

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

С.О. Коновалова

ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА
З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕПЛОТЕХНІКА»

для спеціальностей ЛВ, ОМТ денної форми навчання

студент _____

група _____

_____ триместр _____ навчальний рік

Затверджено
на засіданні вченої ради
Протокол № ____
від _____ 2008 р.

Краматорськ 2008

УДК 621.1.016
ББК 31.31
К 64

Рецензенти:

Просяник О.В., д-р хім. наук, професор, завідувач кафедри органічної хімії Українського державного хіміко-технологічного університету;

Бажин А.І., д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри фізики твердого тіла та фізичного матеріалознавства Донецького національного університету.

Коновалова С.О.

К 64 Організація самостійної роботи студента з дисципліни «Теплотехніка» для спеціальностей ЛВ, ОМТ денної форми навчання. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – 132 с.
ISBN 978-966-379-318-4

У посібнику наведено основні положення щодо організації самостійної роботи студентів з дисципліни «Теплотехніка», надано тематичний план лекцій, робочий план лабораторних робіт, заготівки звітів про лабораторні роботи, робочий план практичних робіт. Наведено рекомендації з виконання розрахункових робіт, питання для підготовки до захисту лабораторних робіт та розрахункових завдань, а також довідковий матеріал. Даний посібник складено з метою зменшення непродуктивних витрат часу студента на підготовку до занять, сприяння більш раціональному плануванню часу.

УДК 621.1.016
ББК 31.31

ISBN 978-966-379-318-4

© С.О. Коновалова, 2008
© ДДМА, 2008

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ НАД КУРСОМ “ТЕПЛОТЕХНІКА”	6
2 ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ	9
МОДУЛЬ 1	9
Розділ 1. Технічна термодинаміка	9
МОДУЛЬ 2	10
Розділ 2. Теорія теплообміну	10
Розділ 3. Прикладна теплотехніка	11
3 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ	13
3.1 Загальні вимоги до лабораторного практикуму	13
3.2 Робочий план лабораторних робіт	13
Лабораторна робота 1	15
Лабораторна робота 2	18
Лабораторна робота 3	21
Лабораторна робота 4	24
Лабораторна робота 5	27
Лабораторна робота 6	30
Лабораторна робота 7	34
Лабораторна робота 8	38
3.3 Тести для перевірки підготовки до лабораторних робіт	41
4 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ	56
4.1 План практичних занять	56
4.2 Приклади рішення задач	60
МОДУЛЬ 1	60
Розділ 1. Технічна термодинаміка	60
Тема 1.1. Основні параметри робочого тіла	60
Тема 1.2. Перший закон термодинаміки	61
Тема 1.3. Термодинамічні процеси	62
Тема 1.4. Властивості реальних газів	68
Тема 1.5. Витікання пари та газів	73
МОДУЛЬ 2	76
Розділ 2. Теорія теплообміну	76
Тема 2.1. Теплопровідність	76
Тема 2.2. Теплопередача	77
Тема 2.3. Конвекційний теплообмін	78
Тема 2.4. Теплообмін випромінюванням	81
Розділ 3. Прикладна теплотехніка	82
Тема 3.1. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів ...	82
Тема 3.2. Газотурбінні установки	84
4.3 Завдання для самостійного рішення	86
МОДУЛЬ 1	86

Розділ 1. Основи технічної термодинаміки.....	86
Тема 1.1. Основні параметри робочого тіла	86
Тема 1.2. Перший закон термодинаміки.....	87
Тема 1.3. Термодинамічні процеси	89
Тема 1.4. Реальні гази та їх властивості.....	91
Тема 1.5. Витікання газів та пари.....	94
МОДУЛЬ 2.....	96
Розділ 2. Теорія теплообміну	96
Тема 2.1. Теплопровідність.....	96
Тема 2.2. Теплопередача.....	98
Тема 2.3. Конвекційний теплообмін	99
Тема 2.4. Теплообмін випромінюванням	101
Розділ 3. Прикладна теплотехніка	102
Тема 3.1. Основи теплового розрахунку теплообмінних	102
апаратів.....	102
Тема 3.2. Газотурбінні установки.....	104
5 ІНДИВІДУАЛЬНІ РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ	107
5.1 Загальні вимоги до виконання розрахункових завдань.....	107
Завдання № 1. Термодинамічні процеси ідеальних газів. Суміші	
ідеальних газів.....	107
Завдання № 2. h_s -Діаграма водяної пари. Дроселювання.....	109
Завдання № 3. Теплопередача	110
Завдання № 4. Теплообмінне устаткування.....	111
5.2 Тести для перевірки рівня підготовки до захисту розрахункових	
робіт.....	112
6 ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ІСПИТУ	120
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	121
Додаток А.....	122
Додаток Б.....	123
Додаток В.....	125
Додаток Г	126
Додаток Д.....	127
Додаток Е.....	129
Додаток Ж.....	130
Додаток И.....	131

ВСТУП

В металургії і машинобудуванні одним з багатьох видів обладнання є печі-агрегати, в яких виконується теплова обробка різноманітних матеріалів. Якість роботи печей визначає якість готової продукції. Печі являють собою достатньо енергоємне обладнання, яке потребує значну кількість твердого, газоподібного та рідкого палива, а також електроенергії. Процеси переносу теплоти в печах займають одне з центральних місць при їх проектуванні та експлуатації.

Тому сучасний спеціаліст повинен вміти правильно формулювати і розв'язувати різноманітні прикладні завдання з використанням основних законів термодинаміки і тепломасообміну.

Теплотехніка – це загальнотехнічна дисципліна, яка вивчає методи одержання, перетворення, передачі і використання теплоти, а також принципи дії і конструктивних особливостей тепло- і парогенераторів, теплових машин, апаратів і пристроїв. Умовно теплотехніку можна поділити на 3 складових:

- 1) основи технічної термодинаміки;
- 2) теорія теплообміну;
- 3) прикладна теплотехніка.

Термодинаміка вивчає закони перетворення енергії в різних фізико-хімічних процесах, що відбуваються в макроскопічних системах і супроводжуються тепловими ефектами. В залежності від задач дослідження виділяють загальну, хімічну, технічну термодинаміку, термодинаміку біологічних систем і т. ін.

Технічна термодинаміка розглядає процеси взаємного перетворення теплоти і роботи. Вона встановлює зв'язок між тепловими, механічними і хімічними процесами, що відбуваються в теплових і холодильних машинах, вивчає процеси, що відбуваються в газах і парах, а також властивості цих тіл при різних фізичних умовах.

Теорія теплообміну вивчає самовільні необоротні процеси поширення теплоти у просторі.

Технічна термодинаміка та теорія теплообміну є теоретичним фундаментом прикладної теплотехніки.

1 ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ НАД КУРСОМ “ТЕПЛОТЕХНІКА”

Мета викладання курсу – вивчення студентами основних законів технічної термодинаміки і теплопередачі та використання їх при проектуванні технологічного обладнання та процесів.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен **знати**:

- основні закони термодинаміки;
- термодинамічні процеси;
- властивості реальних газів;
- закони теплопередачі теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням;
- розрахунок теплообмінних апаратів;
- особливості термодинаміки відкритих систем;
- цикли теплосилових установок.

Студент повинен **вміти**:

- користуватись довідковою літературою при розв’язанні теплотехнічних задач;
- виконувати практичні вимірювання основних теплофізичних величин за допомогою спеціальних приладів;
- виконувати теплотехнічні розрахунки;
- моделювати теплові процеси.

Самостійна робота студентів передбачає:

- вивчення лекційного матеріалу;
- підготовку до лабораторних робіт та практичних занять;
- підготовку до контрольних робіт;
- виконання курсового проекту;
- вивчення додаткової літератури.

Курс «Теплотехніки» включає лекції, виконання лабораторних робіт, розрахункових робіт, практичні заняття та самостійну роботу над вивченням теоретичного матеріалу. Наприкінці триместру студенти складають іспит. Курс складається з двох смислових модулів:

1 Модуль 1. Основи технічної термодинаміки.

2 Модуль 2. Теорія теплообміну. Прикладна теплотехніка.

Згідно з кредитно-модульною системою навчання кожний модуль оцінюється у 100 балів. Оцінка за модуль складається з оцінок за виконан-

ня та захист лабораторних робіт, виконання та захист індивідуальних розрахункових завдань та оцінки за контрольну роботу.

Лабораторні роботи виконуються з використанням методичних вказівок [11]. Всі лабораторні роботи оформлюються студентами у вигляді звітів. Оцінки за лабораторні роботи характеризують рівень теоретичної підготовки студента до виконання роботи, якість виконання експериментальної роботи, строк та якість виконання звіту про роботу. Загальна оцінка 10 балів за кожну роботу містить в собі наступні складові:

- за якісне виконання роботи – 1 бал;
- теоретичне опитування – 7 балів (проводиться у вигляді тестів);
- за якісне і своєчасне оформлення звіту – 2 бали.

При виконанні лабораторних робіт студентська група розподіляється на 8 підгруп, всі лабораторні роботи виконуються одночасно на кожному занятті. Таким чином, протягом триместру кожен студент по черзі виконує всі заплановані роботи.

Розрахункові роботи виконуються студентами самостійно відповідно варіанту, який визначає викладач. Оцінки за розрахункові роботи характеризують якість виконання розрахунків та оформлення роботи, рівень теоретичної підготовки з даної частини курсу і строк виконання. Загальна оцінка 15 балів за кожну розрахункову роботу містить в собі наступні складові:

- якісне і своєчасне виконання роботи – 3 бали;
- правильність виконання розрахунків – 7 балів;
- захист розрахункової роботи – 5 балів (проводиться у вигляді тестів).

Наприкінці кожного модуля заплановано **письмові контрольні роботи**. Контрольна робота з кожного модуля охоплює головні теоретичні положення з даного розділу курсу і основні типи розрахункових завдань. Загальна оцінка за кожну контрольну роботу складає 40 балів.

Модуль 1. КР №1. Властивості робочих тіл. Термодинамічні системи та процеси. Основні закони ідеальних газів. Суміші ідеальних газів.

Модуль 2. КР №2. Теплопровідність. Теплопередача. Конвекційний теплообмін. Теплообмін випромінюванням. Випромінювання. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів. Складний теплообмін. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів.

Розподіл балів з кожного модуля наведено в таблиці 1. Розподіл часу за видами занять наведено в таблиці 2.

Таблиця 1 – Склад модулів з дисципліни

№	Стислий зміст модуля	Загальна кількість годин	Кредити ECTS	Ваговий коефіцієнт	Форми та методи контролю, кількість балів (макс./мін.)	Тижень проведення
1	Технічна термодинаміка	198/108*	3/1,5*	0,5	Контрольна робота – 40/21, Лабораторні роботи № 1-3 – 30/18 Розрахункові роботи № 1,2, захист – 30/16	1-4
2	Теорія теплообміну. Прикладна теплотехніка		2,5/1,5*	0,5	Контрольна робота – 40/21, Лабораторні роботи № 4-6 – 30/18 Розрахункові роботи № 3,4, захист – 30/16	5-9
					Кінцевий контроль – іспит	

Примітка. * – чисельник – спеціальність ЛВ, знаменник – спеціальність ОМТ.

Таблиця 2 – Розподіл часу за видами занять

Спеціальність	Триместр	Всього	Розподіл часу за видами занять					Підсумковий контроль
			Лекції	Лабораторні	Практичні	СРС	Контроль знань	
ЛВ	8	198	45	18	18	111	6	іспит
ОМТ	9	108	30	18	-	54	6	іспит

2 ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ

МОДУЛЬ 1

Розділ 1. Технічна термодинаміка

Тема 1.1. Основні поняття

Предмет теплотехніки та її методи. Теплота і робота як форми передачі енергії. Робоче тіло. Властивості робочих тіл. Термодинамічна система. Основні параметри стану. Рівноважний і нерівноважний стан. Термодинамічний процес. Рівноважний і нерівноважний процес.

Література: [1, гл. 1: § 1.1-1.5; 2, гл. 1: § 1-2; 3, гл. 1: вступ, § 1.4-1.6, гл. 2: § 2.1-2.3, гл. 3: § 3.1-3.4, гл. 6: § 6.1-6.9; 10, вступ, гл. 1: § 1.1].

Тема 1.2. Перший закон термодинаміки

Рівняння стану ідеального газу. Теплоємність газів. Масова, об'ємна і мольна теплоємності. Теплоємності при постійному об'ємі та тиску. Суміші ідеальних газів. Внутрішня енергія та робота розширення газу. Перший закон термодинаміки. Ентальпія. Ентропія. Теплова діаграма. Теплоємність суміші ідеальних газів.

Література: [1, гл. 2: § 2.1-2.6; 2, гл. 1: § 3-5; 3, гл. 1: § 1.7, гл. 5: § 5.1-5.6, гл. 6: § 6.10-6.11, гл. 7: § 7.1-7.6; 10, гл. 1: § 1.2].

Тема 1.3. Термодинамічні процеси

Класифікація процесів зміни стану. Загальні методи дослідження процесів зміни стану. Термодинамічні процеси ідеальних газів у закритих системах. Особливості термодинамічних процесів у газах при $P=\text{const}$, $V=\text{const}$, $T=\text{const}$, $Q=\text{const}$. Розрахунки термодинамічних параметрів газів для даних процесів. Політропні процеси.

Література: [1, гл. 4: § 4.1; 2, гл. 3: § 1; 3, гл. 1: § 1.7, гл. 5: § 5.1-5.6, гл. 6: § 6.10-6.11, гл. 7: § 7.1-7.6; 10, гл. 1: § 1.2].

Тема 1.4. Другий закон термодинаміки

Другий закон термодинаміки. Основні формулювання другого закону термодинаміки. Прямі і оборотні цикли. Прямий цикл Карно. Математичний вираз другого закону термодинаміки. Зміна ентропії у необоротних циклах. Поняття про ексергію.

Література: [1, гл. 3: § 3.1-3.8; 2, гл. 4: § 1-3; 3, гл. 8: § 8.1-8.7; 10, гл. 1: § 1.4].

Тема 1.5. Реальні гази

Властивості реальних газів. Рівняння стану реальних газів. Поняття "вологе повітря". Вологе повітря та його параметри. Вологовміст, абсолю-

тна і відносна вологість повітря. Температура точки роси. Термодинамічні процеси реальних газів.

Водяна пара та її властивості. Процес пароутворення. Визначення параметрів води та водяної пари. *Pv*-, *Ts*-діаграми процесу пароутворення. *hd*-Діаграма вологого повітря.

Література: [1, гл. 4: § 4.2-4.4; 2, гл. 3: § 2; 3, гл. 4: § 4.1-4.4, гл. 11: § 11.1-11.9, гл. 12: § 12.1-12.2, гл. 15: § 15.1-15.3; 10, гл. 1: § 1.3-1.4].

Тема 1.6. Термодинаміка потоку. Витікання і дроселювання газів і парів

Основні положення термодинаміки потоку. Рівняння першого закону для потоку газу. Поняття про соплове і дифузне витікання газу. Фізичні властивості рідин і газів. Рівняння нерозривності. Рівняння Ейлера. Рівняння Бернуллі. Рівняння статички.

Адіабатна течія. Швидкість адіабатної течії. Критичне відношення тисків. Основні рівняння витікання газів. Сопло Лавалю. Вибір форми сопла. Дроселювання газів. Особливості струминної течії. Закономірності руху газів у печах. Дроселювання водяної пари.

Література: [1, гл. 5: § 5.1-5.5; 2, гл. 6: § 1-4; 3, гл. 13: § 13.1-13.4, 13.6-13.11, гл. 14: § 14.1-14.2; 10, гл. 1: § 1.5].

МОДУЛЬ 2

Розділ 2. Теорія теплообміну

Тема 2.1. Теплопровідність

Способи передачі теплоти. Кількісні характеристики переносу теплоти. Основний закон теплопровідності. Коефіцієнт теплопровідності. Перенос теплоти за допомогою теплопровідності при стаціонарному режимі: через плоску і циліндричну стінки.

Література: [1, гл. 7: § 7.1-7.3, гл. 8: § 8.1-8.3; 2, гл. 14: § 1, гл. 16: § 1-3; 3, гл. 22: § 22.1-22.6, гл. 23: § 23.1-23.4; 10, гл. 2: § 2.1].

Тема 2.2. Теплопередача

Теплопередача між двома рідинами через розподіляючу стінку. Теплопередача через одно- і багат шарову плоску та циліндричну стінку. Інтенсифікація теплопередачі. Теплова ізоляція. Критичний діаметр ізоляції.

Література: [1, гл. 12: § 12.2-12.4; 3, гл. 24: § 24.1-24.3; 10, гл. 2: § 2.1].

Тема 2.3. Конвекційний теплообмін

Основи теорії конвекційного теплообміну. Коефіцієнт тепловіддачі. Прикордонний шар. Моделювання процесів. Основи теорії подоби. Числа подоби.

Тепловіддача при вимушеному русі рідини. Теплообмін при русі рідини вздовж плоскої поверхні. Теплообмін при вимушеній течії рідини в трубах. Тепловіддача при ламінарному і турбулентному режимах руху. Теплообмін при поперечному обтіканні труб. Теплообмін при обтіканні пучка труб.

Вільна конвекція. Розрахункові рівняння. Теплообмін при кипінні.

Література: [1, гл. 9: § 9.1-9.7, гл. 10: § 10.1-10.3; 3, гл. 26: § 26.1-26.3, § 26.5-26.6, гл. 27: § 27.2-27.7; 10, гл. 2: § 2.2].

Тема 2.4. Теплопровідність при нестационарному режимі

Теплопровідність при нестационарному режимі. Основні положення. Критеріальне рівняння теплопровідності. Необмежена пластина. Циліндр нескінченної довжини.

Література: [1, гл. 13: § 13.1-13.2; 2, гл. 16: § 4; 3, гл. 25: § 25.1-25.5].

Тема 2.5. Теплообмін випромінюванням

Загальні положення. Основні закони теплообміну випромінюванням. Теплообмін випромінюванням в газах.

Теплообмін випромінюванням між тілами, які розділені прозорою середою. Коефіцієнт випромінювання. Теплообмін випромінюванням між тілами, які довільно розташовані у просторі. Захист від випромінювання. Теплові екрани.

Література: [1, гл. 11: § 11.1-13.5; 2, гл. 17: § 1-3; 3, гл. 29: § 29.1-29.7; 10, гл. 2: § 2.3].

Розділ 3. Прикладна теплотехніка

Тема 3.1. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів

Складний теплообмін. Типи теплообмінних апаратів. Основні схеми руху і теплообміну потоків теплоносіїв. Принцип розрахунку теплообмінних апаратів. Розрахункові рівняння. Види теплового розрахунку теплообмінників.

Література: [1, гл. 14: § 14.1-14.3; 3, гл. 30: § 30.1-30.4; 10, гл. 2: § 2.4].

Тема 3.2. Компресори. Цикли ДВЗ, ГТУ

Поршневий компресор. Принцип дії. Робота, яка витрачається на привод компресору. Відображення в Pv - та Ts -діаграмах термодинамічних процесів, які протікають у компресорах. Необоротне стискання. Поняття відцентрового компресору. Класифікація двигунів. Двигуни із підводом теплоти при постійному об'ємі, тиску та із змішаним підводом тепла.

Загальна схема установки. Цикл Карно для паротурбінної установки. Цикл Ренкіна для паротурбінної установки. Методи підвищення ККД установок.

Цикл ГТУ із підводом тепла при $P = \text{const}$ та при $V = \text{const}$. Цикл ГТУ із регенерацією тепла. Багатоступеневі ГТУ. Цикли реактивних двигунів. Відображення циклів ГТУ у Pv - та Ts -діаграмах.

Література: [1, гл. 21: § 21.1-21.5; 3, гл. 16: § 16.1-16.2, гл. 17: § 17.1-17.5, гл. 18: § 18.1-18.5; 10, гл. 3: § 3.1-3.2].

3 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

3.1 Загальні вимоги до лабораторного практикуму

Мета циклу лабораторних робіт:

- створення умов, які необхідні студентам для самостійного вивчення основних термодинамічних процесів;
- навчити студентів працювати з основними вимірювальними та лабораторними приладами;
- навчити найважливішим методикам виміру;
- створення і закріплення навиків ведення протоколів лабораторних дослідів, які з навчальною метою оформляються у вигляді звіту про лабораторні роботи;
- закріплення навиків обробки результатів виміру; особливу увагу при цьому необхідно приділяти побудові графіків, оскільки саме на графіках легше всього побачити погрішність експерименту.

Цикл лабораторних робіт з дисципліни «Теплотехніка» включає виконання 8 лабораторних робіт. Перелік лабораторних робіт наведено в таблиці 2.

3.2 Робочий план лабораторних робіт

Лабораторні роботи виконуються студентами згідно з робочим планом дисципліни (табл. 3).

При підготовці до лабораторної роботи студент повинен ознайомитися з метою експерименту, методикою виконання дослідів, необхідним теоретичним матеріалом. При підготовці заповнюється також частина звіту – мета роботи, схема лабораторної установки, план виконання роботи. Для самоперевірки рівня засвоєння матеріалу в посібнику наведено приклади тестів.

