забезпечення:** інструкційні картки, додатки, програмовані тести <https://onlinetestpad.com/hmrtg6tm37mek>.

**Теоретичні відомості:** Теплова потужність опалювальних приладів визначається на основі рівняння теплового балансу приміщення:

$$Q_{\text{опал.}} = Q_{\text{втрат.}}$$

Теплові втрати визначають як суму втрат теплоти через зовнішні огороження (стіни, стелю, підлогу, вікна, двері). Додаткові витрати тепла через зовнішні стіни і вікна складають 25% від загальних ( 15% на вітер і 10% на етажність будівлі). Витрати через підлогу визначаються за окремими зонами - смугами по двом паралельним зовнішнім стінам. Формуються зони, починаючи від стін. Втрати теплоти не враховуються, якщо різниця температур складає не більше 5°C.

**Завдання роботи:** Визначити теплові втрати сільськогосподарського приміщення по відповідним даним:

№	Вихідні дані до роботи	1 варіант	2 варіант	3 варіант
1.	Призначення приміщення.	Майстерня	Склад	Контора
2.	Місце розташування	За варіантом	За варіантом	За варіантом
3.	Розміри будівлі	5 х 10 х 4 м	10 х 20 х 3м	6 х 4 х 2,5 м
4.	Товщина зовнішньої стіни і штукатурки	3 глиняної цегли 510 мм штукатурка - 20 мм з однієї сторони	3 силікатної цегли 510 мм штукатурка по 20 мм з обох сторін	3 силікатної цегли 410 мм штукатурка по 25 мм з обох сторін
5.	Товщина підлоги	Бетон на гравії 0,2 м	Бетон на гравії 30 см	Бетон на гравії 0,3 м
6.	Товщина стелі	Керамзитобетон 0,3 м	Керамзитобетон 40 см	Керамзитобетон 0,4 м
7.	Температура зовнішнього повітря	З додатка 4	З додатка 4	З додатка 4
8.	Температура внутрішнього повітря	З додатка 2	З додатка 2	З додатка 2
9.	Розміри та кількість вікон	1,7х1,9м - 3 штуки подвійним склінням в дерев'яних рамах	1,0х0,5м – 5 штук подвійним склінням в металевих рамах	1,5х1м – 2 штуки з подвійним склінням в металевих рамах

### Хід роботи:

#### **Визначаємо втрати теплоти через всі огорожуючі поверхні**

$$Q_{\text{втр.}} = Q_{\text{стіни}} + Q_{\text{вікна}} + Q_{\text{стелі}} + Q_{\text{підлоги}}$$

По умові завдання визначаємо термічні опори всіх огорожуючих поверхонь.

#### **Термічний опір для зовнішньої стіни:**

$$R_c = R_v + \frac{\delta_{\text{ц}}}{\lambda_{\text{ц}}} + \frac{\delta_{\text{шт}}}{\lambda_{\text{шт}}} + R_3, \frac{\text{м}^2 \text{град}}{\text{Вт}}$$

де  $R_v$ , – термічний опір внутрішньої поверхні стінки (дод. 5);

$\delta_{\text{ц}}$ ,  $\delta_{\text{шт}}$  – товщина цегли і штукатурки, м;

$R_3$  – термічний опір зовнішньої поверхні стінки (дод. 5);

$\lambda_{\text{ц}}$ ,  $\lambda_{\text{шт}}$  – коефіцієнти теплопровідності цегли і штукатурки, Вт/(м град) (дод. 6);

Через внутрішні стінки втрати теплоти не враховуються, із-з невеликого перепаду температур (не більше 5°C).

#### **Для розрахунку термічного опору підлоги:**

$$R_n = R_v + \frac{\delta}{\lambda} + R_3, \frac{\text{м}^2 \text{град}}{\text{Вт}},$$

$R_v$ ,  $R_3$  – термічний опір поверхні підлоги вибираємо з додатка.

#### **Опір теплопередачі стелі:**

$$R = R_v + \frac{\delta}{\lambda} + R_3, \frac{\text{м}^2 \text{град}}{\text{Вт}},$$

$R_v$ ,  $R_3$  вибирають з дод. 5.

**Опір теплопередачі вікон**  $R_{\text{вікна}}$  підбираємо за додатком 5 по відповідній умові.

#### **Визначаємо основні втрати теплоти огорожуючих поверхонь**

Визначаємо  $A$  – площу огорожуючих поверхонь, м<sup>2</sup> по даним варіанту і підставляємо в розрахунок основних втрат.

Теплові втрати через зовнішню стіну:

$$Q = \frac{A_{\text{ст}}}{R_{\text{ст}}} (t_B - t_3), \text{Вт.}$$

Теплові втрати через підлогу:

$$Q = \frac{A_{\text{підл}}}{R_{\text{підл}}} (t_B - t_3), \text{Вт.}$$

Теплові втрати через стелю:

$$Q = \frac{A_{cm}}{R_{cm}} (t_B - t_3), \text{ Вт.}$$

Теплові втрати через вікна:

$$Q = \frac{A_{вік}}{R_{вік}} (t_B - t_3), \text{ Вт}$$

де  $t_B$  – внутрішня температура в приміщенні, °С;

$t_3$  – зовнішня температура самої холодної п'ятиденки року регіону, °С;

$A$  – площа огороджуючої поверхні, м<sup>2</sup>.

$R$  – термічний опір теплопередачі, (м<sup>2</sup>град)/Вт.

**Втрати теплоти приміщення:**

$$Q_{пр} = Q_{ст} + Q_{стелі} + Q_{вік} + Q_{підл.}$$

Суму основних втрат збільшуємо на величину втрат теплоти на інфільтрацію повітря, які складають 25 % від повних втрат

$$Q_{інф} = 0,25 Q_{пр}.$$

**При оцінюючих розрахунках витрати повітря на вентиляцію можна визначити за кратністю повітрообміну:**

$$m = \frac{L_{max}}{V_{пр}} \quad \text{знаходимо } L_{max} = m V_{пр}.$$

Для тваринницьких приміщень кратність повинна лежати в межах  $m=[3-5]$ . Вибираємо будь-яке значення та визначаємо максимальний повітрообмін  $L_{max}$ , м<sup>3</sup>/год.

**Втрати теплоти на нагрівання вентиляційного повітря для холодного періоду року визначають за формулою:**

$$Q_T = 0,278 L_{max} \rho \times c (t_B - t_3),$$

де  $L_{max}$  – максимальний повітрообмін м<sup>3</sup>/год;

$\rho$  – густина зовнішнього повітря, яка залежить від температури, кг/м<sup>3</sup>;

$$\rho = 346 / (273 + t_3);$$

$c$  – питома об'ємна теплоємність повітря, прийняти рівною 1,3 Дж/(кг град);

**Визначаємо повні втрати теплоти даного приміщення:**

$$Q = Q_{пр} + Q_{інф} + Q_T.$$

У висновках навести шляхи зменшення теплових втрат приміщень.

**Питання для самоперевірки:**

1. Що таке мікроклімат?
2. В яких межах повинна бути кратність повітрообміну для с.-г. приміщень?

3. Які теплоносії найбільше використовують в системах опалення?
4. Яка система опалення являється найпоширенішою?
5. Як визначити основні втрати теплоти з приміщення?
6. Від чого залежить зовнішня температура для розрахунку теплових втрат?
7. Які втрати відносять до додаткових?
8. Що таке інфільтрація і як її можна зменшити?
9. Як можна зменшити втрати теплоти в приміщенні?
10. Поясніть поняття «тепловізійне обстеження»?

## Інструкційна картка 5

### Практична робота №5

**Тема:** Визначення параметрів конвективного сушіння за допомогою *Id*-діаграми вологого повітря.

**Мета:** Вивчити призначення, класифікацію, принцип роботи сушарок конвективної дії. Оволодіти методикою визначення параметрів конвективного сушіння за допомогою діаграми вологого повітря.

**Матеріальне забезпечення:** інструкційні картки, пакет *Id* - діаграм для вологого повітря, додатки з параметрами сушки, програмовані тести <https://onlinetestpad.com/hpcud3hyngeay>.

**Теоретичні відомості:** Сушіння – це процес видалення вологи з матеріалу. У сільському господарстві найбільш поширений конвективний спосіб сушіння, при якому сушка матеріалу виконується за допомогою сушильного агента. Сушильним агентом служить нагріте в теплогенераторі повітря (або суміш повітря з димовими газами), яке надходить одночасно з продуктами сушіння в сушильні камери. При нагріві продукт втрачає певну кількість вологи, яка з агентом сушіння видаляється із сушильної камери. Далі просушений продукт надходить до охолоджуючої камери, в якій під дією холодного атмосферного повітря охолоджується і виходить із сушарки.

Тепловий розрахунок конвективної сушарки включає в себе: визначення початкових параметрів сушильного агента; кількість випаруваної вологи; втрати на нагрівання продукту; витрати сушильного агента; теплоти на сушіння; кількості повітря для охолодження.

#### **Завдання роботи**

Визначити кількість випаруваної вологи із продукту, витрату сушильного агента, витрату теплоти на сушку по заданим даним:

Параметри сушки	варіант	варіант	варіант	варіант	варіант	варіант
	1	2	3	4	5	6
Культура	Пшениця	Ячмінь	Гречка	Горох	Кукурудза	Жито
$M_1$ , т/год	5	5	5	5	5	5
$\omega_1$ , %	20	25	20	30	25	20
$\omega_2$ , %	15	10	15	20	15	10
$t_0$ , °C	10	15	20	15	10	20
$\varphi_0$ , %	40	50	45	55	60	65
$t_3$ , °C	30	60	45	35	40	35
$t_1$ , °C	70	120	100	90	80	70
$Q_{н^p}$ , МДж/кг	20	22	25	30	28	23
$\eta_t$	0,7	0,8	0,7	0,65	0,75	0,65



Де  $M_1$  – масова витрата культури;  $\omega_1, \omega_2$  – вологість культури на вході і виході із сушарки;  $\varphi_0$  – відносна вологість зовнішнього повітря;  $t_0$  – температура зовнішнього повітря;  $t_1$  – температура агента сушіння в сушарці;  $t_3$  – температура повітря на виході із охолоджуючої камери;  $\eta_t$  – коефіцієнт корисної дії;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – робоча теплота згоряння палива.

### Хід роботи

#### **1. Визначення кількості вологи, що випарувалась**

Маса вологи дорівнює різниці між масою продукту до і після сушки:

$$W = M_1 - M_2.$$

Маса сухого продукту в процесі сушки не змінюється:

$$M_2 = \frac{M_1(100 - \omega_1)}{100 - \omega_2}, \text{ кг/год}$$

Кількість випаруваної вологи, виражена через абсолютну вологість:

$$W = M_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1}, \text{ кг/год}$$

Відносна втрата в масі продукту:

$$Y = \frac{(M_1 - M_2)100\%}{M_1}.$$

#### **2. Визначення витрати сушильного агента**

Кількість вологи, яка випаровується у сушарці, визначають за кількістю і характеристикою повітря, що надходить в сушарку і виходить з неї.

Кількість сушильного агента:

$$L = \frac{1000W}{d_2 - d_1}, \text{ кг/(кггод)}$$

де  $d_1, d_2$  – вологовміст агента сушки до і після сушильної камери, г/кг, який знаходиться по  $hd$  - діаграмі вологого повітря по заданим температурі і відносній вологості (дод. 9)

Витрата повітря на випаровування 1 кг вологи:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0}, \text{ кг/кг}.$$

При використанні нагрітого повітря  $d_0 = d_1$ , тобто вологовміст до і після калорифера однаковий.

#### **3. Визначення витрати теплоти на сушіння.**

Витрати теплоти знаходять по формулі:

$$Q = Wq, \text{ кДж/год},$$

де  $q$  – питома витрата теплоти, кДж/кг:

$$q = l(i_1 - i_0),$$

де  $i_1, i_0$  – ентальпії (тепловміст) вологого повітря до і після процесу сушіння, кДж/кг.

Тепловміст знаходять по  $hd$  - діаграмі вологого повітря (додаток. 9), відповідно до температури і відносної вологості кДж/кг.

Знаходимо годинну витрату палива:

$$B_{год} = \frac{Q}{Q_{it}^p \eta_t}, \text{ кг / год.}$$

### **Запитання для самоперевірки:**

1. Який процес називається сушінням, яке значення має цей процес для с.-г.?
2. Перелічіть основні форми зв'язку вологи з матеріалом.
3. Що таке агент сушіння і якими параметрами він характеризується?
4. Які властивості вологого матеріалу потрібно знати для організації процесу сушіння?
5. Перелічіть способи сушіння. Які з них найбільше використовуються в с.-г.?
6. Що таке активне вентилявання і коли його застосовують?
7. В чому суть конвективної сушки?
8. Наведіть класифікацію сушильних установок.
9. Пояснити принцип роботи конвективної сушарки типу АВМ.
10. Поясніть принцип користування  $id$  - діаграмою вологого повітря.