Допуск до виконання роботи здійснюється за допомогою тестування при наявності заготовки звіту про дану роботу. На кожному занятті перед виконанням роботи зі студентами проводиться інструктаж з питань охорони праці і техніки безпеки.

Лабораторна робота вважається виконаною, якщо студент самостійно виконав всі підготовчі роботи і підтвердив своїми відповідями необхідний рівень знань теми при тестуванні, самостійно виконав експеримент та оформив звіт.

Таблиця 3 – Перелік лабораторних робіт

№	Назва роботи	Питання для підготовки	Література
1	Визначення характеристик відцентрового вентилятору	Компресори, класифікація Вентилятори, класифікація, принцип дії, параметри та характеристики роботи Тиск, види, методи визначення	[11, с.70]
2	Дослідження роботи газового ежектору	Ежектування. Ежектор, інжектор Ежектор, принцип дії, характеристика Принцип дії дросельних приладів Рівняння витікання та нерозривності	[11, с.80]
3	Теплопередача через одношарову та багатошарову плоску стінку при стаціонарному режимі	Теплопередача, коефіцієнт теплопередачі Конвективний теплообмін, фактори впливу, коефіцієнт тепловіддачі Красві умови, методи визначення Термічний опір стінки	[11, с.93]
4	Теплопровідність через циліндричну одношарову стінку при стаціонарному режимі	Температурне поле, температурний режим, види, температурний напір Закон Фур'є, градієнт температури, коефіцієнт теплопровідності, температурний коефіцієнт. Критичний діаметр ізоляції	[11, с.102]
5	Визначення розрідження димової труби	Призначення димової труби, вимоги Розрідження, засоби утворення, залежність від температури газів та висоти труби	[11, с.110]
6	Визначення коефіцієнта теплопровідності	Температурний режим, види, засоби досягнення, тепловий потік Температурне поле, ізотермічна поверхня Теплопровідність, закон Фур'є Коефіцієнт теплопровідності, фактори	[11, с.117]
7	Визначення коефіцієнта тепловіддачі та теплопередачі	Теплопередача, стадії, лінійний коефіцієнт теплопередачі, фактори впливу Коефіцієнт тепловіддачі, фактори впливу Теорія подібності, числа подібності	[11, с.124]
8	Визначення термічного ККД електричної печі	Електричні печі, класифікація Електропічна установка, склад, параметри Термічний ККД електричної печі	[11, с.134]

Лабораторна робота 1
ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО
ВЕНТИЛЯТОРА

Мета роботи:

План виконання роботи:

Схема лабораторної установки:

- | | |
|-----|------|
| 1 – | 7 – |
| 2 – | 8 – |
| 3 – | 9 – |
| 4 – | 10 – |
| 5 – | 11 – |
| 6 – | 12 – |

Таблиця 4 – Результати вимірів

Найменування величини	Одиниця вимірювання величини	Номер досліду				
		1	2	3	4	5
Потужність електродвигуна $N_{дв}$	кВт					
Потужність вентилятора $N_в$	Вт					
Перепад тиску на шайбі $\Delta P_{ш}$	мм вод. ст.					
	Па					
Продуктивність вентилятора V	м ³ /с					
Перепад тиску на вентиляторі $\Delta P_в$	мм вод. ст.					
	Па					
ККД вентилятора $\eta_в$	%					

Результати розрахунків

1 Продуктивність вентилятора:

$$V_1 =$$

$$V_2 =$$

$$V_3 =$$

$$V_4 =$$

$$V_5 =$$

2 Потужність вентилятора:

$$N_1 =$$

$$N_2 =$$

$$N_3 =$$

$$N_4 =$$

$$N_5 =$$

3 Коефіцієнт корисної дії вентилятора:

$$\eta_1 =$$

$$\eta_2 =$$

$$\eta_3 =$$

$$\eta_4 =$$

$$\eta_5 =$$

Характеристики вентилятора – графіки залежностей η_e , ΔP_e та N_e від продуктивності:

$$\eta_e = f_1(V); \quad \Delta P_e = f_2(V); \quad N_e = f_3(V).$$

Висновки з лабораторної роботи:

*** Дослідна частина лабораторної роботи**

На основі експериментальних даних та аналізу літературних джерел розробіть основні напрямки підвищення ККД вентилятора.

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГАЗОВОГО ЕЖЕКТОРА

Мета роботи:

План виконання роботи:

Схема лабораторної установки:

1 –

2 –

3 –

4 –

5 –

6 –

Таблиця 5 – Результати вимірів

Найменування величини		Одиниця вимірювання	Положення сопла							
			крайнє праве				крайнє ліве			
Перепад тиску на шайбі $\Delta P_{ш}$		мм вод. ст.								
		Н/м ²								
Динамічний тиск $P_{дин}$		мм вод. ст.								
			$P_{дин\ сер} =$				$P_{дин\ сер} =$			
		Н/м ²								
Статичний тиск $P_{ст}$ по довжині камери змішування	$l_1 =$	мм вод. ст.								
			$P_{ст\ сер} =$				$P_{ст\ сер} =$			
		Н/м ²								
	$l_2 =$	мм вод. ст.								
			$P_{ст\ сер} =$				$P_{ст\ сер} =$			
		Н/м ²								
	$l_3 =$	мм вод. ст.								
			$P_{ст\ сер} =$				$P_{ст\ сер} =$			
		Н/м ²								
	$l_4 =$	мм вод. ст.								
			$P_{ст\ сер} =$				$P_{ст\ сер} =$			
		Н/м ²								
	$l_5 =$	мм вод. ст.								
			$P_{ст\ сер} =$				$P_{ст\ сер} =$			
		Н/м ²								
	$l_6 =$	мм вод. ст.								
			$P_{ст\ сер} =$				$P_{ст\ сер} =$			
		Н/м ²								

Результати розрахунків

1 Витрати активного повітря для крайнього правого (V_I^{np}) та крайнього лівого ($V_I^{лів}$) положень сопла:

$$V_I^{np} =$$

$$V_I^{лів} =$$

2 Середня швидкість повітря на вході камери змішування для крайнього правого та крайнього лівого положень сопла:

$$\omega_{сер}^{np} =$$

$$\omega_{сер}^{лів} =$$

3 Загальні об'ємні витрати повітря на вході до камери змішування:

$$V_{\text{сум}}^{np} =$$

$$V_{\text{сум}}^{лив} =$$

4 Коефіцієнт ежекції для крайнього правого та крайнього лівого положень сопла:

$$n^{np} =$$

$$n^{лив} =$$

Графіки зміни статичного тиску за довжиною камери змішування та дифузора для крайнього правого та крайнього лівого положень сопла:

Висновки з лабораторної роботи:

*** Дослідна частина лабораторної роботи**

На основі експериментальних даних та аналізу літературних джерел розробіть основні напрямки підвищення коефіцієнта ежекції газового ежектора.

Лабораторна робота 3
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОДНОШАРОВУ ТА БАГАТОШАРОВУ
ПЛОСКУ СТІНКУ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

Мета роботи:

План виконання роботи:

Схема лабораторної установки:

1 –

4 –

2 –

5 –

3 –

Таблиця 6 – Результати вимірів

№	Час початку досліду	Температура, °С							
		Одношарова стінка			Двошарова стінка				
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8
1	0								
2	300								
3	600								

Температура повітря в приміщенні – _____ °С.

Результати розрахунків

Одношарова стінка

1 Середня температура стінки в кожному досліді:

$$t_{сер 1} =$$

$$t_{сер 2} =$$

$$t_{сер 3} =$$

2 Коефіцієнт теплопровідності магнезиту:

$$\lambda_{м 1} =$$

$$\lambda_{м 2} =$$

$$\lambda_{м 3} =$$

3 Тепловий потік через стінку за рахунок теплопровідності:

$$q_1 =$$

$$q_2 =$$

$$q_3 =$$

4 Тепловий потік через стінку за рахунок тепловіддачі:

$$q^*_1 =$$

$$q^*_2 =$$

$$q^*_3 =$$

Багатошарова стінка

1 Середня температура магнезиту в кожному досліді:

$$t_{сер 1} =$$

$$t_{сер 2} =$$

$$t_{сер 3} =$$

2 Коефіцієнт теплопровідності магнезиту:

$$\lambda_{m1} =$$

$$\lambda_{m2} =$$

$$\lambda_{m3} =$$

3 Середня температура шамоту в кожному досліді:

$$t_{сер1} =$$

$$t_{сер2} =$$

$$t_{сер3} =$$

4 Коефіцієнт теплопровідності шамоту:

$$\lambda_{m1} =$$

$$\lambda_{m2} =$$

$$\lambda_{m3} =$$

5 Тепловий потік через стінку за рахунок теплопровідності:

$$q_1 =$$

$$q_2 =$$

$$q_3 =$$

6 Тепловий потік через стінку за рахунок тепловіддачі:

$$q^*_1 =$$

$$q^*_2 =$$

$$q^*_3 =$$

Висновки з лабораторної роботи:

*** Дослідна частина лабораторної роботи**

На основі експериментальних даних та аналізу літературних джерел розробіть основні напрямки зниження витрат теплоти у навколишнє середовище через плоску стінку.

Лабораторна робота 4
ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ЧЕРЕЗ ЦИЛІНДРИЧНУ ОДНОШАРОВУ
СТІНКУ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

Мета роботи:

План виконання роботи:

Схема лабораторної установки:

- | | |
|-----|------|
| 1 – | 6 – |
| 2 – | 7 – |
| 3 – | 8 – |
| 4 – | 9 – |
| 5 – | 10 – |

Таблиця 7 – Результати вимірів

№	Найменування величини	Одиниця вимірювання	Номер досліду				
			1	2	3	4	5
1	Сила струму I	А					
2	Напруга U	В					
3	Температура внутрішньої стінки $t'_{ст}$	°С					
4	Температура зовнішньої стінки $t''_{ст}$	°С					

Результати розрахунків

1 Величина теплового потоку:

$$Q_1 =$$

$$Q_2 =$$

$$Q_3 =$$

$$Q_4 =$$

$$Q_5 =$$

2 Коефіцієнт теплопровідності матеріалу для кожного досліду:

$$\lambda_1 =$$

$$\lambda_2 =$$

$$\lambda_3 =$$

$$\lambda_4 =$$

$$\lambda_5 =$$

3 Середня температура стінки для кожного досліду:

$$t_{cp\ 1} =$$

$$t_{cp\ 2} =$$

$$t_{cp\ 3} =$$

$$t_{cp\ 4} =$$

$$t_{cp\ 5} =$$

Таблиця 8 – Результати розрахунків

№	Найменування величини	Одиниця вимірювання	Номер досліду				
			1	2	3	4	5
1	Тепловий потік Q	Вт					
2	Коефіцієнт теплопровідності λ	Вт/(м·°C)					
3	Середня температура t_{cp}	°C					

Графік залежності $\lambda = f(t_{cp})$:

Висновки з лабораторної роботи:

*** Дослідна частина лабораторної роботи**

На основі експериментальних даних та аналізу літературних джерел розробіть основні напрямки зниження витрат теплоти у навколишнє середовище через циліндричну стінку.

Лабораторна робота 5
ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРІДЖЕННЯ ДИМОВОЇ ТРУБИ

Мета роботи:

План виконання роботи:

Схема лабораторної установки:

1 –	5 –
2 –	6 –
3 –	7 –
4 –	

Таблиця 9 – Результати вимірювань та розрахунків

Величина	Одиниця вимірювання	Номер досліду		
		1	2	3
Висота труби	м	2	2	1
Температура нагрітого повітря:				
- внизу труби	°C			
- у середині труби	°C			
- в усті труби	°C			
Середня температура нагрітого повітря	°C			
Температура навколишнього повітря	°C			
Розрядження внизу труби:				
- виміряне	Н/м ²			
- розрахункове	Н/м ²			
Похибка вимірювань	%			

Результати розрахунків

1 Середня температура нагрітого повітря:

$$t_1 =$$

$$t_2 =$$

$$t_3 =$$

2 Густина димових газів:

$$\rho_{\text{г}1} =$$

$$\rho_{\text{г}2} =$$

$$\rho_{\text{г}3} =$$

3 Густина навколишнього повітря:

$$\rho_{\text{в}1} =$$

$$\rho_{\text{в}2} =$$

$$\rho_{\text{в}3} =$$

4 Розрядження димової труби:

$$\Delta P_1 =$$

$$\Delta P_2 =$$

$$\Delta P_3 =$$

5 Похибка вимірювань:

$$\alpha_1 =$$

$$\alpha_2 =$$

$$\alpha_3 =$$

Висновки з лабораторної роботи:

*** Дослідна частина лабораторної роботи**

На основі експериментальних даних та аналізу літературних джерел розробіть основні напрямки підвищення розрядження димової труби.

Лабораторна робота 6
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Мета роботи:

План виконання роботи:

Схема лабораторної установки:

- | | |
|-----|------|
| 1 – | 6 – |
| 2 – | 7 – |
| 3 – | 8 – |
| 4 – | 9 – |
| 5 – | 10 – |

Таблиця 10 – Результати вимірювань

№	Час, с	Температура води в латунній судині, °С	Температура води в сталій судині, °С
1	0		
2	120		
3	240		
4	360		
5	480		
6	600		
7	720		

Результати розрахунків

1 Площа поперечного перерізу стрижнів

$$F =$$

Розрахунок коефіцієнта теплопровідності латуні

2 Середня температура води в латунній судині протягом 120 с для кожного досліджу:

$$t_1 =$$

$$t_2 =$$

$$t_3 =$$

$$t_4 =$$

$$t_5 =$$

$$t_6 =$$

3 Кількість теплоти, яка отримана крайньою латунною судиною і водою в ній за рахунок проходження тепла через стрижень:

$$Q_1 =$$

$$Q_2 =$$

$$Q_3 =$$

$$Q_4 =$$

$$Q_5 =$$

$$Q_6 =$$

4 Коефіцієнт теплопровідності латуні:

$$\lambda_1 =$$

$$\lambda_2 =$$

$$\lambda_3 =$$

$$\lambda_4 =$$

$$\lambda_5 =$$

$$\lambda_6 =$$

Розрахунок коефіцієнта теплопровідності сталі

5 Середня температура води в сталій судині протягом 120 с для кожного досліду:

$$t_1 =$$

$$t_2 =$$

$$t_3 =$$

$$t_4 =$$

$$t_5 =$$

$$t_6 =$$

6 Кількість теплоти, яка отримана крайньою сталюю судиною і водою в ній за рахунок проходження тепла через стрижень:

$$Q_1 =$$

$$Q_2 =$$

$$Q_3 =$$

$$Q_4 =$$

$$Q_5 =$$

$$Q_6 =$$

7 Коефіцієнт теплопровідності сталі:

$$\lambda_1 =$$

$$\lambda_2 =$$

$$\lambda_3 =$$

$$\lambda_4 =$$

$$\lambda_5 =$$

$$\lambda_6 =$$

Графіки залежності коефіцієнта теплопровідності сталі і латуні від температури $\lambda=f(t)$:

Висновки з лабораторної роботи:

Лабораторна робота 7
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ТА
ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ

Мета роботи:

План виконання роботи:

Схема лабораторної установки:

1 –
2 –
3 –
4 –
5 –

6 –
7 –
8 –
9 –

Таблиця 11 – Результати вимірювань

Величина	Одиниця вимірювання	Номер досліду				
		1	2	3	4	5
ΔP	мм вод. ст.					
	Па					
t_1	$^{\circ}\text{C}$					
t_2	$^{\circ}\text{C}$					

Результати розрахунків

1 Об'ємні витрати повітря:

$$V_1 =$$

$$V_2 =$$

$$V_3 =$$

$$V_4 =$$

$$V_5 =$$

2 Тепловий потік, якій передається від киплячої води до повітря:

$$Q_1 =$$

$$Q_2 =$$

$$Q_3 =$$

$$Q_4 =$$

$$Q_5 =$$

3 Середньологаріфмічний температурний напір:

$$\Delta t_1 =$$

$$\Delta t_2 =$$

$$\Delta t_3 =$$

$$\Delta t_4 =$$

$$\Delta t_5 =$$

4 Коефіцієнт теплопередачі:

$$K_{\mu 1} =$$

$$K_{\mu 2} =$$

$$K_{\mu 3} =$$

$$K_{\mu 4} =$$

$$K_{\mu 5} =$$

5 Площа поперечного перерізу трубки:

$$F =$$

6 Середня швидкість руху повітря в трубці:

$$\omega_1 =$$

$$\omega_2 =$$

$$\omega_3 =$$

$$\omega_4 =$$

$$\omega_5 =$$

7 Число Рейнольдса:

$$Re_1 =$$

$$Re_2 =$$

$$Re_3 =$$

$$Re_4 =$$

$$Re_5 =$$

8 Число Нуссельта:

$$Nu_1 =$$

$$Nu_2 =$$

$$Nu_3 =$$

$$Nu_4 =$$

$$Nu_5 =$$

4 Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_1 =$$

$$\alpha_2 =$$

$$\alpha_3 =$$

$$\alpha_4 =$$

$$\alpha_5 =$$

Таблиця 12 – Результати розрахунків

Розрахункова величина	Одиниця вимірювання	Номер досліду				
		1	2	3	4	5
V	м ³ /с					
Q	Вт					
K_u	Вт/(м·°C)					
ω	м/с					
Re	-					
Nu	-					
α	Вт/(м ² ·°C)					

Графіки залежності коефіцієнтів теплопередачі і тепловіддачі від витрати повітря $K_u = f(V)$, $\alpha = f(V)$:

Висновки з лабораторної роботи:

* Дослідна частина лабораторної роботи

На основі експериментальних даних та аналізу літературних джерел розробіть основні напрямки підвищення коефіцієнта тепловіддачі.

Лабораторна робота 8
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІЧНОГО ККД ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПЕЧІ

Мета роботи:

План виконання роботи:

Схема лабораторної установки:

1 –	12 –
2 –	13 –
3 –	14 –
4 –	15 –
5 –	16 –
6 –	17 –
7 –	18 –
8 –	19 –
9 –	20 –
10 –	21 –
11 –	22 –

Таблиця 13 – Результати вимірювань

№	Час нагріву, с	Температура зразка, °С	Сила струму, А	Напруга, В	Температура води в калориметрі, °С	
					початкова $t^n_{\text{в}}$	кінцева $t^k_{\text{в}}$
1						
2						
3						

Результати розрахунків

1 Маса зразка

$m =$

2 Кількість теплоти, яка отримана зразком у кожному інтервалі температур:

$Q_{\text{отр}} (20...100^{\circ}\text{C}) =$

$Q_{\text{отр}} (20...200^{\circ}\text{C}) =$

$Q_{\text{отр}} (20...300^{\circ}\text{C}) =$

2 Кількість теплоти, яка надходить до печі у кожному інтервалі температур:

$Q_{\text{над}} (20...100^{\circ}\text{C}) =$

$Q_{\text{над}} (20...200^{\circ}\text{C}) =$

$Q_{\text{над}} (20...300^{\circ}\text{C}) =$

3 Термічний ККД печі для кожного інтервалу нагрівання:

$\eta_t (20...100^{\circ}\text{C}) =$

$\eta_t (20...200^{\circ}\text{C}) =$

$\eta_t (20...300^{\circ}\text{C}) =$

4 Площа поверхні зразка:

$F =$

5 Густина теплового потоку на поверхні зразка, що нагрівається, для кожного інтервалу температур:

$q (20...100^{\circ}\text{C}) =$

$q (20...200^{\circ}\text{C}) =$

$q (20...300^{\circ}\text{C}) =$

6 Кількість теплоти, яку зразок передав калориметру:

$$Q =$$

7 Погрішність розрахунку кількості теплоти, отриманої зразком:

$$\Delta Q =$$

8 Швидкість зміни температури зразка для кожного інтервалу температур:

$$v (20 \dots 100^\circ C) =$$

$$v (20 \dots 200^\circ C) =$$

$$v (20 \dots 300^\circ C) =$$

Графіки залежності швидкості зміни температури зразка, ККД печі і густини теплового потоку від часу нагрівання:

$$v = f(\tau) \quad \eta = f(\tau), \quad q = f(\tau)$$

Висновки з лабораторної роботи:

*** Дослідна частина лабораторної роботи**

На основі експериментальних даних та аналізу літературних джерел розробіть основні напрямки підвищення термічного ККД електричної печі.

3.3 Тести для перевірки підготовки до лабораторних робіт

Лабораторна робота 1

I Доповніть вислів

1 Різниця тиску газу всередині апарата та навколишнього повітря називається ...

2 Відношення тиску газу за компресором до тиску газу перед компресором називається ...

3 Тиск газу, який залежить від швидкості його руху та з'являється завжди позитивною величиною, називається ...

4 Відношення потужності, яка потрібна на переміщення повітря, до потужності, яка витрачається в дійсності вентилятором, називається ...

II Перелічте усі види вказаного предмета (явища)

5 Залежно від конструктивного виконання та принципу роботи компресори розподіляються на наступні 4 типи: ...

6 Відцентрові вентилятори мають 3 характеристики: ...

7 Залежно від величини тиску вентилятори розподіляються на наступні 3 групи: ...

8 Залежно від ступеня підвищення тиску компресори розподіляються на наступні 3 види: ...

9 Для характеристики роботи відцентрового вентилятора при постійній швидкості обертання використовують 4 параметри: ...

10 При руху газу в трубопроводі розрізняють 3 види тиску: ...

III Запишіть коди відповідей, які ви вважаєте правильними

11 ККД вентилятора зменшується в наступних випадках:

- а) при збільшенні перепаду тиску на вентиляторі;
- б) при зменшенні перепаду тиску на вентиляторі;
- в) при збільшенні продуктивності вентилятора;
- г) при зменшенні продуктивності вентилятора.

12 Для збільшення потужності вентилятора потрібно:

- а) зменшити потужність електродвигуна;
- б) збільшити потужність електродвигуна;
- в) зменшити ККД електродвигуна;
- г) збільшити ККД електродвигуна.

13 Для збільшення ККД вентилятора потрібно:

- а) збільшити потужність електродвигуна;
- б) зменшити потужність електродвигуна;
- в) збільшити площу лопатей робочого колеса;
- г) зменшити площу лопатей робочого колеса.

14 При роботі відцентрового вентилятора у вхідному патрубку виникає тиск:

- а) менше атмосферного;
- б) більше атмосферного;
- в) рівний атмосферному.

15 Для вимірювання динамічного тиску всередині трубопроводу потрібні:

- а) пневмометричні трубки;
- б) мілівольтметр;
- в) U-образний мікроманометр;
- г) шайба;
- д) термopapa.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

16 Вказати рівняння для визначення величин:

Величина	Рівняння
1) Продуктивність вентилятора	а) $\Delta P_{\epsilon} = P_n'' - P_n^{\epsilon}$
2) Потужність вентилятора	б) $V = c \sqrt{\Delta P_{ш}}$
3) Перепад тиску на вентиляторі	в) $N_{\epsilon} = N_{\partial \epsilon} \cdot \eta_{\partial \epsilon}$
4) ККД вентилятора	г) $\eta = \frac{V \cdot \Delta P_{\epsilon}}{N_{\epsilon}} 100\%$

17 Вказати одиниці вимірювання величин:

Величина	Одиниці вимірювання
1) Тиск	а) %
2) Потужність	б) Вт
3) Продуктивність	в) Па
4) ККД вентилятора	г) м ³ /с
5) Швидкість	д) м/с

18 Вказати сферу застосування вентиляторів:

Тип вентилятора	Сфера застосування вентилятора
1) Низького тиску	а) сушка матеріалів
	б) системи вентиляції
2) Середнього тиску	в) системи пневмопошти
	г) технологічні потреби
3) Високого тиску	д) агломераційні установки

Лабораторна робота 2

I Доповніть вислів

1 Процес приведення в рух газу під дією розрідження, який утворюється іншим газом, котрий має велику швидкість, називається ...

2 Відношення масової витрати пасивного повітря до масової витрати активного повітря називається ...

3 Газ, який утворює розрідження в процесі ежектування, називається ...

4 Обладнання, яке використовують для нагнітання газу або рідини в простір, при цьому кількість ежектируючого газу звичайно більше, ніж ежектируемого, називається ...

5 Обладнання, яке використовують для нагнітання газу або рідини в простір, при цьому кількість ежектируючого газу звичайно менше, ніж ежектируемого, а статичний тиск їх суміші на виході дорівнює тиску навколишнього середовища, називається ...

6 Газ, який приводиться до руху іншим газом в процесі ежектування, називається ...

II Перелічте усі види вказаного предмета (явища)

7 Під час руху газу в трубі розрізняють наступні 3 види тиску: ...

8 Ежектування лежить в основі роботи 2 видів обладнання: ...

9 Об'ємні витрати газу в каналі можна визначити за рахунок вимірювання 2 видів тиску: ...

III Запишіть код відповіді, яку ви вважаєте правильною

10 Тиск газу на виході із сопла ежекторної установки:

а) не змінюється; б) збільшується; в) зменшується.

11 Канал, в якому здійснюється перетворення кінетичної енергії потоку на потенційну, тобто збільшення тиску за рахунок зменшення швидкості, називають:

а) конфузор; б) дифузор.

12 Канал, в якому здійснюється перетворення потенційної енергії потоку на кінетичну, тобто зменшення тиску за рахунок збільшення швидкості, називають:

а) конфузор; б) дифузор.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

13 Вказати рівняння для визначення величин:

Величина	Рівняння
1) 1-й закон термодинаміки	а) $\omega d\omega = -vdp$
2) Витікання газів	б) $\omega_1 f_1 = \omega_2 f_2$
3) Нерозривність потоку газу	в) $dq = dh - vdp$

14 Вказати прилади, які потрібні для вимірювання величин в лабораторній роботі:

Величина	Прилади
1) Витрата активного газу	а) Манометр
	б) Пневмометрична трубка
2) Витрата суми активного та пасивного газу	в) Термопара
	г) Шайба

15 Вказати сферу застосування обладнання:

Обладнання	Сфера застосування
1) Ежектор	а) Системи охолодження двигунів
	б) Паротурбінні установки
2) Інжектор	в) Вентиляція приміщень
	г) Переміщення гарячих газів
	д) Горілки газових плит

Лабораторна робота 3

I Доповніть вислів

1 Процес передачі тепла від гарячого рухомого середовища до холодного через стінку, яка їх розділяє, називається ...

2 Процес розповсюдження теплоти через стінку товщиною δ від зовнішньої поверхні з температурою t'_{cm} до внутрішньої (більш холодної) з температурою t''_{cm} називається ...

3 Коефіцієнт, що показує, яку кількість тепла віддає гаряче рухоме середовище до поверхні стінки за одиницю часу через одиницю ізотермної

поверхні при різниці температур між середовищем та поверхнею в один градус, називається ...

4 Коефіцієнт, що показує, яку кількість тепла передає одне гаряче рухоме середовище до другого за одиницю часу через одиницю ізотермної поверхні поділяючої їх стінки при різниці температур між середовищами в один градус, називається ...

5 Процес передачі тепла за рахунок переміщення та перемішування між собою більш або менш нагрітих частин газу називається ...

6 Процес розповсюдження теплоти, в якому теплота передається одночасно за рахунок теплопровідності та конвекції, називається ...

7 Математичний опис усіх часткових особливостей окремої задачі теплообміну називається ...

II Переліchte усі види вказаного предмета (явища)

8 Залежно від природи виникнення руху розподіляють наступні 2 типи конвекції: ...

9 На процес тепловіддачі переважно впливають наступні 5 фізичних параметрів середовища: ...

10 Процес теплопередачі здійснюється в три стадії: ...

11 Краєві умови, або умови однозначності, включають наступні 4 види інформації (умов): ...

12 Фактори, які впливають на протікання конвективного теплообміну, розподіляють на наступні 4 групи: ...

13 Залежно від характеру руху середовища розрізняють наступні режими руху: ...

III Запишіть коди відповідей, які ви вважаєте правильними

14 Для збільшення кількості теплоти, яка передається від гарячого середовища до холодного через стінку, потрібно:

- а) збільшити різницю температур середовищ;
- б) зменшити різницю температур середовищ;
- в) збільшити площу стінки;
- г) зменшити площу стінки;
- д) збільшити товщину стінки;
- е) зменшити товщину стінки.

15 Для зменшення збитків тепла через стінку печі потрібно:

- а) збільшити різницю температур поверхонь стінки;
- б) зменшити різницю температур поверхонь стінки;
- в) збільшити площу стінки;
- г) зменшити площу стінки;
- д) збільшити товщину стінки;
- е) зменшити товщину стінки.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

16 Вказати рівняння для опису процесу:

Процес	Рівняння
1) Теплопровідність	а) $Q^* = \alpha_2 F(t''_{cm} - t_2)$
2) Тепловіддача	б) $Q^* = k F(t_1 - t_2)$
3) Теплопередача	в) $Q^* = \lambda F(t'_{cm} - t''_{cm})/\delta$

17 Вказати одиниці вимірювання величин

Величина	Одиниця вимірювання
1) Коефіцієнт теплопровідності	а) Вт
2) Коефіцієнт тепловіддачі	б) Вт/м ²
3) Коефіцієнт теплопередачі	в) Вт/(м·К)
4) Тепловий потік	г) Вт/(м ² ·К)
5) Густина теплового потоку	д) Дж

18 Вказати фактори, які впливають на перераховані величини:

Величина	Фактор
1) Коефіцієнт теплопровідності	а) Характер руху
	б) Площа поверхні
	в) Температура
2) Коефіцієнт тепловіддачі	г) Матеріал поверхні
	д) Природа рухомого середовища
3) Коефіцієнт теплопередачі	е) Товщина стінки

Лабораторна робота 4

I Доповніть вислів

- 1 Процес розповсюдження теплоти між тілами, які торкаються, або частинами одного тіла з різною температурою називається ...
- 2 Сукупність температур в усіх точках тіла для даного моменту часу називається ...
- 3 Кількість теплоти, яка проходить за одиницю часу через одиницю ізотермної поверхні при градієнті температури, який дорівнює одиниці, називається ...
- 4 Векторна величина, яка має напрямок у бік збільшення температури і чисельно дорівнює швидкості збільшення температури за відстанню, називається...
- 5 Кількість теплоти, яка проходить через поверхню площею F за одиницю часу, називається...
- 6 Величина, яка дорівнює зміні коефіцієнта теплопровідності матеріалу при збільшенні його температури на 1°C , називається...
- 7 У теплопередачі різниця температур ($t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}}$) називається...

II Переліchte усі види вказаного предмета (явища)

- 8 Залежно від зміни температури протягом часу розрізняють 2 наступних типи температурного поля: ...
- 9 Для одержання стаціонарного теплового режиму потрібно ...
- 10 Величина критичного діаметра ізоляції залежить від наступних факторів: ...

III Запишіть коди відповідей, які ви вважаєте правильними

- 11 Для збільшення кількості теплоти, яка передається теплопровідністю через циліндричну стінку, потрібно:
 - а) збільшити різницю температур;
 - б) зменшити різницю температур;
 - в) збільшити довжину стінки;
 - г) зменшити довжину стінки;
 - д) збільшити коефіцієнт теплопровідності стінки;
 - е) зменшити коефіцієнт теплопровідності стінки.

12 Фактори, які впливають на величину коефіцієнта теплопровідності матеріалу:

- а) розміри матеріалу;
- б) природа матеріалу;
- в) температура матеріалу;
- г) величина теплового потоку.

13 Величини, які потрібно визначити для розрахунку коефіцієнта теплопровідності невідомого матеріалу:

- а) зміна температури;
- б) природа матеріалу;
- в) температурний коефіцієнт;
- г) величина теплового потоку.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

13 Вказати рівняння для визначення величин:

Величина	Рівняння
1) Закон Фур'є	а) $grad\ t = \frac{\partial t}{\partial n}$
2) Градієнт температури	б) $dQ = -\lambda dF d\tau grad\ t$
3) Тепловий потік через циліндричну стінку	в) $Q^* = \frac{\pi l (t'_{cm} - t''_{cm})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$

14 Вказати одиниці вимірювання величин:

Величина	Одиниця вимірювання
1) Кількість теплоти	а) К
2) Тепловий потік	б) К/м
3) Густина теплового потоку	в) Дж
4) Тепловий напір	г) Вт
5) Градієнт температури	д) Вт/м ²
6) Коефіцієнт теплопровідності	е) Вт/(м·К)
	ж) Вт/(м ² ·К)

Лабораторна робота 5

I Доповніть вислів

- 1 Різниця тиску газу всередині апарата та навколишнього повітря називається ...
- 2 Тиск у системі відносно абсолютного вакууму називається ...
- 3 Тиск, який залежить тільки від швидкості руху димових газів і являється еквівалентом кінетичної енергії потоку, називається ...
- 4 Різниця між фактичної величиною та величиною, одержаною в дослідах, називається ...
- 5 Відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення величини називається ...

II Перелічте усі види вказаного предмета (явища)

- 6 Тяга в димовій трубі може бути: ...
- 7 Види схем включення димососа в димовий тракт: ...

III Запишіть код відповіді, яку ви вважаєте правильною

- 8 Згідно з законом Паскаля тиск атмосферного повітря за висотою:
 - а) збільшується за прямою лінією;
 - б) збільшується за параболою;
 - в) зменшується за прямою лінією;
 - г) зменшується за параболою.
- 9 Розрядження в основі труби при збільшенні висоти труби:
 - а) збільшується;
 - б) зменшується;
 - в) не змінюється.
- 10 Розрядження в основі труби при збільшенні температури димових газів:
 - а) збільшується;
 - б) зменшується;
 - в) не змінюється
- 11 Тиск у площині вихідного перерізу робочої димової труби:
 - а) дорівнює тиску навколишнього повітря;
 - б) менше тиску навколишнього повітря;
 - в) більше тиску навколишнього повітря.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літерів

12 Вказати прилади, які потрібні для вимірювання величини:

Величина	Прилади
1) Статичний тиск	а) одна пряма трубка
2) Динамічний тиск	б) дві прямі трубки
3) Перепад повного тиску	в) одна зогнута трубка
4) Перепад статичного тиску	г) дві зогнуті трубки
5) Перепад динамічного тиску	д) пряма та зогнута трубки

13 Вказати одиниці вимірювання величин:

Величина	Одиниця вимірювання
1) Статичний тиск	а) кг/м^3
2) Динамічний тиск	б) $\text{м}^3/\text{кг}$
3) Абсолютний тиск	в) м/с
4) Густина газу	г) К^{-1}
5) Коефіцієнт об'ємного розширення	д) Па

Лабораторна робота 6

I Доповніть вислів

1 Процес розповсюдження теплоти за рахунок теплового руху мікрочасток речовини без візуально відомого переміщення самих частин називається ...

2 Кількість теплоти, яка проходить за одиницю часу через поверхню тіла площею F , називається ...

3 Кількість теплоти, яка проходить за одиницю часу через одиницю площі поверхні тіла, називається ...

4 Кількість теплоти, яка проходить через одиницю ізотермної поверхні тіла за одиницю часу за умови, що градієнт температури дорівнює одиниці, називається ...

5 Перша похідна температури за відстанню називається ...

6 Поверхня рівних температур називається ...

II Переліchte усі види вказаного предмета (явища)

- 7 Переліchte 2 види температурного поля (залежно від часу): ...
- 8 Переліchte 2 види температурного поля (залежно від координати):...
- 9 Залежно від часу тепловий режим може бути 2 видів: ...

III Запишіть коди відповідей, які ви вважаєте правильними

- 10 Ізотермні поверхні:
- а) пересікаються між собою;
 - б) не пересікаються між собою;
 - в) можуть замикатися на себе;
 - г) можуть закінчуватися на межах тіла.
- 11 Векторною величиною являється (тобто має напрямок):
- а) температура;
 - б) градієнт температури;
 - в) коефіцієнт теплопровідності;
 - г) тепловий потік.
- 12 У металах перенос теплоти теплопровідністю здійснюється за рахунок:
- а) співударів молекул між собою;
 - б) дифузії вільних електронів;
 - в) пружних хвиль;
 - г) переміщення атомів.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

- 13 Вказати фактори, які впливають на величини:

Величина	Фактор
1) Тепловий потік	а) Температура тіла
2) Градієнт температури	б) Матеріал тіла
3) Густина теплового потоку	в) Різниця температур
4) Коефіцієнт теплопровідності	г) Площа тіла
	д) Час протікання процесу

14 Вказати одиниці вимірювання величин:

Величина	Одиниці вимірювання
1) Температура	а) Вт
2) Градієнт температури	б) Вт/(м·К)
3) Тепловий потік	в) Вт/м ²
4) Коефіцієнт теплопровідності	г) К
5) Густина теплового потоку	д) К/м

Лабораторна робота 7

I Доповніть вислів

- 1 Режим руху теплоносія визначається числом ...
- 2 При розгляді процесу конвективного теплообміну основною величиною, яка визначається, являється ...
- 3 Процес переносу теплоти від рухомого середовища до поверхні стінки називається ...
- 4 Піднімальну силу, яка виникає в рідинах та газах за рахунок різниці густини, характеризує число ...
- 5 Процес переносу теплоти від одного рухомого середовища до іншого через стінку, що їх розділяє у будь-якій формі, називається ...
- 6 Графічну залежність безрозмірного комплексу Ko від чисел Рейнольдса та Грасгофа при визначенні числа Нуссельта використовують при ... режимі руху середовища.
- 7 Кількість теплоти, яка передається за одиницю часу через один метр довжини труби від гарячого середовища до холодного при різниці температур між ними в один градус, називається ...
- 8 Напрямок теплообміну на межі "стінка – рідина" характеризується числом ...

II Перелічте усі види вказаного предмета (явища)

- 9 До основних чисел подібності, які характеризують конвективний теплообмін, відносяться: ...
- 10 Залежно від значення числа Рейнольдса режим руху середовища може бути 3 видів: ...

11 Факторами, від яких залежить вид рівняння подібності, являються: ...

12 Факторами, від яких залежить величина коефіцієнта тепловіддачі, являються: ...

III Запишіть коди відповідей, які ви вважаєте правильними

13 Для збільшення величини лінійного коефіцієнта теплопередачі потрібно:

- а) збільшити коефіцієнт тепловіддачі;
- б) зменшити коефіцієнт тепловіддачі;
- в) збільшити коефіцієнт теплопровідності стінки;
- г) зменшити коефіцієнт теплопровідності стінки.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

14 Вказати рівняння для розрахунку процесу

Процес	Рівняння
1) Тепловіддача	а) $Q^* = \alpha F (t_1 - t_2)$
2) Теплопровідність	б) $Q^* = -\lambda F (t_1 - t_2)/\delta$
3) Теплопередача	в) $Q^* = K_u \pi l \tau (t_1 - t_2)$

15 Вказати одиниці вимірювання величин

Величина	Одиниця вимірювання
1) Число Рейнольдса	а) Вт
2) Число Нуссельта	б) Вт/м ²
3) Об'ємна витрата рідини	в) Вт/(м·К)
4) Масова витрата рідини	г) Вт/(м ² ·К)
5) Коефіцієнт тепловіддачі	д) м ³ /с
6) Коефіцієнт теплопередачі	е) кг/с
7) Лінійний коефіцієнт теплопередачі	ж) безрозмірна величина

Лабораторна робота 8

I Доповніть вислів

- 1 Відношення теплоти, яка витрачається на корисну роботу, до теплоти, яку одержала електрична піч, називається ...
- 2 Теплота, яка витрачається на нагрів металу в електричній печі, називається ...
- 3 Частина електропічної установки, в якій здійснюється перетворення електричної енергії на теплову та нагрів металу, називається ...
- 4 Теплота, яка одержана за рахунок спалення палива, називається ...
- 5 Частина електропічної установки, в якій розміщують необхідне електричне устаткування, називається ...

II Переліchte усі види вказаного предмета (явища)

- 6 Залежно від засобу перетворення електричної енергії на теплову, від схеми підвода тепла та режиму теплової обробки електричні печі розподіляються на наступні 6 типів: ...
- 7 Електропічна установка має наступні 3 основні параметри: ...
- 8 Електропічна установка складається з 3 основних частин: ...
- 9 Для оцінки ефективності роботи електричної печі використовують 3 типи коефіцієнта корисної дії печі (ККД): ...
- 10 Печі опору розподіляються на наступні 4 види: ...
- 11 При роботі електропічної установки існує 2 наступних види витрат енергії: ...

III Запишіть коди відповідей, які ви вважаєте правильними

- 12 Величини, які потрібно знати для розрахунку кількості теплоти, котру одержала паливна піч за час роботи:
 - а) напруга;
 - б) теплоємність палива;
 - в) час роботи печі;
 - г) об'ємні витрати палива.
- 13 Джерела витрат теплоти в електричних печах:
 - а) випромінювання через вікна та щілини;
 - б) нагрів кладки печі;
 - в) нагрів заготовки деталі;

- г) теплопровідність кладки печі;
- д) теплопровідність матеріалу заготовки.

14 Величини, котрі необхідно знати для розрахунку кількості теплоти, яка витрачається на нагрів металу в електричній печі:

- а) тепловміст металу;
- б) температура пічних газів;
- в) температура металу;
- г) сила струму.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

16 Вказати рівняння для визначення величини кількості теплоти:

Тип теплоти	Рівняння
1) Теплота, яку одержує електрична піч під час її роботи	а) $Q_{прих} = I \cdot U \cdot \tau$
2) Теплота, яка витрачається на нагрів металу	б) $Q_{прих} = B \cdot Q_n^p \cdot \tau$
3) Теплота, яку одержує піч при спаленні палива	в) $Q_{пол} = m(t_K C_{t_K} - t_n C_{t_n}) = m(h_K - h_n)$

17 Вказати одиниці вимірювання величин:

Величина	Одиниця вимірювання
1) Напруга	а) %
2) Сила струму	б) В
3) Термічний ККД печі	в) Дж/(кг·К)
4) Масова теплоємність	г) Дж/м ³
5) Тепловміст матеріалу	д) Дж/кг
6) Нижня теплота згорання палива	е) м ³ /с
7) Витрата палива (об'ємна)	ж) А

4 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

4.1 План практичних занять

Практичні заняття проводяться з *метою*:

- закріплення, розширення та поглиблення теоретичних знань та навичок, які одержав студент на лекціях та лабораторних заняттях;
- набуття вміння користуватись довідковою літературою при розв'язанні теплотехнічних задач;
- одержання вміння виконувати теплотехнічні розрахунки, моделювати теплові процеси;
- одержання навичок розв'язання необхідних розрахункових задач.