## Інструкційна картка 5

### Практична робота № 6

**Тема:** Вивчення будови та роботи компресійної холодильної установки

**Мета:** Виконання калоричного розрахунку холодильника, для визначення добової витрати холоду.

**Завдання роботи:** вивчити будову та роботу парової компресійної холодильної установки, провести калоричний розрахунок холодильника.

**Матеріальне забезпечення:** інструкційні картки, додатки, модель холодильної установки, програмовані тести <https://onlinetestpad.com/hmx37gvue5odu>

**Теоретичні відомості:** Холодильна машина призначення для відведення теплоти від охолоджуваного об'єкту (тіла з більш низькою температурою) і передачі її навколишнє середовище з більш високою температурою (повітря, воду і т. д.).

Кожна речовина може знаходитися в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому і газоподібному. Для переведення із одного стану в інший до речовини необхідно підвести необхідну кількість теплової енергії. Так, для того щоб заморозити 1 кг води, або розтопити 1 кг льоду, необхідно відповідно відвести або підвести 335,2 кДж. Теплової енергії. Аналогічне явище спостерігається при переході рідини в газоподібний стан і під час перетворення газу в рідину (при конденсації). Кількість теплоти, необхідної для здійснення цих процесів, також є величиною постійною і для 1 кг води при нормальному атмосферному тиску рівна близько 2259 кДж.

Температура кипіння рідини змінюється в залежності від тиску. Чим вищий тиск, тим вища температура при якій рідина кипить або конденсується.

Відомо також, що теплота завжди переходить від тіла з високою температурою до тіла з більш низькою температурою. Перехід теплоти від холодного тіла до теплого можливий лише тоді, коли на це витрачається підведена зовні деяка кількість енергії.

Всі перераховані вище властивості використані в техніці для отримання штучного холоду.

Принцип дії холодильної установки визначається основним законом термодинаміки. В парокомпресійній холодильній установці для перенесення теплоти  $Q_0$  від більш холодного тіла (холодного джерела з температурою  $T_{х,д}$ ) в навколишнє середовище з більш високою температурою ( $T_{н,с}$ ) потрібно затратити роботу  $L_k$  (в даному випадку робота компресора). Робоче тіло

холодильної машини (холодильний агент) виконує замкнутий цикл, періодично повертаючись в першопочатковий стан.

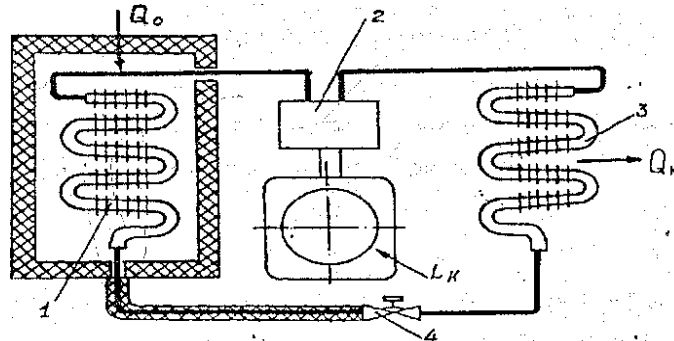
В цьому коловому процесі теплота  $Q_k$  віддається навколишньому середовищу. На основі першого закону термодинаміки рівняння теплового балансу холодильної машини пишеться:

$$Q_k = Q_0 + L_k,$$

де  $Q_k$  – теплота, що віддається конденсатором в навколишнє середовище;  
 $Q_0$  – теплота відведена від охолоджуваного об'єкту;  
 $L_k$  – робота компресора.

### Будова та принцип роботи холодильної машини

Кожна холодильна машина складається з чотирьох частин: випарника 1, компресора 2, конденсатора 3 і регулюючого вентиля (дроселя) 4, з'єднаних між собою трубопроводами. По замкнутому контуру цієї системи циркулює холодний агент – речовина, здатна кипіти при низьких температурах. В процесі циркуляції вона змінює свій агрегатний стан, періодично перетворюючись у пару або рідину.



1 – випарник; 2 – компресор; 3 – конденсатор; 4 – дросель  
Рисунок 1 – Схема парової компресійної холодильної установки

У випарнику 1 рідкий холодильний агент при порівняно низькому тиску, поглинаючи теплоту від охолоджувального продукту, перетворюється у пару. Температура рідкого холодильного агента змінюється в залежності від тиску випаровування. Для отримання холоду необхідно у випарнику підтримувати такий тиск, при якому температура кипіння холодильного агента була б нижчою температури охолоджуваного об'єкта.

Компресор 2 відсмоктує пару із випарника і стискає її. Робота, затрачена на стискання, перетворюється у теплоту, тому поряд із збільшенням тиску підвищується і температура пари. Із компресора стиснена пара спрямовується в конденсатор 3. Так як пара знаходиться під високим тиском вона може конденсуватися при відносно високій температурі.

Обдуваючи зовнішню поверхню конденсатора повітрям, її заставляють конденсуватись. Для охолодження конденсатора можна використовувати воду або інші речовини.

Утворений в конденсаторі рідкий холодильний агент спрямовується в регулювальний вентиль (дросель) 4. Тут, проходячи через отвір невеликого діаметру і отримуючи великій гідравлічний опір, рідина дроселюється, тобто її тиск різко падає. Потрапляючи потім у випарник, вона при низькому тиску отримує здатність кипіти. Утворена в результаті цього пара знову засмоктується компресором, потім потрапляє в конденсатор, дросель, випарник і т. д. В процесі отримання штучного холоду кількість холодильного агента не змінюється – він безперервно циркулює по замкнутій системі, відводячи теплоту від охолоджуваного об'єкта, проходячи через випарник, і віддає теплоту навколишньому середовищу через конденсатор.

Ефективність роботи холодильної машини оцінюється холодильним коефіцієнтом, який визначається із співвідношення:

$$E = \frac{Q_0}{L_k},$$

де  $E$  – холодний коефіцієнт;

$Q_0$  – теплота, відведена від охолоджуваного об'єкта;

$L_k$  – робота компресора.

Щоб збільшити ефективність холодильних машин і підвищити надійність, в їх схему включають додаткові ємності і апарати (теплообмінник, ресивер і ін.). Прилади автоматики і контролю полегшують обслуговування і забезпечують безпечну роботу холодильних машин.

Для отримання холоду в холодильних машинах застосовують речовини (робочі тіла), які називають холодоагентами. Найбільш розповсюджені серед них – фреони і аміак.