Практичні заняття проводяться за наступними темами.

МОДУЛЬ 1

Розділ 1. Технічна термодинаміка

Тема 1.1. Основні параметри робочого тіла

Основні параметри робочого тіла. Розрахунок теплоємності газів. Суміші газів. Теплоємність суміші ідеальних газів.

Розв'язання задач № 1-10, 74-80 [12].

Література: [1, гл. 1: § 1.1-1.5; 2, гл. 1: § 1-2; 3, гл. 1: вступ, § 1.4-1.6, гл. 2: § 2.1-2.3, гл. 3: § 3.1-3.4, гл. 6: § 6.1-6.9; 9, с. 3-23; 10, вступ, гл. 1: § 1.1; 12, с. 3-42].

Тема 1.2. Перший закон термодинаміки

Рівняння стану ідеальних газів. Внутрішня енергія та робота розширення газу. Перший закон термодинаміки.

Розв'язання задач № 89-112 [12].

Література: [1, гл. 2: § 2.1-2.6; 2, гл. 1: § 3-5; 3, гл. 1: § 1.7, гл. 5: § 5.1-5.6, гл. 6: § 6.10-6.11, гл. 7: § 7.1-7.6; 9, с. 3-23; 10, гл. 1: § 1.2; 12, с. 43-54].

Тема 1.3. Термодинамічні процеси

Ентальпія, ентропія газів. Термодинамічні процеси ідеальних газів: ізохорний, ізобарний, ізотермічний, адіабатний, політропний.

Розв'язання задач № 113-163 [12].

Література: [1, гл. 2: § 2.1-2.6, гл. 4: § 4.1; 2, гл. 1: § 3-5, гл. 3: § 1; 3, гл. 1: § 1.7, гл. 5: § 5.1-5.6, гл. 6: § 6.10-6.11, гл. 7: § 7.1-7.6; 9, с. 3-23; 10, гл. 1: § 1.2; 12, с. 55-85].

Тема 1.4. Реальні гази та їх властивості

Реальні гази та їх властивості. Водяна пара, визначення її основних параметрів. *Pv*-, *Ts*-, *hs*-діаграми водяної пари. Вологе повітря та його параметри. *hd*-Діаграма вологого повітря.

Розв'язання задач № 224-240, 278-288 [12].

Література:[1, гл. 4: § 4.2-4.4; 2, гл. 3: § 2; 3, гл. 4: § 4.1-4.4, гл. 11: § 11.1-11.9, гл. 12: § 12.1-12.2, гл. 15: § 15.1-15.3; 9, с. 3-23; 10, гл. 1: § 1.3-1.4; 12, с. 133-176].

Тема 1.5. Витікання газів та парів

Основні положення термодинаміки потоку. Рівняння першого закону для потоку газу. Адіабатна течія. Швидкість адіабатної течії. Критичне відношення тисків. Основні рівняння витікання газів. Сопло Лаваля. Вибір форми сопла. Дроселювання газів.

Розв'язання задач № 202-223 [12].

Література: [1, гл. 5: § 5.1-5.5; 2, гл. 6: § 1-4; 3, гл. 13: § 13.1-13.4, 13.6-13.11, гл. 14: § 14.1-14.2; 9, с. 3-23; 10, гл. 1: § 1.5; 12, с. 118-132].

МОДУЛЬ 2

Розділ 2. Теорія теплообміну

Тема 2.1. Теплопровідність

Кількісні характеристики переносу теплоти. Основний закон теплопровідності. Коефіцієнт теплопровідності. Розрахунок переносу теплоти за допомогою теплопровідності при стаціонарному режимі через плоску і циліндричну стінки.

Розв'язання задач № 294, 301-302 [12].

Література: [1, гл. 7: § 7.1-7.3, гл. 8: § 8.1-8.3; 2, гл. 14: § 1, гл. 16: § 1-3; 3, гл. 22: § 22.1-22.6, гл. 23: § 23.1-23.4; 9, с. 40-58; 10, гл. 2: § 2.1; 12, с. 177-193].

Тема 2.2. Теплопередача

Теплопередача між двома середовищами через розподіляючу стінку. Розрахунок теплопередачі через одно- і багатошарову плоску та циліндричну стінку. Інтенсифікація теплопередачі. Розрахунок критичного діаметру теплової ізоляції.

Розв'язання задач № 289-293, 295 [12].

Література: [1, гл. 12: § 12.2-12.4; 3, гл. 24: § 24.1-24.3; 9, с. 40-58; 10, гл. 2: § 2.1; 12, с. 177-193].

Тема 2.3. Конвекційний теплообмін

Основи теорії конвекційного теплообміну. Основи теорії подоби. Числа подоби. Розрахунок коефіцієнту тепловіддачі.

Розрахунок тепловіддачі при вимушеному русі рідини або газу вздовж плоскої поверхні, в трубах (ламінарний і турбулентний режими руху). Вільна конвекція. Розрахункові рівняння.

Розв'язання задач № 303-329 [12].

Література: [1, гл. 9: § 9.1-9.7, гл. 10: § 10.1-10.3; 3, гл. 26: § 26.1-26.3, § 26.5-26.6, гл. 27: § 27.2-27.7; 9, с. 40-58; 10, гл. 2: § 2.2; 12, с. 194-217].

Тема 2.4. Теплообмін випромінюванням

Основні закони теплообміну випромінюванням. Коефіцієнт випромінювання. Розрахунок теплообміну випромінюванням між тілами, які розділені прозорою середою. Захист від випромінювання. Теплові екрани.

Розв'язання задач № 330-344 [12].

Література: [1, гл. 11: § 11.1-13.5; 2, гл. 17: § 1-3; 3, гл. 29: § 29.1-29.7; 9, с. 40-58; 10, гл. 2: § 2.3; 12, с. 218-232].

Розділ 3. Прикладна теплотехніка

Тема 3.1. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів

Типи теплообмінних апаратів. Основні схеми руху і теплообміну потоків теплоносіїв. Принцип розрахунку теплообмінних апаратів. Розрахункові рівняння. Види теплового розрахунку теплообмінників.

Розв'язання задач № 296-299 [12].

Література: [1, гл. 14: § 14.1-14.3; 3, гл. 30: § 30.1-30.4; 10, гл. 2: § 2.4; 12, с. 177-193].

Тема 3.2. Цикли ГТУ

Цикл ГТУ із підводом тепла при $P = \text{const}$ та при $V = \text{const}$. Основні розрахункові рівняння. Відображення циклів ГТУ у Pv - та Ts -діаграмах.

Розв'язання задач № 189-190 [12].

Література: [1, гл. 21: § 21.1-21.5; 3, гл. 16: § 16.1-16.2, гл. 17: § 17.1-17.5, гл. 18: § 18.1-18.5; 9, с. 24-39; 10, гл. 3: § 3.1-3.2; 12, с. 96-117-193].

Наприкінці кожного модуля заплановано **письмові контрольні роботи**.

Розподіл годин та видів контролю за темами практичних занять для **спеціальності ЛВ** наведено в таблиці 14.

Таблиця 14 – Розподіл годин та видів контролю за темами практичних занять для спеціальності ЛВ

№	Короткий зміст заняття	Кількість годин	Вид контролю
Модуль 1			
	Розділ 1. Основи технічної термодинаміки		
1	Тема 1.1. Основні параметри робочого тіла Тема 1.2. Перший закон термодинаміки	2	
2	Тема 1.3. Термодинамічні процеси	2	РР№1
3	Тема 1.4. Реальні гази та їх властивості Тема 1.5. Витікання газів та парів	2	РР№2
4	Проведення контрольної роботи	2	КР№1
Модуль 2			
	Розділ 2. Теорія теплообміну		
5	Тема 2.1. Теплопровідність. Тема 2.2. Теплопередача	2	
6	Тема 2.3 Конвективний теплообмін	2	РР№3
7	Тема 2.4 Теплообмін випромінюванням	2	
	Розділ 3. Прикладна теплотехніка		
8	Тема 3.1. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів. Тема 3.2. Газотурбінні установки	2	РР№4
9	Проведення контрольної роботи	2	КР№2

Студенти *спеціальності ОМТ* основні принципи розрахунку задач вивчають на лекціях та під час самостійної роботи, на лекціях розглядається найбільш складний матеріал. Під час контролюючої самостійної роботи студенти мають можливість одержати необхідний довідковий матеріал, допомогу в рішенні індивідуальних завдань, захистити контрольні точки.

4.2 Приклади рішення задач

МОДУЛЬ 1

Розділ 1. Технічна термодинаміка

Тема 1.1. Основні параметри робочого тіла

Приклад 1.1. Визначити абсолютний тиск пари в котлі, якщо манометр показує $P = 1,3$ бар, а атмосферний тиск за ртутним барометром складає 680 мм рт. ст. при $t = 25^\circ\text{C}$.

Розв'язання. Барометричний тиск необхідно перерахувати до 0°C :

$$P_o = P_t (1 - 0,000172 t) = 680 (1 - 0,000172 \cdot 25) = 677,1 \text{ мм рт. ст.}$$

Тепер можна визначити абсолютний тиск пари в котлі:

$$P_{abs} = 130000 + 677,1 \cdot 133,3 = 220257 \text{ Па} = 0,22 \text{ МПа.}$$

Приклад 1.2. Масові долі кисню та азоту в атмосферному повітрі відповідно дорівнюють – 0,232 і 0,768. Визначити об'ємні долі кисню та азоту, газову постійну і молекулярну масу повітря, парціальні тиски кисню та азоту, якщо тиск повітря за барометром складає 760 мм рт. ст.

Розв'язання. Газові постійні кисню та азоту знаходимо за додатком А. Визначаємо газову постійну повітря:

$$R_{sum} = g_{O_2} \cdot R_{O_2} + g_{N_2} \cdot R_{N_2} = 0,232 \cdot 259,8 + 0,768 \cdot 296,8 = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Розраховуємо об'ємні долі компонентів суміші:

$$r_{O_2} = \frac{g_i \cdot R_i}{R_{sum}} = \frac{0,232 \cdot 259,8}{287} = 0,21.$$

$$r_{N_2} = \frac{g_i \cdot R_i}{R_{\text{сум}}} = \frac{0,768 \cdot 296,8}{287} = 0,79.$$

Молекулярну масу суміші визначаємо за формулою

$$\mu_{\text{сум}} = \sum_i^n r_i \cdot \mu_i = r_{O_2} \cdot \mu_{O_2} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2} = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,02 = 28,9 \text{ кг/кмоль}$$

або за формулою

$$\mu_{\text{сум}} = \frac{8314}{R_{\text{сум}}} = \frac{8314}{287} = 28,9 \text{ кг/кмоль.}$$

Визначаємо парціальні тиски:

$$P_{O_2} = r_{O_2} \cdot P = 0,21 \cdot 760 = 159,4 \text{ мм рт. ст.,}$$

$$P_{N_2} = r_{N_2} \cdot P = 0,79 \cdot 760 = 600,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв'язати задачі № 1.1–1.3 (розділ 4.3).

Тема 1.2. Перший закон термодинаміки

Приклад 1.3. Балон с киснем ємністю 20 л знаходиться під тиском 10 МПа при 15°C. Після витрати частки кисню тиск зменшився до 7,6 МПа, а температура до 10°C. Визначити масу кисню, яку витратили.

Розв'язання. Визначаємо початкову та кінцеву масу кисню за рівнянням Клапейрону:

$$m_1 = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 288} = 2,673 \text{ кг}; \quad m_2 = \frac{7,6 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{259,8 \cdot 283} = 2,067 \text{ кг.}$$

Таким чином витрата кисню складає

$$\Delta m = 2,673 - 2,067 = 0,606 \text{ кг.}$$

Приклад 1.4. Визначити густину оксиду вуглецю при 20°C і 710 мм рт. ст., якщо при 0°C і 760 мм рт. ст. вона складає 1,251 кг/м³.

Розв’язання. Запишемо рівняння Клапейрона для двох станів. Згадаємо, що густина – це величина, яка оборотна питомому об’єму. Тоді одержуємо

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = 1,251 \cdot \frac{710 \cdot 273}{760 \cdot (273 + 20)} = 1,09 \text{ кг/м}^3.$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв’язати задачі № 1.4–1.15 (розділ 4.3).

Тема 1.3. Термодинамічні процеси

Приклад 1.5. Повітря знаходиться в замкнутій посудині ємністю 90 л при тиску 8 бар і температурі 30°C. За рахунок підведення теплоти тиск збільшився до 16 бар. Визначити кількість підведеної теплоти. Розрахунки провести для двох випадків: а) теплоємність повітря враховувати нелінійно залежною від температури; б) теплоємність повітря враховувати незалежною від температури. Визначити похибку розрахунку теплоємності за двома методами.

Розв’язання. Зі співвідношення параметрів ізохорного процесу (газ знаходиться в замкнутій посудині) визначаємо кінцеву температуру повітря:

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{P_2}{P_1} = 303 \cdot \frac{16}{8} = 606 \text{ К}; \quad t_2 = 606 - 273 = 333^\circ \text{С}.$$

Масу повітря, яка знаходиться в посудині, визначаємо із рівняння Клапейрона (газова постійна R , додаток А):

$$m = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,09}{287 \cdot 303} = 0,8278 \text{ кг}.$$

Для розрахунку теплоємності за першим методом (нелінійна залежність від температури) знаходимо теплоємність повітря в інтервалі температур від 0 °С до 30 °С та від 0 °С до 333 °С (додаток Б, табл. Б.2):

$$\bar{C}_v \Big|_{0^\circ \text{С}}^{30^\circ \text{С}} = 0,717 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad \bar{C}_v \Big|_{0^\circ \text{С}}^{333^\circ \text{С}} = 0,735 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Визначаємо середню масову теплоємність повітря при постійному об'ємі для інтервалу температур від 30 до 333 °С:

$$\overline{C_v} \Big|_{30^{\circ}\text{C}}^{333^{\circ}\text{C}} = \frac{0,735 \cdot 333 - 0,717 \cdot 30}{333 - 30} = 0,7368 \text{ кДж.}$$

Кількість теплоти, яка підведена до повітря, дорівнює

$$Q = 0,8278 \cdot 0,7368(333 - 30) = 184,8 \text{ кДж.}$$

Для розрахунку теплоємності за другим методом (теплоємність не залежить від температури) теплоємність повітря розраховуємо за формулою

$$\overline{C_v} = \frac{R}{k - 1}.$$

Газову постійну знаходимо за додатком А. Показник адіабати дорівнює 1,4 (повітря – двоатомний газ). Розраховуємо теплоємність:

$$\overline{C_v} = \frac{287}{1,4 - 1} = 717,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Кількість теплоти, яка підведена до повітря, дорівнює

$$Q = 0,8278 \cdot 717,5 (333 - 30) = 179966 \text{ Дж.}$$

Відносна похибка розрахунку теплоємності за двома методами складає

$$\delta = \frac{736,8 - 717,5}{736,8} \cdot 100 = 2,6 \text{ \%}.$$

Приклад 1.6. Повітря об'ємом 0,01 м³ при тиску 2 бар і температурі 25°С розширюється до тиску 1 бар. Визначити кінцевий об'єм, кінцеву температуру, роботу, яку виконує газ, підведене тепло, якщо розширення здійснюється за: 1) ізотермою, 2) адіабатою, 3) політропою з показником політропи $n = 1,3$.

Розв'язання. 1) Ізотермічне розширення.

Зі співвідношення параметрів ізотермічного процесу визначаємо кінцевий об'єм:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} = 0,01 \cdot \frac{2}{1} = 0,02 \text{ м}^3.$$

Процес здійснюється при $T = \text{const}$, тому кінцева температура дорівнює початковій:

$$t_2 = t_1 = 25^\circ\text{C}.$$

Визначаємо роботу ізотермічного процесу розширення:

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 2 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \cdot \ln 2 = 1386 \text{ Дж}.$$

Кількість підведеної теплоти згідно з першим законом термодинаміки дорівнює роботі тому, що внутрішня енергія не змінюється.

2) Адіабатне розширення.

Адіабатним називають процес, який здійснюється без теплообміну з навколишнім середовищем, тобто $Q = 0$.

Кінцевий об'єм визначаємо із співвідношення параметрів процесу (для двоатомного газу показник адіабати дорівнює 1,4):

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,01 \cdot 2^{\frac{1}{1,4}} = 0,016 \text{ м}^3.$$

Кінцева температура повітря із співвідношення параметрів процесу:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 244 \text{ К}; \quad t_2 = -29^\circ\text{C}.$$

Визначаємо роботу адіабатного процесу розширення:

$$L = \frac{1}{1,44 - 1} \cdot (2 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,016) = 46000 \text{ Дж}.$$

3) Політропне розширення.

Кінцевий об'єм визначаємо із співвідношення параметрів процесу:

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,01 \cdot 2^{\frac{1}{1,3}} = 0,017 \text{ м}^3.$$

Кінцева температура повітря із співвідношення параметрів процесу:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 298 \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} = 253 \text{ К}; \quad t_2 = -19^\circ \text{С}.$$

Визначаємо роботу політропного процесу розширення:

$$L = \frac{1}{1,3-1} \cdot (2 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,017) = 60939 \text{ Дж}.$$

Визначаємо кількість підведеної теплоти (без урахування впливу температури на теплоємність):

$$Q = \frac{R}{k-1} \cdot \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,3-1,4}{1,3-1} (253 - 298) = 10645 \text{ Дж}.$$

Приклад 1.7. Яку кількість теплоти потрібно витратити для нагріву 2 м^3 суміші газів при постійному надлишковому тиску 2 бар від 100°С до 500°С ? Суміш газів складається з 3 кіломолей азоту та 2 кіломолей кисню. Яку роботу при цьому виконує газ? Тиск атмосфери прийняти рівним 760 мм рт. ст. При розрахунках вплив температури на теплоємність не враховувати.

Розв'язання. Спочатку потрібно визначити газову постійну суміші газів. Для цього визначаємо масу азоту та кисню:

$$m_{N_2} = 3 \cdot 28 = 84 \text{ кг}; \quad m_{O_2} = 2 \cdot 32 = 64 \text{ кг}.$$

Тепер визначаємо газову постійну суміші газів:

$$R = 296,8 \cdot \frac{84}{84+64} + 259,8 \cdot \frac{64}{84+64} = 281 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Теплоємність суміші газів за умовами незалежності від температури визначаємо за формулою (суміш складається з двохатомних газів, тому $k=1,4$)

$$\overline{C_p} = \frac{R \cdot k}{k - 1} = \frac{281 \cdot 1,4}{1,4 - 1} = 983,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Визначаємо абсолютний тиск, під яким знаходиться суміш газів:

$$P_{абс} = 2 \cdot 10^5 + 760 \cdot 133,3 = 301308 \text{ Па}.$$

Масу суміші газів визначаємо за допомогою рівняння Клапейрона

$$m = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{301308 \cdot 2}{281 \cdot 373} = 5,75 \text{ кг}.$$

Визначаємо кількість теплоти, яку потрібно витратити для нагріву суміші газів від 100°C до 500°C :

$$Q = m \cdot \overline{C_p} \cdot (T_2 - T_1) = 5,75 \cdot 983,5 \cdot (500 - 100) = 2262050 \text{ Дж}.$$

Роботу, яку виконує суміш газів, визначаємо за формулою

$$L = m \cdot R \cdot (T_2 - T_1) = 5,75 \cdot 281 \cdot (500 - 100) = 646300 \text{ Дж}.$$

Приклад 1.8. Стан 1,5 кг водяної пари в політропному процесі змінюється від $P_1=0,9$ бар і $t_1=18^\circ\text{C}$ до $P_2=10$ бар і $t_2=125^\circ\text{C}$. Визначити показник політропи, кінцевий об'єм, величину роботи і кількість відведеної теплоти. Теплоємність газу враховувати лінійно залежною від температури.