Фреони – похідні метану і етану. Із групи фреонів найбільш розповсюджений фреон – 12 (  $\text{CF}_2 \text{Cl}_2$  ). Фреон – 12 не шкідливий для здоров'я людини, не горить, розчиняє гуму. Фреон – 12 має велику текучість, що дає змогу йому проникати через найменші нещільності і навіть пори металу, розчиняючи неметалеві включення, він не має запаху, тому його витікання через нещільності важко виявляти.

Фреон – 12 застосовують у великих, середніх і малих компресійних холодильних машинах з температурою випаровування до  $-70^{\circ}$  і температурою конденсації до  $60^{\circ}$ .

Аміак ( $\text{NH}_3$ ) – безколірний газ із сильним ядучим (задушливим) характерним запахом. На мідь і її сплави він чинить руйнівну дію, він вибухонебезпечний при певних концентраціях в атмосферному повітрі,

шкідливо діє на організм людини. Аміак застосовують в холодильних машинах великої і середньої холодопродуктивності с температурою випаровування до  $-70^{\circ}$ .

### Завдання роботи

Вивчити будову холодильної установки та призначення її основних елементів. Виконати калоричний розрахунок холодильної установки

#### **Вихідні дані**

Дані	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вид тари	дерево	картон	картон	залізо	пластмаса	картон	пласт.	картон	дерево	залізо
Маса продукту, кг	150	350	500	130	150	190	300	100	100	340
Вид продукту	Плоди	Риба	свинина	Яловичина	Свинина	Яловичина	Свинина	Плоди	Плоди	Свинина
$\varphi_k$	70	65	90	90	70	75	70	85	80	80
$\varphi_{пр.}$	60	50	75	80	65	55	60	65	70	55
$t_{з.п.}$	10	25	20	15	20	15	15	10	25	25
$t_{х.к.}$	0	-1	-3	-5	-2	-1	-3	-5	1	-2

**Добова витрата холоду визначається з виразу**

$$Q = \Sigma Q_1 + \Sigma Q_2 + Q_3 + Q_4; \text{ кДж/добу}$$

де  $Q$  – добова витрата холоду кДж/добу;

$Q_1$  – витрати холоду через огороження холодильника, кДж/добу;

$\Sigma Q_2$  – витрати холоду на термообробку (охолодження та моржування) продукту і тари кДж/добу;

$Q_3$  – витрати холоду на вентиляцію холодильної камери кДж/кг;

$Q_4$  – експлуатаційні витрати холоду, кДж/кг.

**Витрати холоду через огороження холодильника визначається формулою:**

$$\Sigma Q_1 = 3,6 \cdot 24 \cdot \kappa F (T_n - T_k),$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт теплопередачі через огороження холодильника, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

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

$T_n$  – температура повітря в приміщенні, °К;

$T_k$  – температура повітря в холодильній камері, °К.

При визначенні площі поверхні холодильної камери слід користуватись об'ємом охолоджуваного продукту. Об'ємна вага продуктів приведена в таблиці (дод. 8).

**Коефіцієнт теплопередачі визначається з виразу:**

$$\kappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі повітря до зовнішньої стінки холодильника, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої стінки холодильника до повітря його камери, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_i$  – товщина  $i$ -того шару стінки холодильника, м;

$\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності  $i$  - того шару стінки холодильника, Вт/(м·К).

**Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  можна прийняти рівними:**

$$\alpha_1 = 15 \text{ Вт/(м}^2\text{ К); } \alpha_2 = 6 \text{ Вт/(м}^2\text{ К).}$$

Стінка досліджуваної холодильної камери має 3 шари:

зовнішній шар виконаний із сталюого листа товщиною

$$\delta_{ст} = 1,5 \text{ мм, } \lambda_{ст} = 50 \text{ Вт / Вт/(м·К),}$$

внутрішній шар виконаний з теплоізоляційного матеріалу товщиною

$$\delta_1 = 60 \text{ мм, } \lambda_1 = 0,05 \text{ Вт/(м·К),}$$

третій шар виконаний з пластику товщиною

$$\delta_{пл} = 3,5 \text{ мм, } \lambda_{пл} = 0,3 \text{ Вт/(м·К).}$$

**Витрата холоду на термообробку продукту і тари буде рівнятися:**

$$\Sigma Q_2 = m (i^n_{п} - i^n_{к}) + M_T \cdot c_T (T_n - T_k),$$

де  $m$  – кількість продуктів, що піддаються термообробітку на протязі доби, кг;

$i^n_n$  – ентальпія продукту на початку охолодження кДж/кг;

$i_k^n$  – ентальпія продукту в кінці охолодження кДж/кг, ентальпію продукту визначати з таблиці (дод. 8)

$M_T$  – маса тари, кг (масу тари приймають в процентному відношенні від добового поступлення продуктів у камеру. Для дерев'яної тари її можна прийняти рівною 15%, металевій – 25%, скляній – 100%, картонній – 10%, пластмасовій – 12%).

$C_T$  – теплоємність тари, кДж/кг  $^{\circ}\text{K}$  (дерево – 2,5; метал – 0,46; скло – 0,84; картон – 1,5; пластмаса – 1,8).

**Витрати холоду на вентиляцію холодильної камери визначається з виразу:**

$$Q_3 = a/24 V \cdot \rho (i_n - i_k),$$

де  $a$  – кратність повітрообміну в камері ( $a = 2 - 3$ );

$V$  – об'єм камери,  $\text{м}^3$ ;

$\rho$  – густина повітря при температурі камери,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$i_n$  – тепловміст зовнішнього повітря, кДж/кг;

$i_k$  – тепловміст повітря в камері кДж/кг;

Тепловміст повітря, в залежності від його температури і відносної вологості, визначається з діаграми (дод. 9).

**Густина повітря визначається за формулою:**

$$\rho = 0,465 P_{\text{бар}} / T_k,$$

де  $P_{\text{бар}}$  – барометричний тиск, 760 мм. рт. ст.

$T_k$  – температура повітря в камері,  $^{\circ}\text{K}$ .

Експлуатаційні втрати холоду становлять 10 - 40% від  $\Sigma Q_1$ ;

$$Q_4 = (0,1 \dots 0,4) \Sigma Q_1.$$

Підставивши отримані значення втрат холоду  $\Sigma Q_1$ ;  $\Sigma Q_2$ ;  $Q_3$ ;  $Q_4$ .

**Визначаємо добову витрату холоду досліджуванним холодильником.**

$$Q = \Sigma Q_1 + \Sigma Q_2 + Q_3 + Q_4, \text{ кДж/добу.}$$

### **Запитання для самоперевірки:**

1. Які типи холодильників ви знаєте?
2. Що таке холодильний коефіцієнт?
3. Які вам відомі робочі речовини, що використовують в холодильних установках, крім фреону і аміаку?
4. З якою ціллю і де у сільськогосподарському виробництві використовуються холодильні установки?
5. Яка різниця між холодильником та тепловим насосом?



## ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт складається на стандартних листах формату А4.

Звіт повинен складатися з розділів:

- короткий теоретичний огляд;
- принципова схема експериментальної установки та її опис;
- методика виконання роботи;
- результати експериментальних досліджень та їх математичний обробіток.

При складанні звіту необхідно дотримуватись таких вимог:

- розрахунки супроводжувати коротким пояснювальним текстом, вказати, яка величина визначається і за якою формулою, які величини використані у формулі;
- обчислення додавати у розгорнутому вигляді;
- розмірності усіх заданих та розрахованих величин підставляти в одиницях СІ;
- графічний матеріал має бути виконаний чітко в масштабі на міліметровому папері.

Після розрахунків і виконання графічної частини має бути проведений короткий аналіз отриманих результатів і зроблені відповідні висновки.

## ДОДАТКИ

### Додаток 1 – Параметри води і водяної пари

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{бар}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$s', \text{кДж/кгК}$	$s'', \text{кДж/кгК}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,01	0,006108	0,0010002	206,175	0,00061	2500,64	2500,64	0	9,1544
5	0,008719	0,00100008	147,15	21,0496	2509,98	2488,93	0,0764	9,0242
10	0,012271	0,00100035	106,42	42,0364	2519,24	2477,2	0,1511	8,8996
15	0,017041	0,00100095	77,973	62,9826	2528,44	2465,45	0,2245	8,7803
20	0,023368	0,00100184	57,836	83,9034	2537,58	2453,68	0,2964	8,6662
25	0,031663	0,00100301	43,401	104,809	2546,68	2441,87	0,3671	8,5569
30	0,042418	0,00100442	32,929	125,706	2555,73	2430,02	0,4366	8,4523
35	0,056218	0,00100605	25,245	146,6	2564,74	2418,14	0,5050	8,3520
40	0,07375	0,00100789	19,546	167,495	2573,7	2406,21	0,5722	8,2559
45	0,095818	0,00100993	15,276	188,393	2582,62	2394,23	0,6384	8,1637
50	0,12335	0,0010121	12,045	209,296	2591,48	2382,18	0,7036	8,0752
55	0,1574	0,0010145	9,5779	230,208	2600,28	2370,08	0,7678	7,9902
60	0,19919	0,0010171	7,6775	251,129	2609,03	2357,9	0,8311	7,9085
65	0,25008	0,0010199	6,2012	272,062	2617,7	2345,63	0,8934	7,8299
70	0,3116	0,0010228	5,0453	293,009	2626,29	2333,28	0,9549	7,7543
75	0,38547	0,0010258	4,1332	313,971	2634,8	2320,83	1,0155	7,6815
80	0,47359	0,001029	3,4083	334,952	2643,22	2308,27	1,0753	7,6114
85	0,57803	0,0010324	2,8282	355,953	2651,56	2295,59	1,1344	7,5428
90	0,70109	0,0010359	2,3609	376,977	2659,76	2282,79	1,1926	7,4785
95	0,84527	0,0010396	1,982	398,027	2667,86	2269,84	1,2501	7,4155
100	1,01325	0,0010434	1,673	419,105	2675,84	2256,73	1,3070	7,3546
105	1,208	0,0010474	1,4193	440,21	2683,68	2243,47	1,3631	7,2957
110	1,4326	0,0010515	1,2101	461,36	2691,38	2230,02	1,4186	7,2387
115	1,6905	0,0010558	1,0364	482,54	2698,93	2216,39	1,4734	7,1834
120	1,9854	0,0010603	0,89167	503,76	2706,31	2202,54	1,5277	7,1298
125	2,3208	0,0010649	0,77041	525,03	2713,52	2188,49	1,5814	7,0779
130	2,7011	0,0010697	0,66837	546,35	2720,54	2174,19	1,6345	7,0273
135	3,1306	0,0010747	0,58201	567,72	2727,37	2159,65	1,6870	6,9782
140	3,6136	0,0010798	0,50865	589,15	2733,99	2144,85	1,7391	6,9304
145	4,1549	0,0010851	0,44611	610,64	2740,4	2129,76	1,7906	6,8838
150	4,7597	0,0010906	0,39259	632,19	2746,57	2114,38	1,8417	6,8884
155	5,433	0,0010962	0,34654	653,82	2752,5	2096,69	1,8923	6,7940
160	6,1804	0,0011021	0,30685	675,51	2758,18	2082,66	1,9425	6,7506
165	7,0075	0,0011081	0,27247	697,29	2763,59	2066,3	1,9923	6,7082
170	7,9203	0,0011144	0,24262	719,15	2768,72	2049,56	2,0417	6,6666
175	8,9247	0,0011208	0,21659	741,11	2773,55	2032,45	2,0907	6,6258
180	10,027	0,0011275	0,19385	763,15	2778,09	2014,93	2,1394	6,5868
185	11,234	0,0011344	0,17390	785,30	2782,30	1997,00	2,1877	6,5464
190	12,552	0,0011415	0,15635	807,55	2786,18	1978,63	2,2356	6,5077
195	13,989	0,0011489	0,14088	829,92	2789,72	1939,80	2,2833	6,4695
200	15,550	0,0011565	0,12719	852,41	2792,86	1940,44	2,3307	6,4318