Розв'язання. Зі співвідношення параметрів політропного процесу одержуємо:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{P_2}{P_1}} = \frac{\lg \frac{398}{291}}{\lg \frac{10}{0,9}} = 0,13,$$

тоді

$$n = \frac{1}{1 - 0,13} = 1,149.$$

Кінцевий об'єм визначаємо із рівняння Клапейрона:

$$V_2 = \frac{m \cdot R \cdot T_2}{P_2} = \frac{1,5 \cdot 461,6 \cdot 398}{10 \cdot 10^5} = 0,276 \text{ м}^3.$$

Роботу процесу визначаємо за формулою

$$L = \frac{m \cdot R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{1,5 \cdot 461,6}{1,149-1} \cdot (18 - 125) = -497227 \text{ Дж.}$$

Визначаємо теплоємність водяної пари при постійному об'ємі з урахуванням лінійної залежності від температури (додаток В):

$$\bar{C}_v = 1,3783 + 0,00029278 \cdot \frac{18 + 125}{2} = 1,3992 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Визначаємо кількість відведеної теплоти:

$$Q = m C_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = 1,5 \cdot 1,3992 \cdot \frac{1,149-1,4}{1,149-1} \cdot (125 - 18) = -378 \text{ кДж.}$$

Приклад 1.9. 13 кг повітря знаходиться при нормальних умовах. Після проведення процесу температура повітря підвищилась до 400 °С. Визначити зміну ентропії повітря при: а) ізохорному процесі, б) ізобарному процесі, в) адіабатному процесі, г) політропному процесі з показником політропи 2,2. Теплоємність повітря враховувати постійною і незалежною від температури.

Розв'язання. Спочатку визначаємо теплоємність повітря при постійному об'ємі та тиску:

$$\bar{C}_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$\bar{C}_p = \frac{R \cdot k}{k-1} = \frac{287 \cdot 1,4}{1,4-1} = 1004,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Визначаємо зміну ентропії в ізохорному процесі:

$$\Delta S = m \bar{C}_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 13 \cdot 717,5 \cdot \ln \frac{673}{273} = 8416 \text{ Дж/К.}$$

Визначаємо зміну ентропії в ізобарному процесі:

$$\Delta S = m \bar{C}_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 13 \cdot 1004,5 \cdot \ln \frac{673}{273} = 11782 \text{ Дж/К.}$$

Зміна ентропії в адіабатному процесі дорівнює нулю.

Визначаємо зміну ентропії в політропному процесі:

$$\Delta S = m \bar{C}_n \ln \frac{T_2}{T_1} = 13 \cdot 717,5 \cdot \frac{2,2 - 1,4}{2,2 - 1} \cdot \ln \frac{673}{273} = 5560 \text{ Дж/К.}$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв'язати задачі № 1.16–1.20 (розділ 4.3).

Тема 1.4. Властивості реальних газів

Приклад 1.10. Визначити параметри водяної пари, якщо тиск $P=10$ бар, ступінь сухості $x=0,95$.

Розв'язання. Користуючись hs -діаграмою, знаходимо точку **1**, що характеризує даний стан пари (рис. 1). Проектуючи її на вісь ординат, знаходимо значення ентальпії $h_1=2675$ кДж/кг. Проектуючи цю ж точку на вісь абсцис, знаходимо значення ентропії $s_1=6,38$ кДж/кг·К.

Для визначення температури пари знаходимо температуру насичення пари при заданому тиску. Для цього шукаємо точку **2** перетинання ізобари 10 бар з верхньою межевою кривою. Через цю точку проходить ізотерма 180 °С; це і є температура пари, яка характеризує будь-яку точку в області насиченої пари, що належить цій ізобарі.

Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою пунктирних ліній постійного об'єму $v_1=0,2$ м³/кг (див. рис. 1). Значення u знаходимо за формулою

$$u = h - Pv = 2675000 - 1000000 \cdot 0,2 = 2475000 \text{ Дж/кг.}$$

Приклад 1.11. Визначити параметри водяної пари і ступінь її перегріву, якщо $P=20$ бар, $t=350$ °С.

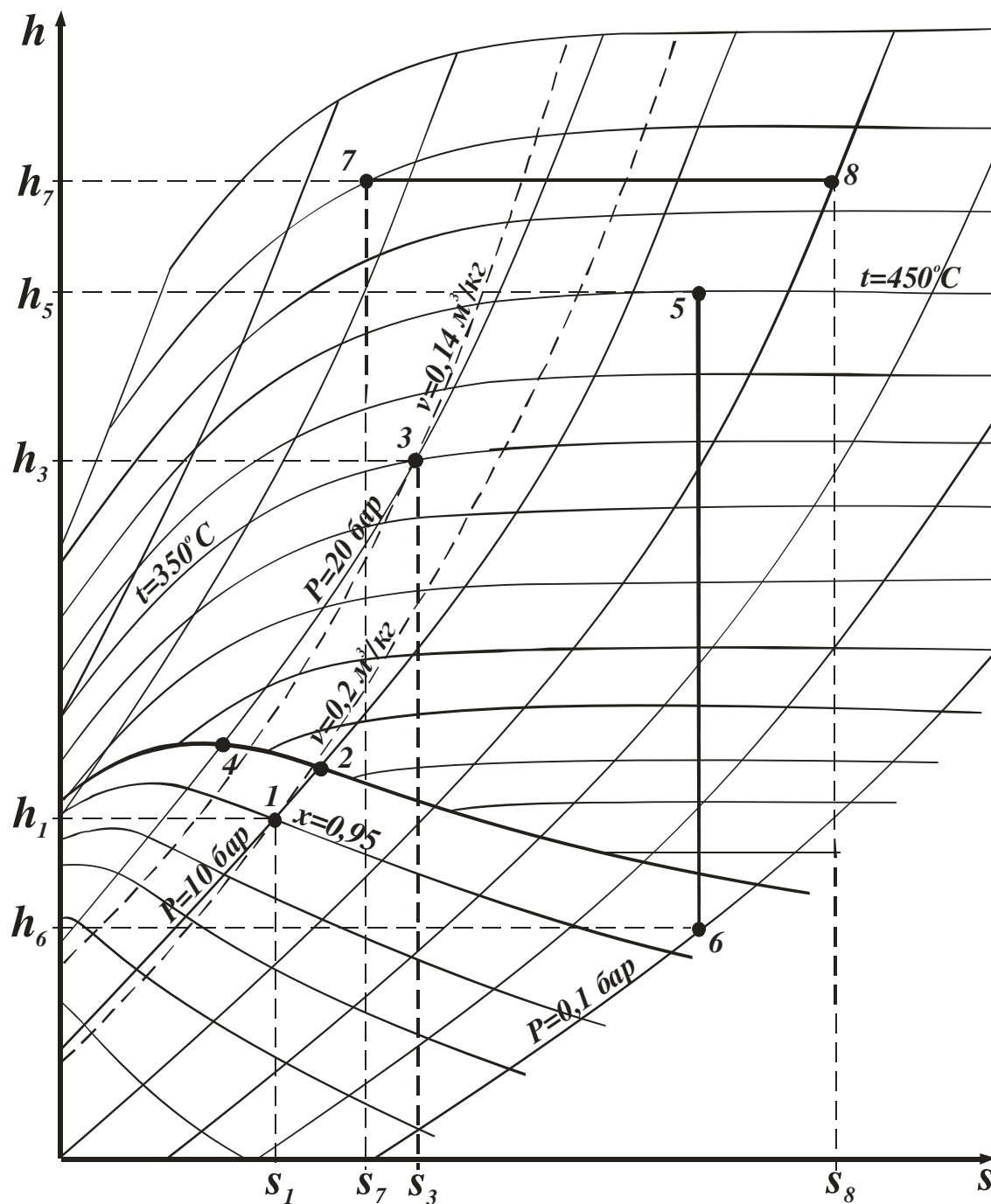


Рисунок 1 – hs -Діаграма водяної пари

Розв'язання. Користуючись hs -діаграмою, знаходимо точку 3, що характеризує даний стан пари, на перетинанні ізобари 20 бар та ізотерми 350°C (див. рис. 1). Проектуючи її на вісь ординат, знаходимо значення ентальпії $h_3=3140$ кДж/кг. Проектуючи цю ж точку на вісь абсцис, знаходимо значення ентропії $s_3=6,95$ кДж/кг $^\circ\text{C}$.

Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою ліній постійного об'єму $v_3=0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$. Значення u_3 знаходимо за рівнянням

$$u=h-Pv=3140000-2000000 \cdot 0,14=2860000 \text{ Дж/кг.}$$

Для визначення ступеня перегріву знаходимо температуру насичення при заданому тиску. Це значення ізотерми, яка проходить через точку **4** – точку перетину ізобари 20 бар з кривою насичення, тобто кривою сухої насиченої пари. Значення цієї ізотерми 215°C . Звідси ступінь перегріву дорівнює

$$\Delta t=350-215=135^\circ\text{C.}$$

Приклад 1.12. 2 м^3 пари розширюються за адіабатою від початкових параметрів стану $P_n=5 \text{ бар}$ і $t_n=450^\circ \text{ C}$ до $P_k=0,01 \text{ МПа}$. Знайти значення ентальпії і питомого об'єму в початковому і кінцевому станах, ступінь сухості в кінцевій точці і роботу пари в процесі.

Розв'язання. За допомогою *hs*-діаграми знаходимо точку, що характеризує початковий стан пари, – точка **5** на рисунку 1. Проектуючи її на вісь ординат, знаходимо значення ентальпії $h_5=3375 \text{ кДж/кг}$.

Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою ліній постійного об'єму $v_5=0,65 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Адiabатний процес на *hs*-діаграмі зображується вертикальною лінією. Тому кінцеву точку процесу **6** знаходимо на перетині вертикальної лінії, яку проведено із точки **5**, з ізобарою $P=0,1 \text{ бар}$. Проектуючи точку **6** на вісь ординат, знаходимо значення ентальпії в кінцевій точці $h_6=2520 \text{ кДж/кг}$.

Ступінь сухості у кінцевому стані знаходимо за допомогою ліній постійного ступеня сухості $x_6=0,97$.

Значення кінцевого питомого об'єму знаходимо за допомогою ліній постійного об'єму $v_6=15 \text{ м}^3/\text{кг}$ і ступеня сухості:

$$v_k= v_6 x_6=15 \cdot 0,97=14,55 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Внутрішню енергію розраховуємо аналітично:

$$u_n=3375000-500000 \cdot 0,65=3050000 \text{ Дж/кг,}$$

$$u_k=2525000-10000 \cdot 14,55=2379000 \text{ Дж/кг.}$$

Робота пари у адіабатному процесі дорівнює зміні внутрішньої енергії з оборотним знаком. Тому розраховуємо її за формулою

$$L = ml = -m\Delta u = -\frac{V}{v_n}(u_k - u_n) = \frac{V}{v_n}(u_n - u_k);$$

$$L = \frac{2}{0,65}(3050000 - 2379000) = 2076923 \text{ Дж.}$$

Приклад 1.13. Перегріта пара з тиском $P_n=100$ бар і температурою 600°C дроселюється до $P_k=5$ бар. Визначити, як зміняться ентальпія, ентропія і питомий об'єм пари в цьому процесі.

Розв'язання. Процес дроселювання зображується на hs -діаграмі горизонтальною лінією. Для визначення кінцевої точки процесу проводимо горизонталь з точки 7 до перетинання з ізобарою $P=5$ бар (див. рис. 1).

Зміна ентальпії при дроселюванні дорівнює нулю.

Ентропію початкового і кінцевого станів визначаємо, проектуючи точки 7 і 8 на вісь абсцис: $s_n=6,90$ кДж/кгК, $s_k=8,28$ кДж/кгК.

$$\Delta s = 8,28 - 6,9 = 1,38 \text{ кДж/кгК.м.}$$

Значення питомого об'єму знаходимо за допомогою ліній постійного об'єму $v_n=0,038$ м³/кг, $v_k=0,8$ м³/кг.

$$\Delta v = 0,8 - 0,038 = 0,762 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Приклад 1.14. На одержання пари з тиском $P=75$ атм. витрачено теплоту кількістю 480 ккал/кг. Визначити стан пари та її густину, якщо пара отримана з води з температурою 150°C .

Розв'язання. Ентальпія киплячої води при температурі 150°C (табл. Д.1 додатка Д) складає $h'=632,2$ кДж/кг.

Ентальпія пари

$$h = h' + q = 632,2 + 480 \cdot 4,186 = 2641,5 \text{ кДж/кг.}$$

Водяна пара при тиску 75 атм. (7,5 МПа) має наступні характеристики (табл. Д.2 додатка Д):

$$h'=1231 \text{ кДж/кг}; h''=2758,6 \text{ кДж/кг}; r=1492 \text{ кДж/кг}; \rho''=38,6 \text{ кг/м}^3.$$

Порівнюючи ентальпію отриманої пари h з ентальпією сухої пари h'' , встановлюємо, що це волога пара.

Ступінь сухості пари визначаємо за рівнянням

$$x = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{2641,5 - 1231}{1492} = 0,94.$$

Густина отриманої пари

$$\rho_x = \frac{\rho''}{x} = \frac{38,6}{0,94} = 41,06 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 1.15. У посудині об'ємом $0,75 \text{ м}^3$ знаходиться суха насичена пара під тиском 1 МПа . Пара підігрівається при незмінному об'ємі, і наприкінці нагрівання її тиск підвищується до $1,4 \text{ МПа}$. Визначити кількість витраченого на нагрівання тепла.

Розв'язання. Суха насичена пара при $P=1 \text{ МПа}$ має питомий об'єм $v''=0,1945 \text{ м}^3/\text{кг}$ і ентальпію $h''=2777,8 \text{ кДж/кг}$ (табл. Д.2 додатка Д). Отже, її внутрішня енергія

$$u'' = h'' - P_1 v'' = 2777,8 \cdot 10^3 - 10^6 \cdot 0,1945 = 2583,3 \text{ кДж/кг}.$$

Наприкінці нагрівання пара буде перегрітою, причому її ентальпія буде дорівнювати 3190 кДж/кг (визначена за допомогою hs -діаграми (додаток Г) для точки перетину ізохори $v=0,19 \text{ м}^3/\text{кг}$ з ізобарою $P=14 \text{ бар}$).

Внутрішня енергія перегрітої пари

$$u = h - P_2 v = 3190 \cdot 10^3 - 1,4 \cdot 10^6 \cdot 0,1945 = 2906,3 \text{ кДж/кг}.$$

Маса пари в посудині

$$m = \frac{V}{v''} = \frac{0,75}{0,1945} = 3,85 \text{ кг}.$$

Визначаємо теплоту, яку було витрачено на нагрівання:

$$Q = m (u - u'') = 3,85 \cdot (2906,3 - 2583,3) = 1244 \text{ кДж}.$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв'язати задачі № 1.21–1.32 (розділ 4.3).

Тема 1.5. Витікання пари та газів

Приклад 1.16. Визначити швидкість витікання азоту, якщо $P_1 = 70$ атм., $P_2 = 45$ атм., $t_1 = 50^\circ\text{C}$.

Розв'язання. Знаходимо співвідношення кінцевого і початкового тисків:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{45}{70} = 0,64.$$

Порівнюємо його з $\beta_{кр}$, яке дорівнює 0,528, тому що азот є двоатомним газом. Так як $\beta > \beta_{кр}$, то швидкість визначаємо за рівнянням

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Питомий об'єм визначаємо з рівняння Клапейрона:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{296,8 \cdot 323}{70 \cdot 0,981 \cdot 10^5} = 0,014 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Розраховуємо швидкість:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \cdot 70 \cdot 0,981 \cdot 10^5 \cdot 0,014 \times \left[1 - \left(\frac{45}{70} \right)^{0,286} \right]} = 280 \text{ м/с}.$$

Приклад 1.17. Перегріта водяна пара при тиску $P_1 = 100$ атм. і $t_1 = 500^\circ\text{C}$ витікає до середовища з $P_2 = 2$ атм. Витрата пари $G = 3$ кг/с. Визначити швидкість витікання і площу перерізу насадки.

Розв'язання. Визначаємо, яке сопло треба взяти для даного випадку витікання. Через те, що

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2}{100} < \beta_{кр} = 0,546 ,$$

для повного використання потенційної енергії пари треба взяти сопло Лаваля.

За допомогою *hs*-діаграми для витікання за адіабатою визначаємо ентальпії пари у початковому і кінцевому станах:

$$h_1 = 3375 \text{ кДж / кг}; \quad h_2 = 2500 \text{ кДж / кг}.$$

Знаходимо швидкість витікання:

$$\omega = 44,76 \sqrt{3375 - 2500} = 1324 \text{ м / с}.$$

Для вихідного перерізу знаходимо:

$$v_2 = v''_2 x_2 = 0,8 \cdot 0,905 = 0,724 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Площу вихідного перерізу визначаємо за рівнянням

$$f = \frac{G v_2}{\omega} = \frac{3 \cdot 0,724}{1324} = 0,00164 \text{ м}^2.$$

Задана витрата пари *G* – максимальна. Величина *f_{мін}* визначається за рівнянням

$$G v_{кр} = f_{мін} \omega_{кр},$$

до якого підставлено значення критичного перерізу, або за рівнянням

$$f = \frac{G}{\sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_1}{v_1}}},$$

у якому *f=f_{мін}*, а *G=G_{мах}*.

Розраховуємо *f_{мін}*:

$$f_{\min} = \frac{3}{\sqrt{2 \frac{1,33}{1,33+1} \left(\frac{2}{1,33+1} \right)^{\frac{2}{1,33-1}} \cdot \frac{100 \cdot 0,981 \cdot 10^5}{0,33}}} = 0,00027 \text{ м}^2.$$

Приклад 1.18. Повітря з резервуару з постійним тиском 100 бар і температурою 15°C витікає до атмосфери через трубку з внутрішнім діаметром 10 мм. Визначити швидкість витікання повітря і його секундну витрату. Зовнішній тиск дорівнює 1 бар. Процес розширення повітря вважати адіабатним.

Розв’язання. Визначаємо величину β і порівнюємо її з критичним значенням для повітря:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{100} < \beta_{\text{кр}} \approx 0,528.$$

Швидкість витікання буде критичною і визначається за рівнянням

$$\omega_{\text{кр}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4+1} \cdot 287 \cdot 288} = 310 \text{ м/с}.$$

Визначивши площу перетину сопла і початковий питомий об’єм повітря, розраховуємо секундну витрату:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ м}^2;$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 288}{100 \cdot 10^5} = 0,00827 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$G_{\max} = 0,0000785 \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4+1} \cdot \left(\frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{2}{1,4-1}} \cdot \frac{100 \cdot 10^5}{0,00827}} = 1,87 \text{ кг/с}.$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв’язати задачі № 1.33-1.40 (розділ 4.3).

МОДУЛЬ 2

Розділ 2. Теорія теплообміну

Тема 2.1. Теплопровідність

Приклад 2.1. Визначити тепловий потік, який проходить через одиницю довжини стінки камери згорання діаметром 180 мм, якщо товщина стінки 2,5 мм, коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки 34,9 Вт/(м·К). Температури поверхонь стінки, відповідно, дорівнюють 1200°C і 600°C.

Розв'язання. Згідно з умовою задачі протікає процес теплопровідності через циліндричну стінку, тому розраховуємо густину теплового потоку за формулою

$$q_l = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 34,9 \cdot 1 \cdot (1200 - 600)}{\ln \frac{0,18 + 2 \cdot 0,0025}{0,18}} = 4,815 \cdot 10^6 \text{ Вт/м.}$$

Приклад 2.2. Визначити температури на поверхнях шарів стінки камери згорання та на зовнішній поверхні, якщо діаметр камери 190 мм, товщина захисного покриття 1 мм, його коефіцієнт теплопровідності 1,15 Вт/(м·К), товщина стінки 2 мм, його коефіцієнт теплопровідності 372 Вт/(м·К). Тепловий потік на одиницю довжини складає 40 750 Вт, температура на поверхні покриття з боку камери – 1200°C.

Розв'язання. Запишемо рівняння для теплового потоку через кожний шар двохшарової циліндричної стінки:

$$Q^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_n \cdot (t'_{cm} - t_{us})}{\ln \frac{d + 2 \cdot \delta_n}{d}}; \quad Q^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{cm} \cdot (t_{us} - t''_{cm})}{\ln \frac{d + 2 \cdot \delta_n + 2 \cdot \delta_{cm}}{d + 2 \cdot \delta_n}}.$$

Знайдемо з них температури на поверхні шару стінки камери згорання і на зовнішній поверхні:

$$t_{us} = t'_{cm} - \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_n} \cdot \ln \frac{d + 2 \cdot \delta_n}{d} = 1200 - \frac{40750}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,15} \cdot \ln \frac{0,19 + 2 \cdot 0,001}{0,19} = 609^\circ \text{C.}$$

$$t''_{cm} = t_{ш} - \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{cm}} \cdot \ln \frac{d + 2 \cdot \delta_n + 2 \cdot \delta_{cm}}{d + 2 \cdot \delta_n} =$$

$$= 609 - \frac{40750}{2 \cdot 3,14 \cdot 372} \cdot \ln \frac{0,192 + 2 \cdot 0,002}{0,192} = 608,6^\circ \text{C}.$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв'язати задачі № 2.1–2.4 (розділ 4.3).

Тема 2.2. Теплопередача

Приклад 2.3. Неізолюваним трубопроводом діаметром 170/185 мм, який знаходиться на відкритому повітрі, протікає вода з середньою температурою 95°C , температура повітря складає -18°C . Визначити втрати теплоти з 1 м трубопроводу і температури внутрішньої та зовнішньої поверхонь цього трубопроводу, якщо коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби дорівнює $58,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, коефіцієнт тепловіддачі води стінки труби $1395 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ і труби повітрю $14 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Розв'язання. Тепловий потік розраховуємо за рівнянням

$$Q^* = \frac{3,14 \cdot 1 \cdot [95 - (-18)]}{\frac{1}{1395 \cdot 0,17} + \frac{1}{2 \cdot 58,15} \cdot \ln \frac{185}{170} + \frac{1}{14 \cdot 0,185}} = 907 \text{ Вт}.$$

Температури внутрішньої та зовнішньої поверхонь трубопроводу визначаємо з рівняння для теплового потоку для кожної стадії теплопередачі:

$$t'_{cm} = t_1 - \frac{Q^*}{\pi \cdot L} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} = 95 - \frac{907}{3,14 \cdot 1} \cdot \frac{1}{1395 \cdot 0,17} = 93,8^\circ \text{C}.$$

$$t''_{cm} = t_2 + \frac{Q^*}{\pi \cdot L} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} = -18 - \frac{907}{3,14 \cdot 1} \cdot \frac{1}{14 \cdot 0,185} = 93,5^\circ \text{C}.$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв'язати задачі № 2.5–2.7 (розділ 4.3).

Тема 2.3. Конвекційний теплообмін

Приклад 2.4. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік під час течії води в трубі діаметром 40 мм, довжиною 3 м зі швидкістю 1 м/с, якщо середня температура води 80°C, а температура стінки 65°C.

Розв'язання. Визначимо режим руху води в трубі. Фізичні параметри води при визначальній температурі, яка дорівнює 80°C (додаток К):

$$Pr = 2,21; \lambda = 67,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \nu = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Критерій Pr_{cm} за даними додатку К при температурі стінки (65°C) складає $Pr_{cm} = 2,74$.

Знаходимо значення критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{1 \cdot 0,04}{0,365 \cdot 10^{-6}} = 1,095 \cdot 10^5 > 10^4.$$

Режим руху – турбулентний, тому вибираємо відповідне критеріальне рівняння (додаток Е):

$$Nu = 0,021 \cdot (1,095 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 2,21^{0,43} \cdot \left(\frac{2,21}{2,74}\right)^{0,25} = 616.$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{616 \cdot 67,5 \cdot 10^{-2}}{0,04} = 10400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Відношення $L/d = 3/0,04 = 75$, тому поправка на довжину труби дорівнює 1. Визначаємо тепловий потік:

$$Q^* = 10400 \cdot 3,14 \cdot 0,04 \cdot 3 \cdot (80 - 65) = 58800 \text{ Вт}.$$

Приклад 2.5. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік на одиницю довжини труби, яка знаходиться у поперечному потоці повітря. Діаметр труби 30 мм, температура її поверхні 80°C, температура повітря 20°C, швидкість руху 5 м/с.

Розв’язання. Фізичні параметри повітря при визначальній температурі, яка дорівнює 20°C (додаток Ж):

$$Pr = 0,703; \lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Знаходимо значення критерію Рейнольда:

$$Re = \frac{5 \cdot 0,03}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 9,96 \cdot 10^3.$$

Вибираємо з додатку Е критеріальне рівняння – теплообмін при поперечному обтіканні одиночної труби при $Re > 10^3$:

$$Nu = 0,216 \cdot (9,96 \cdot 10^3)^{0,6} = 55,2.$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{55,2 \cdot 2,593 \cdot 10^{-2}}{0,03} = 47,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Тепловий потік на одиницю довжини труби:

$$q_1 = 47,7 \cdot 3,14 \cdot 0,03 \cdot (80 - 20) = 270 \text{ Вт/м}.$$

Приклад 2.6. Гладка плита довжиною 1,5 м і шириною 1 м обдувається потоком повітря зі швидкістю 5 м/с. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік, який віддає плита повітря, якщо температура поверхні плити 110°C, а температура потоку повітря 20°C.

Розв’язання. Знаходимо фізичні параметри повітря при температурі 20°C (додаток Ж):

$$Pr = 0,703; \lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Знаходимо значення критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{5 \cdot 1,5}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 4,98 \cdot 10^5.$$

Вибираємо з додатку Е критеріальне рівняння – теплообмін при поперечному обтіканні поверхні при $Re > 10^5$:

$$Nu = 0,032 \cdot (4,98 \cdot 10^5)^{0,8} = 1155.$$

Коефіцієнт тепловіддачі та тепловий потік відповідно рівні:

$$\alpha = \frac{1155 \cdot 2,593 \cdot 10^{-2}}{1,5} = 20 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; \quad Q^* = 20 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot (110 - 20) = 2700 \text{ Вт}.$$

Приклад 2.7. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від вертикальної стінки висотою 2 м повітрю, якщо середня температура стінки 120°C, а температура повітря 20°C.

Розв’язання. Визначальна температура при вільній конвекції дорівнює

$$t = \frac{120 + 20}{2} = 70^\circ \text{C}.$$

Фізичні параметри повітря при температурі 70°C знаходимо з додатка Ж:

$$Pr = 0,694; \lambda = 2,96 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad \nu = 20,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Визначаємо коефіцієнт об’ємного розширення:

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{70 + 273} = \frac{1}{343} \text{ К}^{-1}$$

Визначаємо значення добутку критерію Грасгоффа і Прандтля:

$$Gr \cdot Pr = \frac{9,81 \cdot 2^3 \cdot (120 - 20)}{343 \cdot (20,02 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,694 = 39,55 \cdot 10^9.$$

Вибираємо з додатку Е критеріальне рівняння – теплообмін при вільній конвекції при $Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$:

$$Nu = 0,135 \cdot (39,55 \cdot 10^9)^{0,33} = 460; \quad \alpha = \frac{460 \cdot 2,96 \cdot 10^{-2}}{2} = 6,82 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв’язати задачі № 2.8–2.12 (розділ 4.3).

Тема 2.4. Теплообмін випромінюванням

Приклад 2.8. Визначити власну випромінювальну здатність стінки літального апарата з коефіцієнтом випромінювання $4,53 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, якщо температура поверхні стінки 1027°С . Визначити також ступінь чорноти стінки і довжину хвилі, що відповідає максимуму інтенсивності випромінювання.

Розв'язання. Випромінювальну здатність стінки літального апарата визначаємо за рівнянням

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 = 4,53 \cdot \left(\frac{1300}{100} \right)^4 = 1,256 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Ступінь чорноти визначаємо з рівняння $\varepsilon C_s = C$. Тоді

$$\varepsilon = \frac{C}{C_s} = \frac{4,53}{5,77} = 0,785 \approx 0,8.$$

Довжину хвилі, що відповідає максимуму інтенсивності випромінювання, визначаємо з закону Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9}{T} = \frac{2,9}{1300} = 0,00223 \text{ мм} = 2,23 \text{ мкм}.$$

Приклад 2.9. Визначити променистий теплообмін між стінками судини Дьюара, всередині якої зберігається рідкий кисень, якщо на зовнішній поверхні внутрішньої стінки температура $t_1 = -183^\circ\text{С}$, а на внутрішній поверхні зовнішньої стінки $t_2 = 17^\circ\text{С}$. Стінки судини покриті шаром срібла, ступінь чорноти якого дорівнює 0,02; площі поверхонь стінок $F_1 \approx F_2 \approx 0,1 \text{ м}^2$.

Розв'язання. Спочатку розрахуємо наведений ступінь чорноти даної системи тіл:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1/0,02 + 1/0,02 - 1} = \frac{1}{99}.$$

Кількість променистої енергії між рівнобіжними поверхнями можна визначити за рівнянням

$$Q^* = 0,1 \cdot \frac{1}{99} \cdot 5,77 \cdot \left[\left(\frac{17 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{-183 + 273}{100} \right)^4 \right] = 0,396 \text{ Вт.}$$

Приклад 2.10. У приміщенні встановлено циліндричний підігрівник (довжина 4 м, діаметр 1 м). Температура поверхні підігрівника 280°C, коефіцієнт випромінювання 4,9 Вт/(м²·К⁴). Розміри приміщення: довжина 8 м, ширина 4 м, висота 3 м, температура в приміщенні 22°C, коефіцієнт випромінювання стін 3 Вт/(м²·К⁴). Визначити тепловий потік між підігрівником і поверхнями приміщення.

Розв’язання. Визначаємо площі поверхонь підігрівника і стін кімнати:

$$F_1 = 3,14 \cdot 4 \cdot 1 + (3,14 \cdot 1^2 / 4) \cdot 2 = 14,13 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = 8 \cdot 3 \cdot 2 + 4 \cdot 3 \cdot 2 + 8 \cdot 4 \cdot 2 = 136 \text{ м}^2.$$

Тепловий потік визначаємо за рівнянням

$$Q^* = \frac{F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{1/C_1 + (F_1 / F_2)(1/C_2 - 1/C_s)}.$$

$$Q^* = \frac{14,13 \left[\left(\frac{280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{22 + 273}{100} \right)^4 \right]}{1/4,9 + (14,13 / 136)(1/3 - 1/5,77)} = 52 \text{ кВт}.$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв’язати задачі № 2.13–2.17 (розділ 4.3).

Розділ 3. Прикладна теплотехніка

Тема 3.1. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів

Приклад 3.1. Визначити температурний напір теплообмінника, в якому газу охолоджуються водою. Газу охолоджуються від 500 до 200°C, вода нагрівається від 20 до 80°C. Вирішити задачу для прямоточної та протиточної схем руху теплоносіїв.

Рішення. Розрахуємо величину температурного напору.

Для прямоточної схеми руху

$$\begin{array}{ccc} 500^{\circ}\text{C} & \xrightarrow{\text{ГАЗ}} & 200^{\circ}\text{C} \\ 20^{\circ}\text{C} & \xrightarrow{\text{ВОДА}} & 80^{\circ}\text{C} \end{array}$$

визначаємо різниці температур на кінцях теплообмінника:

$$\Delta t_{\theta} = 480^{\circ}\text{C}; \Delta t_{\text{м}} = 120^{\circ}\text{C}.$$

Тоді середній логарифмічний температурний напір дорівнює:

$$\Delta t'_{\text{сер}} = \frac{480 - 120}{\ln \frac{480}{120}} = 260^{\circ}\text{C}.$$

Для протиточної схеми руху

$$\begin{array}{ccc} 500^{\circ}\text{C} & \xrightarrow{\text{ГАЗ}} & 200^{\circ}\text{C}; \\ 80^{\circ}\text{C} & \xleftarrow{\text{ВОДА}} & 20^{\circ}\text{C} \end{array}$$

визначаємо різниці температур на кінцях теплообмінника:

$$\Delta t_{\theta} = 420^{\circ}\text{C}; \Delta t_{\text{м}} = 180^{\circ}\text{C}.$$

Середньологарифмічний температурний напір дорівнює:

$$\Delta t'_{\text{сер}} = \frac{420 - 180}{\ln \frac{420}{180}} = 283^{\circ}\text{C}.$$

Приклад 3.2. Визначити необхідну площу теплообміннику для охолодження 3000 м^3 повітря за 1 годину від 220°C до 20°C . Коефіцієнт теплопередачі складає $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температурний напір теплообмінника дорівнює 390 К .

Розв'язання. Знаходимо фізичні властивості повітря при його середній температурі, яка дорівнює 120°C :

$$\rho = 0,898 \text{ кг/м}^3; \quad \bar{C} = 1,009 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Визначаємо масову витрату повітря:

$$G = V \cdot \rho = 3000 \cdot 0,898 = 2694 \text{ кг/год} = 0,74 \text{ кг/с}.$$

Визначаємо величину теплового потоку:

$$Q^* = G \cdot \bar{C} \cdot (t_{\text{ноч}} - t_{\text{кін}}) = 0,74 \cdot 1,009 \cdot (220 - 20) = 149,3 \text{ кВт}.$$

Необхідна площа теплообмінника для охолодження повітря складає

$$F = \frac{Q^*}{K \cdot \Delta t_{\text{сер}}} = \frac{149300}{25 \cdot 390} = 15 \text{ м}^2.$$

Для закріплення матеріалу теми рекомендується самостійно розв'язати задачі № 3.1–3.3 (розділ 4.3).

Тема 3.2. Газотурбінні установки

Приклад 3.3. Для ідеального циклу поршневого ДВЗ с підводом тепла при $V=\text{const}$ визначити параметри робочого тіла в характерних точках, величину роботи, термічний ККД циклу, кількість підведеної та відведеної теплоти. Робоче тіло – повітря, початкові параметри: $P_1=1$ бар; $t_1=20^\circ\text{C}$. Ступінь стиснення складає 3,6. Ступінь підвищення тиску складає 3,33. Теплоємність повітря прийняти постійною, незалежною від температури.

Розв'язання. Розрахунки проводимо для 1 кг повітря.

Точка 1: $P_1=1$ бар; $t_1=20^\circ\text{C}$. Питомий об'єм визначаємо з рівняння Клапейрона (газову постійну визначаємо за додатком А):

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Точка 2. Питомий об'єм визначаємо із ступеня стиснення:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,84}{3,6} = 0,233 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Перша стадія циклу – адіабатне стиснення. Температура наприкінці адіабатного стиснення визначається зі співвідношення параметрів (показ-

ник адіабати для повітря дорівнює 1,4):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 3,6^{0,4} = 489 \text{ К}; \quad t_2 = 216^\circ \text{С}.$$

Тиск наприкінці адіабатного стиснення визначаємо з рівняння Клапейрона:

$$P_2 = \frac{R \cdot T_2}{v_2} = \frac{287 \cdot 489}{0,233} = 602330 \text{ Па}.$$

Точка 3. Друга стадія циклу – ізохорне підведення теплоти, питомий об'єм $v_3=v_2=0,233 \text{ м}^3/\text{кг}$. Ступінь підвищення тиску при цьому складає 3,33. Зі співвідношення параметрів ізохорного процесу одержуємо:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda = 3,33.$$

Визначаємо тиск та температуру:

$$P_3 = P_2 \cdot \lambda = 602330 \cdot 3,33 = 2005759 \text{ Па};$$

$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = 489 \cdot 3,33 = 1628 \text{ К}; \quad t_3 = 1355^\circ \text{С}.$$

Точка 4. Третя стадія – адіабатне розширення. Питомий об'єм $v_4=v_1=0,84 \text{ м}^3/\text{кг}$ (тому що четверта стадія циклу – ізохорне відведення теплоти). Температуру наприкінці адіабатного розширення визначаємо зі співвідношення параметрів адіабатного процесу:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = 1628 \cdot \left(\frac{0,233}{0,84} \right)^{0,4} = 976 \text{ К}.$$

Тиск наприкінці адіабатного розширення визначаємо з рівняння Клапейрона:

$$P_4 = \frac{R \cdot T_4}{v_4} = \frac{287 \cdot 976}{0,84} = 333467 \text{ Па}.$$

Тиск можна визначити також зі співвідношення параметрів ізохорного процесу:

$$P_4 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 10^5 \cdot \frac{976}{293} = 333467 \text{ Па.}$$

Визначаємо кількість підведеної та відведеної теплоти (теплоємність повітря прийняли постійною, незалежною від температури):

$$q_1 = C_v(T_3 - T_2) = \frac{287}{1,4 - 1}(1628 - 489) = 825 \text{ кДж/кг};$$

$$q_2 = C_v(T_4 - T_1) = \frac{287}{1,4 - 1}(976 - 293) = 495 \text{ кДж/кг};$$

Визначаємо термічний ККД циклу:

$$\eta_t = \frac{825 - 495}{825} = 0,4.$$

Визначаємо роботу циклу:

$$l_u = q_1 - q_2 = 330 \text{ кДж/кг.}$$

Для закріплення матеріалу заняття рекомендується самостійно розв'язати задачі № 3.4–3.8 (розділ 4.3).

4.3 Завдання для самостійного рішення

МОДУЛЬ 1

Розділ 1. Основи технічної термодинаміки

Тема 1.1. Основні параметри робочого тіла

Задача 1.1. Знайти середню теплоємність C_p і C_v в інтервалі температур від $t_1=200^\circ\text{C}$ до $t_2=800^\circ\text{C}$ для азоту, вважаючи, що залежність $C=f(t)$ є лінійною.

Розв'язок: $C_p=1,068 \text{ кДж}\backslash(\text{кг}\cdot\text{K})$, $C_v=0,965 \text{ кДж}\backslash(\text{м}^3\cdot\text{K})$.

Задача 1.2. Генераторний газ має наступний об'ємний склад: $H_2=7\%$, $CH_4=2\%$, $CO=27,6\%$, $CO_2=4,85\%$, $N_2=58,6\%$. Визначити масові частки, молярну масу, газову постійну і густину при 15°C і тиску $0,1 \text{ МПа}$.

Розв'язок: $g(H_2)=0,005$, $g(CH_4)=0,012$, $g(CO)=0,289$, $g(CO_2)=0,079$, $g(N_2)=0,615$, $\mu_{\text{сум}}=26,72$ кг/кмоль, $R_{\text{сум}}=310,8$ Дж/(кг·К), $\rho_{\text{сум}}=1,095$ кг/м³.

Задача 1.3. Газова суміш складається з декількох компонентів, зміст яких у суміші наведено у відсотках за об'ємом r_i в таблиці 15.

Визначити:

- молекулярну масу суміші;
- газову постійну суміші;
- середні мольну, об'ємну і масову теплоємності суміші при постійному тиску в межах температур від t_1 до t_2 .

Таблиця 15 – Вихідні дані задачі 1.3

Перша цифра варіанта	r_i				Друга цифра варіанта	Температура суміші	
	CO ₂	O ₂	N ₂	CO		$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
0	20	5	75	-	0	126	528
1	18	4	78	-	1	366	926
2	14	3	83	-	2	592	1492
3	8	10	82	-	3	818	1217
4	18	-	72	10	4	286	1182
5	12	-	74	14	5	456	813
6	10	-	60	30	6	626	1342
7	24	-	50	26	7	918	1566
8	20	-	52	28	8	742	1643
9	32	-	50	18	9	1342	2143

Тема 1.2. Перший закон термодинаміки

Задача 1.4. Визначити питомий об'єм і густину азоту, якщо надлишковий тиск $P_{\text{над}}=0,2$ ат, температура $t=127^\circ\text{C}$, а барометричний тиск $P_{\text{атм}}=780$ мм рт.ст.

Розв'язок: $\nu=0,96$ м³/кг, $\rho=1,04$ кг/м³.

Задача 1.5. Об'єм вуглекислого газу при $P=5$ ат и $t=120^\circ\text{C}$ складає $V=3$ м³. Привести об'єм газу до нормальних умов.

Розв'язок: $V_n=10,1$ м³.

Задача 1.6. При якій температурі густина азоту (тиск 1,5 МПа) буде дорівнювати 3 кг/м³?

Розв'язок: $t = 1412^\circ\text{C}$.

Задача 1.7. Маса порожнього балона для кисню ємністю 50 л дорівнює 80 кг. Визначити масу балона після заповнення його киснем при температурі $t = 20^{\circ}\text{C}$ до тиску 100 бар.

Розв'язок: $m = 86,57$ кг.

Задача 1.8. У балоні ємністю 80 л знаходиться повітря під тиском 10000 кПа та при температурі 27°C . Після використання частини повітря для пуску двигуна тиск зменшився до 5000 кПа, а температура знизилася до 17°C . Визначити масу використаного повітря.

Розв'язок: $m = 4,5$ кг.

Задача 1.9. Визначити абсолютний тиск у паровому котлі, якщо манометр показує 2,45 бар, а атмосферний тиск за ртутним барометром дорівнює 700 мм рт.ст. при $t = 20^{\circ}\text{C}$.

Розв'язок: $P = 3,38$ бар.

Задача 1.10. Приєднаний до газоходу парового котла тягомір показує розрядження, яке дорівнює 80 мм вод.ст. Визначити абсолютний тиск димових газів, якщо показання барометра при температурі 0°C дорівнює 770 мм рт.ст.

Розв'язок: $P = 101856$ Па.

Задача 1.11. Визначити масу кисню, що міститься в балоні ємністю 60 л, якщо тиск кисню за манометром дорівнює 10,8 бар, а показання ртутного барометра – 745 мм рт.ст. при температурі 25°C .

Розв'язок: $m = 0,91$ кг.

Задача 1.12 До якого тиску за манометром необхідно стиснути суміш, яка містить за об'ємом 18% CO_2 , 12% O_2 , 70%, N_2 , щоб при температурі $t=180^{\circ}\text{C}$ 8 кг цієї суміші займали $V=4$ м³? Атмосферний тиск взяти $P_{\text{ат.м}}=760$ мм рт.ст. при температурі 0°C .

Розв'язок: $P_{\text{над}}=142$ кПа.

Задача 1.13. Для газової суміші складу $r_{\text{CO}_2}=12,3\%$, $r_{\text{O}_2}=7,2\%$, $r_{\text{N}_2}=80,5\%$ знайти кількість теплоти при нагріванні 1 м³ (за нормальних умов) від 200 до 1000°C при $P=\text{const}$ й нелінійній залежності $c = f(t)$.