1	2	3	4	5	6	7	8	9
205	17,246	0,0011644	0,11505	852,02	2795,61	1920,59	2,3779	6,3945
210	19,079	0,0011726	0,10427	897,78	2797,98	1900,20	2,4247	6,3576
215	21,062	0,0011812	0,09465	920,67	2799,94	1835,66	2,4714	6,3211
220	23,201	0,0011900	0,08606	913,72	2801,48	1812,93	2,5179	6,2849
225	25,504	0,0011992	0,07838	966,93	2802,59	1789,54	2,5641	6,2400
230	27,979	0,0012087	0,07147	990,32	2803,25	1763,46	2,6103	6,2133
235	30,635	0,0012187	0,06527	1013,89	2803,43	1715,10	2,6562	6,1778
240	33,480	0,0012291	0,05967	1037,66	2803,13	1763,46	2,7021	6,1425
245	36,525	0,0012339	0,05463	1061,63	2802,30	1740,66	2,7479	6,1072
250	39,776	0,0012512	0,05006	1085,84	2800,93	1715,10	2,7936	6,0719
255	43,224	0,0012631	0,04592	1110,28	2799,01	1688,72	2,8392	6,0366
260	46,940	0,0012755	0,04215	1134,99	2796,48	1661,49	2,8849	6,6012
265	50,872	0,0012866	0,03872	1159,98	2793,32	1633,34	2,9306	5,9657
270	55,051	0,0013023	0,0356	1185,26	2789,48	1604,22	2,9764	5,9299
275	59,448	0,0013168	0,03275	1210,87	2784,92	1574,05	3,0223	5,8938
280	64,191	0,0013321	0,03013	1236,83	2779,60	1542,77	3,0683	5,8573
285	69,175	0,0013483	0,02776	1263,18	2773,44	1510,27	3,1143	5,8203
290	74,449	0,0013655	0,02584	1289,94	2766,39	1476,45	3,1610	5,7827
295	80,025	0,0013889	0,02351	1317,17	2758,36	1441,19	3,2078	5,7444
300	85,917	0,0014036	0,02164	1344,94	2749,26	1404,36	3,2349	5,7051
305	92,136	0,0014247	0,01992	1373,20	2738,96	1365,76	3,3026	5,6648
310	98,697	0,0014475	0,01832	1402,13	2727,30	1325,17	3,3508	5,6232
315	105,61	0,0014722	0,01683	1431,76	2714,19	1282,43	3,3996	5,5800
320	112,90	0,0014992	0,01545	1462,21	2699,69	1237,48	3,4493	5,5356
325	120,57	0,0015289	0,01417	1493,57	2683,55	1189,98	3,5001	5,4895
330	128,64	0,0015620	0,01297	1526,01	2665,51	1139,50	3,5520	5,4412
335	137,14	0,0015990	0,01184	1559,73	2645,22	1085,49	3,6034	5,0329
340	146,08	0,0016390	0,01078	1594,88	2622,08	1027,20	3,6606	5,3359
345	155,48	0,0016860	0,00977	1631,86	2595,42	963,560	3,7181	5,2769
350	165,87	0,0017410	0,00881	1671,23	2564,26	893,020	3,7788	5,2119
355	175,76	0,0018070	0,00787	1713,92	2527,05	813,130	3,8441	5,1386
360	186,74	0,0018940	0,00694	1761,54	2481,11	719,560	3,9164	5,3903
365	198,29	0,0020160	0,00600	1817,58	2420,94	603,560	4,0010	4,9463
370	210,52	0,0022250	0,00493	1892,40	2330,73	438,380	4,1137	4,7953
374	220,87	0,0028300	0,00348	2039,00	2151,00	412,000	4,3258	4,5029

Параметри критичної точки: температура 374,116°C, тиск 22,1145 МПа, об'єм 0,003147 м<sup>3</sup>/кг, ентальпія 2096,2 кДж/кг, ентропія 4,424 кДж/(кг град).

**Додаток 2 – Середні значення розрахункових температур внутрішнього повітря**

Приміщення	Температура	Відносна вологість, %
Житлові будинки	18	
Учбові заклади, контори	16	
Майстерні	20	
Лікарні	20	
Теплиці	15	
Парники	15	
Корівники, телятники	10	70
Свинарники	16	75
Пташник	14	65
Складське приміщення	14	

У всіх тваринницьких приміщеннях допускається вміст CO<sub>2</sub> до 2,5 л/м<sup>3</sup>, NH<sub>3</sub> до 0,5 л/м<sup>3</sup>.

В пташниках допустима концентрація CO<sub>2</sub> 1,8-2,0 л/м<sup>3</sup>, NH<sub>3</sub> 0,01мг/л, H<sub>2</sub>S 0,005 мг/л.

**Додаток 3 – Норми виділення тваринами теплоти, вуглекислоти і водяних парів**

Вид і група тварин	Жива маса, кг	Вільної теплоти, Вт	Вуглекислоти, л/год.	Водяних парів, г/год.
Корови тільні	400	640	110	350
	600	779	138	440
Корови лактуючі	300	543	96	307
	500	810	143	413
	600	876	156	494
Телята до 1 місяця	50	144	26	83
	80	215	38	121
Телята 3-4 місяця	90	207	37	118
	150	321	57	183
Телята 4 місяця	120	270	48	153
	180	406	71	227
Молодняк	50	157	27	77
	80	220	38	107
Свині відгодівельні	200	358	63	175
	300	471	83	230

Кількість виділень приведено при температурі внутрішнього повітря 10°C і відносної вологості 70%.

**Додаток 4 – Температура зовнішнього повітря в окремих населених пунктах для холодного періоду року**

Назва населеного пункту	Температура, °С	
	Опалення	Вентиляція
Вінниця	-21	-10
Дніпро	-24	-9
Донецьк	-24	-10
Євпаторія	-16	-3
Житомир	-21	-9
Запоріжжя	-20	-9
Київ	-22	-10
Кропивницький	-21	-9
Кривий Ріг	-17	-8
Луганськ	-26	-10
Луцьк	-23	-7
Львів	-22	-6
Маріуполь	-21	-6
Мелітополь	-19	-8
Миколаїв	-19	-7
Одеса	-16	-6
Полтава	-22	-10
Рівне	-23	-9
Сімферополь	-19	-4
Суми	-26	-11
Тернопіль	-25	-9
Ужгород	-18	-6
Феодосія	-13	-2
Харків	-25	-11
Херсон	-20	-6
Хмельницький	-24	-9
Черкаси	-21	-8
Чернівці	-20	-9
Чернігів	-22	-10
Ялта	-7	+1

### Додаток 5 – Термічні опори поверхонь

Термічний опір підлоги $R$ , (м <sup>2</sup> град)/Вт	Термічний опір зовнішньої стіни $R$ , (м <sup>2</sup> град)/Вт	Термічний опір стелі $R$ , (м <sup>2</sup> град)/Вт	Термічний опір вікон $R$ , (м <sup>2</sup> град)/Вт
Внутрішній $R_B=8,6$	0,115	0,132	В дерев'яних рамах 0,34
Зовнішній $R_3= 2,1$	0,043	0,086	В металевих рамах 0,31

### Додаток 6 – Коефіцієнти теплопровідності матеріалів

Будівельні матеріали	Коефіцієнти теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м град)
Бетон на гравії	1,45
Керамзітобетон	0,23
Цегляна кладка із глиняної цегли	0,81
Штукатурка із цементно-піщаного розчину	0,93
Цегляна кладка із силікатної цегли	0,78

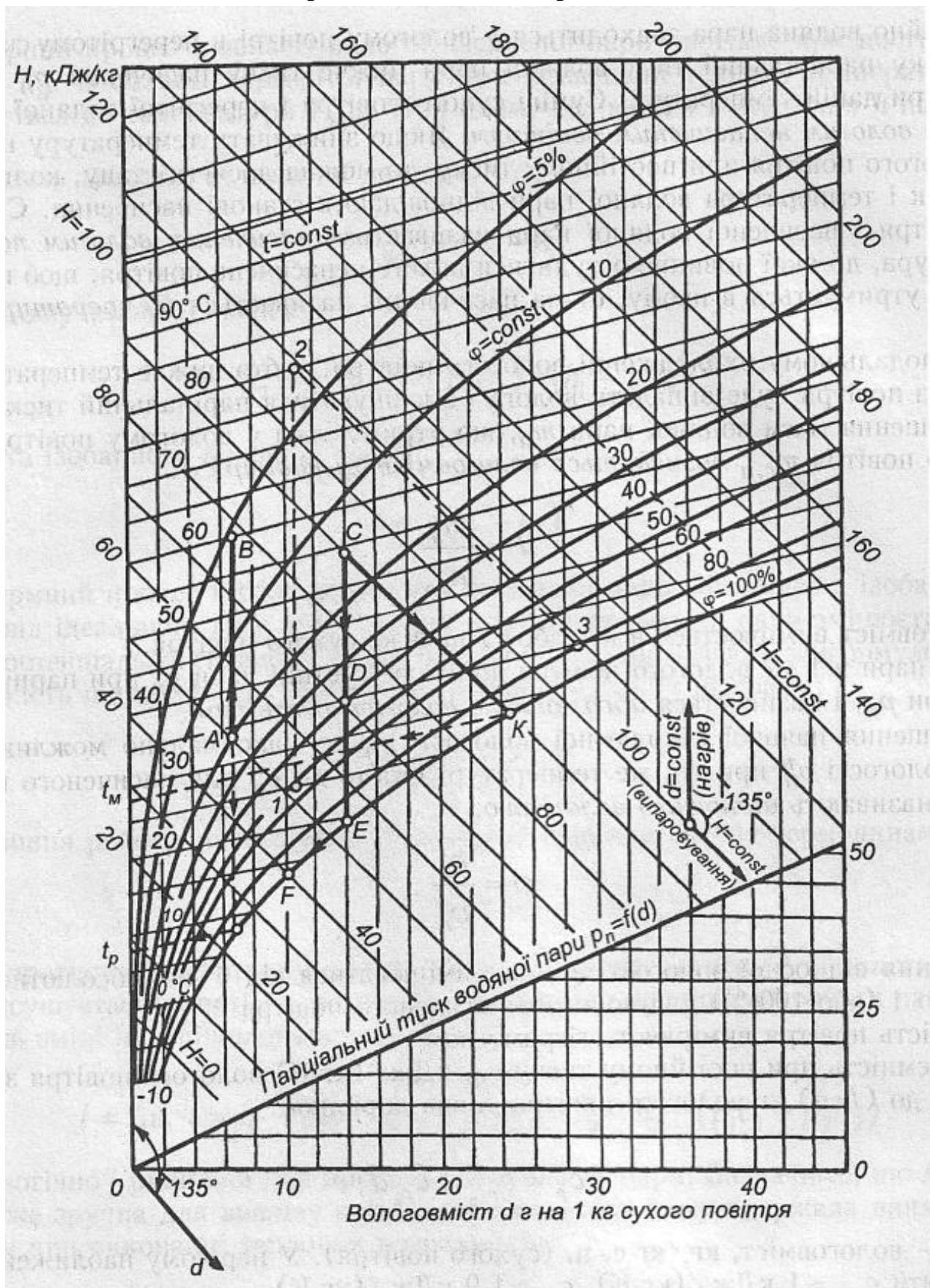
### Додаток 7 – Об'ємна вага основних сільськогосподарських продуктів л/кг