Розв'язок: $q=1228$ кДж/м³.

Задача 1.14. Газова суміш має наступний масовий склад: $\text{CO}_2=12\%$;

$O_2=8\%$ і $N_2=80\%$. До якого тиску потрібно зжати цю суміш, що знаходиться при нормальних умовах, щоб її густина дорівнювала $1,6 \text{ кг/м}^3$?

Розв'язок: до $P=0,213 \text{ МПа}$.

Задача 1.15. У балоні об'ємом V знаходиться газ під тиском P_1 при температурі t_1 . У результаті додаткового накачування цього ж газу в балон тиск у ньому став P_2 , а температура збільшилась до t_2 . Визначити масу газу в балоні до накачування m_1 і після накачування m_2 , густину газу в першому і другому станах ρ_1 і ρ_2 , а також продуктивність компресора G , якщо для збільшення маси газу від m_1 до m_2 було витрачено час, якій дорівнює τ . При цьому тиск P_1 і P_2 визначався за манометром при атмосферному тиску $P_{атм}=100 \text{ кПа}$. Вихідні дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 16.

Таблиця 16 – Вихідні дані задачі 1.15

Перша цифра шифру	Газ	P_1 , МПа	t_1 , °C	V , м ³	Друга цифра шифру	P_2 , МПа	t_2 , °C	τ , мін
0	Нітроген	0,15	10	0,2	0	0,85	20	20
1	Водень	0,20	20	0,3	1	0,90	25	30
2	Аргон	0,25	30	0,4	2	1,00	37	40
3	Аміак	0,30	40	0,5	3	1,80	48	50
4	Метан	0,05	50	0,6	4	0,30	60	60
5	Етилен	0,10	50	0,7	5	0,70	55	50
6	Повітря	0,15	40	0,8	6	0,80	50	40
7	CO ₂	0,20	30	0,7	7	1,45	37	30
8	CO	0,25	20	0,6	8	2,70	31	20
9	Кисень	0,30	10	0,5	9	2,90	18	10

Тема 1.3. Термодинамічні процеси

Задача 1.16. В калориметричній бомбі ємністю 300 см^3 знаходиться кисень під тиском 26 бар і при температурі 22°C . Визначити температуру кисню після підведення до нього тепла в кількості 1 ккал, вважаючи залежність теплоємності від температури лінійною.

Розв'язок: $t_2 = 593^\circ\text{C}$.

Задача 1.17. Повітря в кількості $0,5 \text{ кг}$ при $P_1 = 5 \text{ бар}$ і $t_1 = 30^\circ\text{C}$ розширюється ізотермічно до п'ятикратного об'єму. Визначити роботу, яку виконує газ, кінцевий тиск і кількість тепла, яка передається газу.

Розв'язок: $P_2 = 1$ бар; $L = Q = 70$ кДж.

Задача 1.18. Робота, яку затрачено на адіабатний стиск 3 кг повітря, дорівнює 471 кДж. Початковий стан повітря характеризується параметрами: $t_1 = 15^\circ\text{C}$; $P_1 = 1$ бар. Визначити кінцеву температуру і зміну внутрішньої енергії.

Розв'язок: $t_2 = 234^\circ\text{C}$; $\Delta U = -471$ кДж.

Задача 1.18. В процесі політропного розширення до повітря підводиться 83,7 кДж тепла. Визначити зміну внутрішньої енергії повітря і виконану роботу, якщо об'єм повітря збільшився у 10 разів, а його тиск зменшився у 8 разів.

Розв'язок: $\Delta U = 16,7$ кДж; $L = 6702$ Дж.

Задача 1.19. Визначити параметри повітря на початку і наприкінці політропного процесу з показником n , якщо відомо, що початковий стан визначається параметрами P_1 і t_1 , а в кінцевому стані температура газу дорівнює t_2 . При цьому маса газу, що бере участь у процесі, дорівнює m . Визначити також зміну внутрішньої енергії, зміну ентальпії, зміну ентропії, теплоту процесу. Залежність теплоємності від температури взяти лінійною. Зобразити процес у довільному масштабі в PV - і TS -координатах. Вихідні дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 17.

Таблиця 17 – Вихідні дані задачі 1.19

Перша цифра шифру	Показник політропи, n	t_1 , $^\circ\text{C}$	t_2 , $^\circ\text{C}$	Друга цифра шифру	P_1 , МПа	m , кг
0	1,22	200	350	0	4,1	12
1	1,25	300	400	1	2,2	5
2	0,85	400	490	2	1,4	8
3	1,31	500	580	3	3,1	15
4	$n=k=1,4$	350	400	4	0,5	9
5	1,33	270	350	5	2,2	6
6	1,09	180	270	6	1,4	7
7	1,35	80	140	7	3,6	16
8	1,22	120	200	8	2,5	21
9	1,20	90	210	9	3,7	13

Задача 1.20. 1 кг газу, зазначеного в таблиці 18, при температурі t_1 і тиску P_1 політропно розширюється (чи стискується) до тиску P_2 з показником політропи n . Визначити:

- а) параметри газу (питомий об'єм, температуру) наприкінці процесу;
- б) роботу, отриману (витрачену) у процесі;
- в) теплоту процесу;
- г) зміну внутрішньої енергії, ентальпії та ентропії газу за процес.

Показати процес на PV - і TS -діаграмах (без дотримання масштабів). Вихідні дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 18.

Таблиця 18 – Вихідні дані задачі 1.20

Перша цифра шифру	Газ	P_1 , МПа	t_1 , °C	Друга цифра шифру	P_2 , МПа	n
0	Метан	0,15	100	0	0,85	1,32
1	Аргон	0,70	20	1	0,90	1,56
2	Водень	2,50	30	2	1,00	0,95
3	Аміак	3,50	40	3	1,80	1,21
4	Кисень	0,95	50	4	0,30	0,89
5	СО	1,10	75	5	0,70	1,62
6	СО ₂	2,15	48	6	0,80	2,31
7	Повітря	5,20	130	7	1,45	1,49
8	Етилен	3,25	90	8	2,70	1,32
9	Нітроген	2,35	110	9	2,90	1,11

Тема 1.4. Реальні гази та їх властивості

Задача 1.21. Перегріта водяна пара з початковим тиском $P_1=0,1$ МПа і початковою температурою $t_1=230^\circ\text{C}$ стискається ізотермічно до ступеня сухості $x_2=0,85$. Визначити параметри пари в початковому і кінцевому станах, кількість відведеної теплоти від пари, зміну внутрішньої енергії і роботу стиску. Зобразити тепловий процес на hs -діаграмі.

Розв'язок: $P_2=0,28$ МПа; $v_1=0,23$ м³/кг; $v_2=0,06$ м³/кг; $h_1=2900$ кДж/кг; $h_2=2530$ кДж/кг; $q=370$ кДж/кг; $\Delta u=-364$ кДж/кг; $l=594$ кДж/кг.

Задача 1.22. До якого тиску має бути зроблене дроселювання перегрітої водяної пари з початковим тиском $P_1=10$ МПа і початковою температурою $t_1=400^\circ\text{C}$, щоб питомий об'єм пари збільшився у 1,5 рази? Визначити зменшення температури при дроселюванні, зміну питомої ентропії 1 кг пари. Зобразити тепловий процес на hs -діаграмі.

Розв'язок: $P_2=7$ МПа; $\Delta t=25$ °C; $\Delta s=0,15$ кДж/кг·K.

Задача 1.23. Тиск пари дорівнює 4 атм., питомий об'єм 0,421 м³/кг. Яким буде питомий об'єм при тому ж тиску, якщо пара буде сухою насиченою? Яким буде тиск пари при тому ж питомому об'ємі, якщо пара буде сухою насиченою?

Розв'язок: $v=0,4708$ м³/кг; $P=0,45$ МПа.

Задача 1.24. Задано параметри водяної пари $P=6$ атм., $s=6$ кДж/кг·К. Визначити стан пари і за допомогою hs -діаграми знайти її параметри.

Розв'язок: $v=0,3$ м³/кг; $t=155$ °С; $h=2425$ кДж/кг.

Задача 1.25. Для водяної пари з параметрами $P=10$ атм. і $t=220$ °С визначити за допомогою hs -діаграми ентальпію, ентропію, питомий об'єм, температуру насичення і ступінь перегріву.

Розв'язок: $v=0,22$ м³/кг; $h=2980$ кДж/кг; $s=7$ кДж/кг·К; $t_n=180$ °С; $\Delta t=40$ °С.

Задача 1.26. 1 кг водяної пари нагрівається при постійному тиску. Початкові параметри пари $P=10$ атм., $x=0,95$. Кінцева температура пари $t=250$ °С. Визначити $h_1, u_1, v_1, t_1, h_2, v_2, q, \Delta u$.

Розв'язок: $h_1=2680$ кДж/кг; $u_1=2490$ кДж/кг; $v_1=0,19$ м³/кг; $t_1=180$ °С; $h_2=2945$ кДж/кг; $v_2=0,23$ м³/кг; $q=265$ кДж/кг; $\Delta u=225$ кДж/кг.

Задача 1.27. Визначити тепло, що йде на перегрів пари в пароперегрівачу котла, якщо до надходження в нього пара має тиск 60 бар і вологість 0,5%, а кінцева температура пари 500°С. Знайти також роботу пари, пов'язану зі збільшенням її об'єму в процесі перегрівання, що протікає при $P=\text{const}$.

Розв'язок: $q=647,5$ кДж/кг; $l=146000$ кДж/кг.

Задача 1.28. Процес відбувається при незмінній 20%-й вологості пари від початкового тиску 1 бар до кінцевого 20 бар. Знайти за величиною і знаком теплоту, зміну внутрішньої енергії і роботу процесу.

Розв'язок: $q=-250,1$ кДж/кг; $\Delta u=173,5$ кДж/кг; $l=-424000$ кДж/кг.

Задача 1.29. Порівняти значення ентропії і ентальпії сухої насиченої пари з тиском $P=50$ бар за hs -діаграмою і паровими таблицями.

Розв'язок: за hs -діаграмою – $h''=2800$ кДж/кг; $s''=5,97$ кДж/(кг·К);
за таблицями – $h''=2795$ кДж/кг; $s''=5,980$ кДж/(кг·К).

Задача 1.30. Робоче тіло – водяна пара, що має в початковому стані тиск P_1 і температуру t_1 . Маса робочого тіла – m кг. Пара розширюється до тиску P_2 . Схематично побудувати процес адіабатичного розширення водяної пари на hs -діаграмі.

Визначити:

- 1) питомий об'єм і ентальпію пари в початковому стані;
- 2) температуру, питомий об'єм, ступінь сухості і ентальпію пари в кінцевому стані;
- 3) значення внутрішньої енергії пари до і після розширення;
- 4) роботу розширення пари в адіабатному процесі.

Вихідні дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 19.

Таблиця 19 – Вихідні дані задачі 1.30

Перша цифра шифру	t_1 , °C	P_1 , МПа	Друга цифра шифру	Маса m , кг	P_2 , МПа
0	300	2	0	5	0,003
1	400	3	1	3	0,004
2	320	4	2	7	0,005
3	370	5	3	8	0,006
4	450	6	4	10	0,007
5	520	7	5	12	0,008
6	500	8	6	16	0,009
7	380	9	7	15	0,010
8	430	10	8	20	0,015
9	530	11	9	25	0,020

Задача 1.31. В ізобарному процесі розширення до 1 кг водяної пари з початковим тиском P_1 і ступенем сухості x підводиться теплота q_1 . Визначити за допомогою hs -діаграми параметри кінцевого стану пари, роботу розширення, зміну внутрішньої енергії, ентальпії і ентропії. Зобразити процес в Pv - і Ts -координатах.

Вихідні дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 20.

Задача 1.32. Водяна пара об'ємом V_1 з тиском P_1 і початковою температурою t_1 розширюється адіабатно до кінцевого тиску P_2 . Визначити параметри кінцевого стану і роботу розширення пари.

Вихідні дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 21.

Таблиця 20 – Вихідні дані задачі 1.31

Перша цифра шифру	x_1	P_1 , МПа	Друга цифра шифру	q_1 , кДж/кг
0	0,85	3,0	0	500
1	0,87	3,5	1	480
2	0,88	4,0	2	460
3	0,90	4,5	3	440
4	0,87	5,0	4	420
5	0,91	6,0	5	400
6	0,92	7,0	6	430
7	0,93	8,0	7	450
8	0,95	9,0	8	470
9	0,98	10,0	9	490

Таблиця 21 – Вихідні дані задачі 1.32

Перша цифра шифру	t_1 , °C	P_1 , МПа	Друга цифра шифру	Об'єм V_1 , м ³	P_2 , кПа
0	350	2,5	0	2	5,00
1	320	2,0	1	4	50,0
2	340	3,6	2	6	10,0
3	550	12,0	3	8	20,0
4	450	5,0	4	10	6,00
5	440	4,0	5	12	3,00
6	500	9,0	6	14	6,00
7	550	15,0	7	16	80,0
8	320	3,0	8	18	30,0
9	600	10,0	9	20	60,0

Тема 1.5. Витікання газів та пари

Задача 1.33. У посудині знаходиться кисень під тиском 50 атм. Газ витікає через звужувальне сопло до середовища з тиском 40 атм. Визначити швидкість витікання і витрати газу, якщо площа вихідного перерізу дорівнює 20 мм². Початкова температура кисню 100 °C.

Розв'язок: $\omega=205$ м/с; $G=0,175$ кг/с.

Задача 1.34. Визначити швидкість витікання і витрату пари через сопло Лавалля для параметрів: $P_1=16$ атм., $P_2=1$ атм., $t_1=300$ °C, $f_{\min}=6$ см². Знайти максимальну площу перерізу $f_{\max}$.

Розв'язок: $\omega=1040$ м/с; $G=1,25$ кг/с; $f_{\max}=19,1$ см².

Задача 1.35. Повітря при тиску $P_1=1$ бар і температурі $t_1 = 15^\circ\text{C}$ витікає з резервуару. Знайти значення P_2 , при якому теоретична швидкість адіабатного витікання буде дорівнювати критичній, і величину цієї швидкості.

Розв'язок: $P_{2\text{кр}} = 0,528$ бар; $\omega_{\text{кр}} = 310$ м/с.

Задача 1.36. Волога пара з параметрами $P_1=18$ бар і $x=0,92$ витікає до середовища з тиском $P_2=12$ бар, площа вихідного перерізу сопла 20 мм². Визначити теоретичну швидкість при адіабатному витіканні пари і його секундну витрату.

Розв'язок: $\omega=380$ м/с; $G=0,05$ кг/с.

Задача 1.37. Парогенератор виробляє 1800 кг/год. пари з тиском $10,8$ бар. Яким повинен бути переріз запобіжного клапана, щоб при раптовому припиненні добору пари тиск не перевищив $10,8$ бар?

Розв'язок: $F_{\min}=321$ мм².

Задача 1.38 Визначити діаметри мінімального і вихідного перерізу сопла для годинної витрати 1000 кг сухої насиченої пари, якщо початковий тиск його $P_1=20,6$ бар, а кінцевий $P_2=1,0$ бар. Процес розширення пари прийняти адіабатним. Визначити також теоретичну швидкість витікання пари із сопла.

Розв'язок: $d_{\min}=11,2$ мм; $d=22,4$ мм; $\omega=1000$ м/с.

Задача 1.39. Визначити теоретичну швидкість витікання водяної пари з сопла, що звужується, та з сопла Лавалю. Початкові тиск і температура пари: P_1 і t_1 (табл. 22). Тиск середовища, до якого відбувається витікання пари, P_2 (див. табл. 22).

Задача 1.40. У резервуарі об'ємом V знаходиться газ під тиском за манометром P_1 і при температурі t_1 . Після того, як з резервуару була випущена частина газу, показання манометра стали P_2 , а температури газу – t_2 . Визначити масу випущеного газу і густину газу, що залишився у резервуарі, якщо тиск зовнішнього середовища $0,1$ МПа. Вихідні дані наведені у таблиці 23.

Таблиця 22 – Вихідні дані задачі 1.39

Перша цифра шифру	t_1 , °C	P_1 , МПа	Друга цифра шифру	P_2 , МПа
0	220	0,8	0	0,005
1	350	1,6	1	0,01
2	375	3	2	0,05
3	390	3,5	3	0,02
4	400	5	4	0,04
5	420	8	5	0,003
6	450	10	6	0,03
7	370	7	7	0,04
8	350	6	8	0,008
9	325	4	9	0,01

Таблиця 23 – Вихідні дані задачі 1.40

Перша цифра шифру	Газ	P_1 , МПа	t_1 , °C	V , м ³	Друга цифра шифру	P_2 , МПа	t_2 , °C
0	Аргон	1,5	60	6,2	0	0,85	45
1	Водень	2,0	70	3,3	1	0,90	65
2	Азот	2,5	80	1,4	2	1,00	67
3	Аміак	3,0	40	0,5	3	1,80	38
4	Етилен	5,5	50	0,6	4	0,30	40
5	Метан	10,0	50	2,7	5	0,70	35
6	Повітря	15,0	90	0,8	6	0,80	55
7	CO ₂	2,6	81	1,7	7	1,45	67
8	Кисень	3,5	65	2,6	8	2,70	51
9	CO	3,6	48	4,5	9	2,90	38

МОДУЛЬ 2

Розділ 2. Теорія теплообміну

Тема 2.1. Теплопровідність

Задача 2.1. Плоска сталева стінка з $\lambda_1=50$ Вт/(м·К) і товщиною $\delta_1=0,02$ м ізолювана від теплових втрат шаром азбестового картону з $\lambda_2=0,15$ Вт/(м·К) і товщиною $\delta_2=0,2$ м, шаром пробки з $\lambda_3=0,045$ Вт/(м·К) і $\delta_3=0,1$ м. Визначити, якої товщини необхідно взяти шар пінобетону з $\lambda=0,08$ Вт/(м·К) замість азбесту і пробки, щоб теплоізоляційні властивості

стілки залишилися без змін.

Розв'язок: $\delta_n=0,28$ м.

Задача 2.2. Сталева труба зі співвідношенням діаметрів $d_1/d_2=200/220$ мм і коефіцієнтом теплопровідності $\lambda=50$ Вт/(м·К) покрита двошаровою ізоляцією. Товщина першого шару $\delta_1=50$ мм, $\lambda_1=0,2$ Вт/(м·К), другого шару – $\delta_2=80$ мм, $\lambda_2=0,1$ Вт/(м·К). Температура внутрішньої поверхні труби 327°C , зовнішнього шару ізоляції – 47°C . Визначити погонний тепловий потік.

Розв'язок: $q=94$ Вт/м.

Задача 2.3. У скільки разів збільшиться термічний опір стінки сталевого змійовика, згорнутого з труби діаметром 38 мм, товщиною 2,5 мм, якщо покрити її шаром емалі? Вважати стінку плоскою. Коефіцієнт теплопровідності емалі $1,05$ Вт/(м·К).

Розв'язок: у 10 разів.

Задача 2.4. Через плоску стінку товщиною δ , довжиною l і площею F (чи через циліндричну стінку з зовнішнім діаметром d_2 , товщиною δ і довжиною l) передається тепловий потік при стаціонарному режимі. Коефіцієнт теплопровідності стінки λ , температура поверхонь стінки t_{cm1} і t_{cm2} . Визначити поверхневу густину теплового потоку q для плоскої стінки чи лінійну густину теплового потоку q_l для циліндричної стінки і тепловий потік Q через стінку. Вихідні дані наведені в таблиці 24.

Таблиця 24 – Вихідні дані задачі 2.4

Перша цифра шифру	стінка	δ , мм	l , м	F , м ²	Друга цифра шифру	d_2 , мм	λ , Вт/(м·К)	t_1 , °C	t_2 , °C
0	плоска	4	5	2,2	0	100	24	90	40
1	циліндр.	5	2	-	1	95	45	98	46
2	циліндр.	3	3	-	2	57	37	67	14
3	плоска	2	4	4,5	3	100	0,9	23	-5
4	плоска	7	6	9,6	4	100	0,7	60	20
5	циліндр.	6	5	-	5	133	55	86	12
6	плоска	9	4	4,8	6	100	50	79	21
7	циліндр.	5	3	-	7	273	0,2	99	-8
8	циліндр.	4	2	-	8	219	0,3	39	-9
9	плоска	6	3	6,5	9	100	18	87	22

Тема 2.2. Теплопередача

Задача 2.5. Плоска стінка з цегли, що розташована у топці, з однієї сторони омивається продуктами згорання палива з температурою $t_1=1300^\circ\text{C}$, а з іншого боку – повітрям приміщення з температурою $t_2=20^\circ\text{C}$. Коефіцієнти тепловіддачі конвекцією дорівнюють відповідно $\alpha_1=150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$, і $\alpha_2=50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$. Коефіцієнт теплопровідності стінки $\lambda=0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$, товщина стінки $\delta=755 \text{ мм}$. Крім тепловіддачі конвекцією з боку продуктів згорання на стінку падає променистий тепловий потік, частина якого $q_{\text{пром}}=10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2$ поглинається поверхнею стінки. Визначити густину теплового потоку, що проходить через стінку.