Яловичина	0,98
Свинина	0,95
Риба	0,99
Плоди	1,05

**Додаток 8 – Ентальпія продуктів при різних температурах кДж/кг**

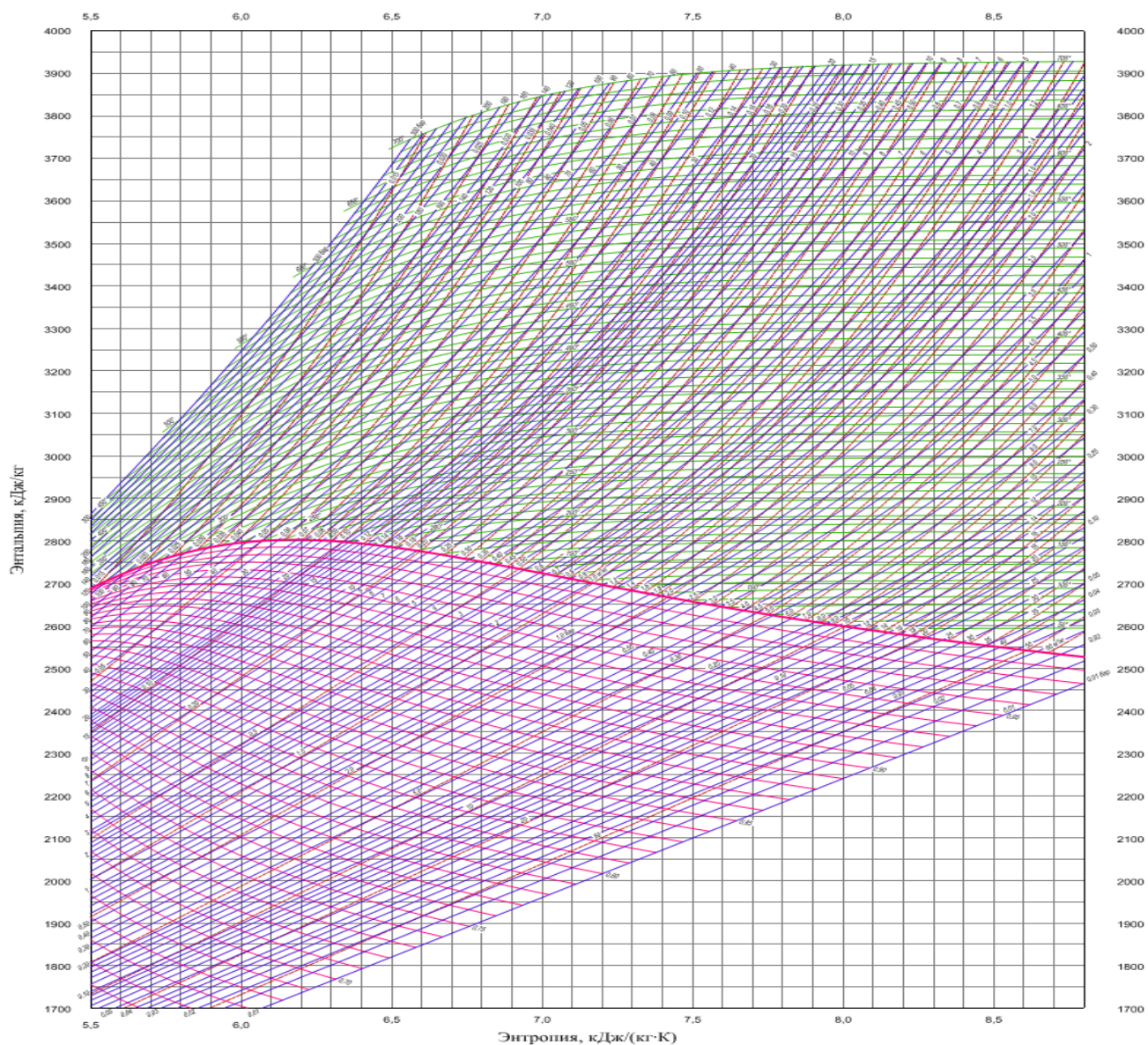
Продукти	Температура продукту											
	-10	-5	-4	-3	-2	-1	0	5	10	15	20	25
Яловичина	30,2	57,4	66,2	75,4	99	186	232	248	64	280	296	13
Свинина	28,9	54,4	62	73,6	91,6	170	212	227	242	257	273	288
Риба	32,7	61,6	71,2	85,6	106	200	250	267	280	295	311	335
Плоди	48,2	90,1	104	139	211	286	311	351	370	389	406	421

Додаток 9 – *Id*-діаграма вологого повітря





## Додаток 10 – $Is$ -діаграма водяної пари



**Додаток 11** – Типи вентиляційно-опалювальних установок

Тип установки	Встановлена потужність		Подача повітря, м <sup>3</sup> /год	Маса агрегату
	Агрегату	Нагрівачів		
СФОЦ 25/0,5-И1	23,3	25,5	2500	200
СФОЦ 40/0,5-И1	47,2	45	3500	190
СФОЦ 60/0,5-И2	67,5	60	4500	190
СФОЦ 100/0,5-И1	97,5	90	5000	380
СФОО 16/0,4-И1	15,8	15	7000	58

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дозорець М.П. Основи теплотехніки і теплопостачання тваринницьких ферм. Київ, 1973. 255 с.
2. Дозорець М.П. Основи теплотехніки і теплопостачання тваринницьких ферм. Київ, 1973. 255 с.
3. Драганов Б.Х., Міщенко А.В., Борхаленко Ю.О. Основи теплотехніки і гідравліки. Київ, 2011. 495 с.
4. Драганов Б.Х. Теплотехніка. Київ, 2005. 399 с.
5. Драганов Б.Х., Буляндра О.Ф., Міщенко А.В. Теплоенергетичні установки і системи в сільському господарстві. Київ, 1995. 222 с.
6. Драганов Б.Х., Есенин В.В., Зуев В.П. Применение теплоты в сельском хозяйстве. Киев, 1990. 319 с.
7. Драганов Б.Х., Кузнецов А.В. Основы теплотехники и применение теплоты в сельском хозяйстве. Москва, 1990. 463 с.
8. Ерохин В.Г., Маханько М.Г. Сборник задач по основам теплотехники и гидравлики. Москва, 1979. 175 с.
9. Шолудько В.П., Боярчук В.М., Шолудько Я.В. та ін. Теплотехніка та використання теплоти: Навчальний посібник / за заг. ред. В.П. Шолудька. Львів, 2007. 190 с.
10. Миронов О.С., Брижа М.Р., Бойко В.Б. та ін. Теплотехніка: основи термодинаміки, теорія теплообміну, використання теплоти в с.-г. Дніпропетровськ, 2011. 424 с.
11. Замалеев З.Х., Посохин В.Н., Чефанов В.М. Основы гидравлики и теплотехники: Учебное пособие. Санкт-Петербург, 2014. 352 с.
12. Ржищева А.С. Теоретические основы гидравлики и теплотехники: Учебное пособие. Ульяновск, 2007. 171 с.
13. Егорушкин В.Е. Основы теплотехники и теплоснабжение сельскохозяйственных предприятий. Москва, 1972. 455 с.
14. Захаров А.А. Применение теплоты в сельском хозяйстве. Москва, 1979. 238 с.
15. Навчальний довідник Електрифікація і автоматизація с.-г. Немішаєве, 2006. 124 с.
16. Панин В.И. Справочник по теплотехнике в сельском хозяйстве. Москва, 1979. 319 с.
17. Чернов А.В., Бессребренников Н.К. Основы теплотехники и гидравлики. Москва, 1976. 415 с.
18. Черняк О.В., Рибчинська Г.Б. Основи теплотехніки і гідравліки. Київ, 1982. 221 с.

19. Шварцер Б.В. Основи теплотехніки і гідравліки. Збірник задач. Київ, 1974. 116 с.
20. Швець Я., Щербина О. Тепло у вашому домі. Львів, 2003. 174 с.
21. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче. Киев, 2004. 334 с.
22. Дідур В.А., Стручаєв М.І. Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві. Київ, 2007. 249 с.
23. Матвійчук В.А., Стаднійчук І.П. Електротехнології в АПК: навчальний посібник. Вінниця: ТОВ «Твори», 2020. 272 с.

Підписано до друку 08.06.2021  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Times new roman.  
Умовних друкованих аркушів 7,6  
Наклад 100 прим. За. № 080621/2  
Видавець ТОВ "Друк"  
Реєстраційне свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
Державного реєстру видавців серія ДК № 5909 від 18.09.2017 р.  
Віддруковано з оригіналу макету замовника в  
ТОВ «Друк»  
м. Вінниця, вул. 600-річчя, 25, 21027.