Розв'язок: $q=1996 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Задача 2.6. Гладка сталева труба повітропідігрівника з внутрішньої сторони омивається димовими газами із середньою температурою 320°C , а ззовні – повітрям, причому повітря нагрівається від 25 до 250°C . Коефіцієнт теплопровідності сталі $58 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$. Визначити: коефіцієнт теплопередачі, віднесений до одного погонного і одного квадратного метра зовнішньої поверхні труби, і кількість тепла, що передана трубою за 1 год., якщо: зовнішній діаметр труби 51 мм ; внутрішній діаметр труби 48 мм ; довжина труби 4 м ; наліт сажі всередині труби $\delta=1 \text{ мм}$, коефіцієнт теплопровідності сталі $0,23 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$.

Розв'язок: $K_u=0,232 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$; $k=9,15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$; $Q=1069 \text{ Вт}$.

Задача 2.7. Трубками радіатора, що має внутрішній діаметр d_1 і довжину l , тече вода. Середня температура на внутрішній стінці трубки дорівнює t_{cm} , середня температура води за довжиною дорівнює t_g . Визначити коефіцієнт тепловіддачі від води до стінок трубки α , загальну кількість тепла, що віддається, якщо відомо, що радіатор містить n паралельно включених трубок, а загальні витрати води дорівнюють G . Вихідні дані для розв'язання задачі вибрати з таблиці 25.

Таблиця 25 – Вихідні дані задачі 2.7

Перша цифра шифру	d_I , мм	$t_{ст}$, °C	$t_в$, °C	Друга цифра шифру	l , м	n , шт.	G , кг/с
0	50	60	20,2	0	0,5	100	2,0
1	20	90	30,3	1	0,9	125	3,0
2	25	85	20,4	2	1,0	110	1,0
3	30	70	30,5	3	1,8	180	0,9
4	35	85	20,6	4	0,8	260	1,0
5	15	55	30,7	5	0,7	155	0,5
6	25	92	20,8	6	0,8	250	1,1
7	20	88	30,7	7	1,4	130	0,3
8	25	78	20,6	8	2,7	230	2,1
9	30	95	30,5	9	2,9	180	1,2

Тема 2.3. Конвекційний теплообмін

Задача 2.8. Визначити коефіцієнт тепловіддачі і тепловий потік під час руху повітря в трубі діаметром 56 мм, довжиною 2 м зі швидкістю 5 м/с, якщо середня температура повітря 120°C, а середня температура стінки труби 100°C.

Розв'язок: $\alpha = 9,14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $Q^* = 135 \text{ Вт}$.

Задача 2.9. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від горизонтальної плити шириною 1 м, довжиною 3 м, якщо поверхня, яка віддає теплоту, повернута донизу, її температура 125°C, а температура повітря вдалині від плити 15°C.

Розв'язок: $\alpha = 4,92 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Задача 2.10. Визначити коефіцієнти тепловіддачі і питомі втрати теплоти з двох горизонтально розташованих паропроводів з діаметрами 200 і 100 мм, якщо температури їх стінок однакові і дорівнюють 310°C, а температура повітря вдалині від паропроводу 26°C.

Розв'язок: $\alpha_1 = 8,24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $q_1 = 2340 \text{ Вт}/\text{м}^2$;

$\alpha_2 = 9,18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $q_2 = 2610 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Задача 2.11. Визначити потужність теплового потоку Q , який передається за рахунок вільної конвекції і випромінювання від поверхні неізолюваного трубопроводу, розташованого вертикально чи горизонтально,

довжиною l з зовнішнім діаметром d . Відомі ступінь чорноти поверхні ϵ , температура поверхні t_{cm} , температура зовнішнього повітря t_n (табл. 26).

Таблиця 26 – Вихідні дані задачі 2.11

Перша цифра шифру	Положення	l , м	d , мм	t_l , °C	Друга цифра шифру	ϵ	t_n , °C
0	вертикальне	15	95	150	0	0,85	20
1	вертикальне	20	57	260	1	0,90	25
2	горизонтальне	25	89	340	2	0,65	37
3	вертикальне	30	76	90	3	0,48	80
4	горизонтальне	5	219	275	4	0,39	60
5	горизонтальне	12	133	198	5	0,75	50
6	вертикальне	14	108	85	6	0,82	25
7	горизонтальне	22	159	75	7	0,45	-7
8	вертикальне	25	38	243	8	0,73	21
9	горизонтальне	30	45	350	9	0,90	28

Задача 2.12. Визначити коефіцієнт тепловіддачі під час вимушеного русу від повітря чи води до поверхні горизонтальної труби, що має діаметр d з боку потоку. Теплоносій рухається із середньою швидкістю ω всередині трубки (чи зовні поперек її під кутом 90°). Прийняти температуру теплоносія рівною t_m , температуру поверхні стінки труби з боку потоку рідини t_{cm} . Вихідні дані наведені в таблиці 27.

Таблиця 27 – Вихідні дані задачі 2.12

Перша цифра шифру	Теплоносій	ω , м/с	Де протікає	Друга цифра шифру	d , мм	t_m , °C	t_{cm} , °C
0	повітря	1,5	всередині	0	85	40	25
1	вода	0,20	зовні	1	95	65	30
2	повітря	2,5	всередині	2	100	97	48
3	повітря	3,8	всередині	3	180	48	70
4	вода	0,5	зовні	4	30	60	20
5	повітря	10	всередині	5	75	55	90
6	вода	0,35	зовні	6	80	70	40
7	вода	0,28	всередині	7	145	48	30
8	повітря	25	зовні	8	170	35	50
9	вода	0,37	всередині	9	90	58	110

Тема 2.4. Теплообмін випромінюванням

Задача 2.13. Сталеву заготовку з початковою температурою 27°C поставили у муфельну піч, температура стінок якої 927°C . Визначити, який тепловий потік сприймається заготовкою (у початковий період) за рахунок променистої енергії, якщо відношення площ поверхонь заготовки і муфельної печі $F_1/F_2=1/30$, а ступені чорноти заготовки і стінок печі відповідно дорівнюють 0,7 і 0,85.

Розв'язок: $q=81750 \text{ Вт/м}^2$.

Задача 2.14. Визначити приведений ступінь чорноти і променистий тепловий потік між двома сталевими паралельно розташованими дисками з центрами на загальній нормалі. Температури поверхонь дисків 300 і 100°C , диски мають однакові діаметри 300 мм , відстань між ними $h=250 \text{ мм}$. Ступінь чорноти дисків $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \approx 0,24$. Як зміняться ці величини при зменшенні відстані між дисками в 5 разів?

Розв'язок: а) $\varepsilon_{np}=0,436$; $Q=31,6 \text{ Вт}$.

б) $\varepsilon_{np}=0,234$; $Q=43,5 \text{ Вт}$.

Задача 2.15. Між двома рівнобіжними поверхнями встановлено екран. Температура поверхонь 367 і 32°C . Ступінь чорноти поверхонь і екрана однаковий і дорівнює 0,83. Визначити густину теплового потоку між поверхнями до і після установки екрана, а також температуру екрана.

Розв'язок: $q_0=6510 \text{ Вт/м}^2$; $q_{ek}=3255 \text{ Вт/м}^2$; $T_{ek}=545 \text{ К}$.

Задача 2.16. Горизонтально розташований циліндричний апарат із зовнішнім діаметром d має температуру зовнішньої поверхні t_c . Температура навколишнього повітря дорівнює t_n . Визначити втрати тепла з 1 м довжини апарата q_l і загальні втрати тепла Q , якщо відомо, що довжина апарата l . Ступінь чорноти зовнішньої стінки апарата взяти $\varepsilon=0,85$. Вихідні дані для рішення задачі вибрати з таблиці 28.

Задача 2.17. Визначити питомий променистий тепловий потік між двома паралельно розташованими плоскими стінками, що мають температури t_1 і t_2 , ступінь чорноти ε_1 і ε_2 , якщо між ними немає екрана. Визначити q при наявності екрана зі ступенем чорноти (по обидва боки) ε_e . Вихідні

дані для розв'язання задачі взяти з таблиці 29.

Таблиця 28 – Вихідні дані задачі 2.16

Перша цифра шифру	$t_c, ^\circ\text{C}$	$d, \text{мм}$	Друга цифра шифру	$t_n, ^\circ\text{C}$	$l, \text{м}$
0	190	500	0	20	2,0
1	200	400	1	25	3,0
2	130	350	2	27	4,0
3	140	600	3	18	2,5
4	250	550	4	20	3,6
5	150	800	5	25	4,5
6	240	750	6	15	4,0
7	180	990	7	17	3,4
8	210	840	8	21	2,8
9	140	670	9	18	3,9

Таблиця 29 – Вихідні дані задачі 2.17

Перша цифра шифру	ϵ_1	ϵ_2	Друга цифра шифру	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	ϵ_e
0	0,82	0,65	0	850	80	0,045
1	0,62	0,53	1	910	95	0,030
2	0,85	0,47	2	400	77	0,040
3	0,58	0,58	3	380	58	0,050
4	0,61	0,62	4	490	60	0,060
5	0,68	0,76	5	700	55	0,055
6	0,70	0,84	6	810	58	0,048
7	0,63	0,7	7	345	75	0,037
8	0,45	0,68	8	570	81	0,055
9	0,78	0,59	9	290	58	0,029

Розділ 3. Прикладна теплотехніка

Тема 3.1. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів

Задача 3.1. Гарячий розчин з температурою 106°C використовується для підігріву холодного розведеного розчину від 15 до 50°C . Концентрова-

ний розчин охолоджується до 60°C. Визначити температурний напір для:
а) прямоточної і б) протиточної схем руху.

Розв'язок: а) $\Delta t = 50,5^\circ\text{C}$; б) $\Delta t = 36,8^\circ\text{C}$.

Задача 3.2. У трубчастому підігрівнику потрібно нагріти за 1 годину 1000 кг розчину з теплоємністю 3,3 кДж/(кг·К). Нагрівання ведеться від 20 до 80°C конденсатом, що надходить у підігрівник при температурі 120°C. Коефіцієнт теплопередачі дорівнює 558 Вт/(м²·К). Порівняти необхідні поверхні нагрівання і знайти годинні витрати конденсату, якщо підігрівник збудовано за прямоточною і протиточною схемами, вважаючи, що теплові витрати відсутні. Кінцева різниця температур у підігрівнику в обох випадках повинна бути 20° С.

Розв'язок: прямоточна схема: $F = 2,01 \text{ м}^2$, $G = 2400 \text{ кг/год.}$;
протиточна схема: $F = 3,46 \text{ м}^2$, $G = 600 \text{ кг/год.}$

Задача 3.3. У кожухотрубному водонагрівачі тече при постійному тиску вода. Визначити необхідну поверхню теплообміну для нагрівання води, що має витрати G , від температури t_{21} до температури t_{22} , якщо відомо, що коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія, що гріє, дорівнює α_1 , а його температура змінюється від t_{11} до t_{12} . Коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до води дорівнює α_2 , трубки мідні товщиною $\delta = 2 \text{ мм}$ і мають коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 392 \text{ Вт/(м·К)}$. Поверхню теплообмінника визначити при прямоточній і протиточній схемах руху теплоносіїв. Вихідні дані для розв'язання задачі вибрати з таблиці 30.

Таблиця 30 – Вихідні дані задачі 3.3

Перша цифра шифру	$t_{11}, ^\circ\text{C}$	$t_{12}, ^\circ\text{C}$	$t_{21}, ^\circ\text{C}$	$t_{22}, ^\circ\text{C}$	Друга цифра шифру	$\alpha_1, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$	$\alpha_2, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$	$G, \text{кг/с}$
0	250	180	20	90	0	155	2000	0,3
1	300	210	15	85	1	290	2500	0,2
2	120	85	30	70	2	110	3700	0,1
3	90	40	5	35	3	180	1800	0,2
4	135	85	40	60	4	300	1650	0,1
5	150	110	12	90	5	570	1550	0,8
6	200	150	40	85	6	820	1050	0,6
7	150	120	30	75	7	145	2030	0,3
8	95	60	5	45	8	170	131	0,4
9	115	75	10	55	9	210	218	0,7

Тема 3.2. Газотурбінні установки

Задача 3.4. Визначити кількість підведеного і відведеного тепла, роботу стиснення, роботу розширення, корисну роботу і ККД циклу попередньої задачі. Порівняти ККД даного циклу з ККД циклу Карно, що протікає у тому ж інтервалі температур. Визначити також потужність, якщо витрати повітря 10 кг/год. Прийняти, що теплоємність є постійною.

Розв'язок: $q_1=1230$ кДж/кг; $q_2=570$ кДж/кг; робота стиснення $l=301$ кДж/кг; робота розширення $l=962$ кДж/кг; $l_u=282000$ кДж/кг; $N=110$ кВт; $t=0,538$; для циклу Карно $\eta_t=0,856$; $\Delta=37\%$.

Задача 3.5. Визначити параметри точок, кількість підведеного і відведеного тепла, ККД, роботу циклу і потужність при витраті повітря 5 кг/с термічного циклу ГТУ з підведенням теплоти при постійному тиску, якщо $P_1=0,93$ бар, $t_1=27^\circ\text{C}$, $v_3/v_2=1,5$, $P_2/P_1=4$, робоче тіло – сухе повітря, теплоємності C_p і C_v прийняти постійними.

Розв'язок: $v_1=0,923$ м³/кг; $P_1=0,93$ бар; $T_1=300$ К; $v_2=0,342$ м³/кг; $P_2=3,73$ бар; $T_2=444$ К; $v_3=0,513$ м³/кг; $P_3=3,73$ бар; $T_3=666$ К; $v_4=1,385$ м³/кг; $P_4=0,95$ бар; $T_4=450$ К; $q_1=223$ кДж/кг; $q_2=151$ кДж/кг; $l_u=72$ кДж/кг; $N=360$ кВт.

Задача 3.6. Для циклу ГТУ з підведенням теплоти при постійному об'ємі визначити параметри точок, кількість підведеного тепла, ККД і потужність при витраті повітря 3 кг/с, якщо $P_1=0,98$ бар, $t_1=20^\circ\text{C}$, $P_2=0,98$ бар, $t_2=20^\circ\text{C}$, $P_2/P_1=3$, робоче тіло – сухе повітря, теплоємності C_p і C_v прийняти постійними, показник адіабати $k=1,4$.

Розв'язок: $P_1=0,98$ бар; $T_1=293$ К; $v_1=0,857$ м³/кг; $P_2=2,94$ бар; $T_2=401$ К; $v_2=0,392$ м³/кг; $P_3=2,94$ бар; $T_3=682$ К; $v_3=0,392$ м³/кг; $P_4=0,98$ бар; $T_4=426$ К; $v_4=1,2$ м³/кг; $q_1=201$ кДж/кг; $\eta_t=0,333$; $N=200$ кВт.

Задача 3.7. Визначити параметри робочого тіла в характерних точках ідеального циклу поршневого двигуна з ізохорно-ізобарним підведенням теплоти (змішаний цикл), якщо відомі тиск P_1 і температура t_1 робочого тіла на початку стиснення. Ступінь стиснення ε , ступінь попереднього

розширення ρ , ступінь підвищення тиску λ задано.

Визначити роботу, одержану від циклу, підведену і відведену теплоту, термічний ККД циклу і зміну ентропії окремих процесів циклу. За робоче тіло прийняти повітря, вважаючи його теплоємність у розрахункових інтервалах температур постійною. Побудувати цей цикл у координатах $P-v$ і $T-s$. Вихідні дані для розв'язання задачі наведені в таблиці 31.

Таблиця 31 – Вихідні дані задачі 3.7

Перша цифра шифру	P_1 , МПа	t_1 , °C	Друга цифра шифру	ε	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)
0	0,8	87	0	7	1	3,2
1	0,9	45	1	13	2,2	1
2	0,85	57	2	15	1,4	1,6
3	1	30	3	6	1	3,1
4	0,95	20	4	12	1,4	1
5	1	47	5	14	1,5	1,4
6	1	15	6	16	1,4	1,6
7	0,8	0	7	13	1,3	1,6
8	1	20	8	12	1,3	1,7
9	0,9	30	9	14	2	1

Задача 3.8. Робоче тіло в циклі Карно – 1 кг сухого повітря. Граничні температури робочого тіла в циклі: найбільша t_1 , найменша t_3 (табл. 32). Граничні тиски робочого тіла в циклі: найбільший P_1 , найменший P_3 (див. табл. 32).

Таблиця 32 – Вихідні дані задачі 3.8

Перша цифра шифру	t_1 , °C	t_3 , °C	Друга цифра шифру	P_1 , кПа	P_3 , кПа
0	200	15	0	2	0,16
1	300	18	1	2,8	0,1
2	250	20	2	3	0,15
3	205	17	3	2,5	0,12
4	270	21	4	4	0,125
5	310	25	5	4,2	0,1
6	260	23	6	3,5	0,11
7	310	19	7	2,5	0,13
8	330	25	8	4,8	0,14
9	270	16	9	3	0,17

Визначити:

- 1) основні параметри робочого тіла в характерних точках циклу;
- 2) кількість теплоти, підведена в циклі;
- 3) кількість теплоти, відведена в циклі;
- 4) корисну роботу, яку виконує робоче тіло за цикл;
- 5) термічний ККД циклу;
- 6) зміну ентропії в ізотермічних процесах циклу.

Побудувати цикл (у масштабі) у координатах $P-v$ і $T-s$.

5 ІНДИВІДУАЛЬНІ РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ

5.1 Загальні вимоги до виконання розрахункових завдань

Для більш глибокого засвоєння матеріалу курсу кожний студент виконує індивідуальні розрахунки згідно з варіантом, який визначає викладач.

Бали за кожну розрахункову роботу складаються з 3 частин:

- оцінка за якість розрахунків та оформлення роботи;
- оцінка за строк виконання роботи;
- оцінка за захист роботи – перевірка рівня засвоєння теоретичного матеріалу за темою.

Захист розрахункових робіт здійснюється на лабораторних або практичних заняттях за допомогою тестів. Приклади тестів наведено на сторінці 109.

Індивідуальні роботи оформлюються на окремих аркушах паперу. Обов'язково вказувати прізвище та групу студента, номер варіанта, який визначається викладачем. При рішенні задач потрібно обґрунтовувати вибір формул для розрахунків. Обов'язково вказувати одиниці вимірювання усіх величин. Строк подання роботи встановлює викладач.

Для полегшення виконання індивідуальних робіт в посібнику наведені приклади рішення задач.

Завдання № 1. Термодинамічні процеси ідеальних газів. Суміші ідеальних газів

Задача 1. Вважаючи теплоємність газів лінійно залежною від температури, визначити:

- параметри газу в початковому та кінцевому стані (P , V , T),
- зміну внутрішньої енергії та ентропії (ΔU , ΔS),
- роботу розширення L ,
- теплоту, яка бере участь у процесі, Q .

Побудувати процес на PV - та TS -діаграмах.

Примітка. При виконанні завдання потрібно використовувати дані додатків А та В.

Вихідні дані наведені в таблиці 33.

Таблиця 33 – Вихідні дані для задачі 1

Перша цифра варіанта	Газ	P_1 , МПа	m , кг	Друга цифра варіанта	Процес	t_1 , °C	t_2 , °C
0	O_2	1	2	0	Ізохорний	2400	400
1	N_2	4	5	1	Ізобарний	2200	300
2	H_2O	2	10	2	Адіабатний	2000	300
3	N_2	3	4	3	Ізохорний	1800	500
4	CO	5	6	4	Ізобарний	1600	400
5	CO_2	6	8	5	Адіабатний	1700	100
6	N_2	8	3	6	Ізохорний	1900	200
7	H_2O	10	12	7	Ізобарний	2100	500
8	O_2	12	7	8	Адіабатний	2300	300
9	CO	7	9	9	Ізохорний	1500	100

Задача 2. Суміш газів складається із n_1 кіломолей азоту та n_2 кіломолей кисню із початковими параметрами $P_1 = 1,0$ МПа та $T_1 = 1000$ К і розширюється до тиску P_2 . Розширення може проходити за ізотермою та адіабатою. Вихідні дані наведені в таблиці 34. Визначити:

- масу суміші $m_{\text{сум}}$,
- початковий об'єм V_1 ,
- роботу розширення L ,
- зміну ентропії ΔS .
- газову постійну суміші $R_{\text{сум}}$,
- кінцеві параметри V_2 та T_2 ,
- теплоту процесу Q ,

Показник адіабати та теплоємності враховувати постійними і незалежними від температури. Побудувати процеси на PV - та TS -діаграмах. При виконанні завдання потрібно використовувати дані додатку А.

Таблиця 34 – Вихідні дані для задачі 2

Перша цифра варіанта	P_2 , МПа	Друга цифра варіанта	n_1	n_2
			кмоль	
0	0,43	0	0,1	0,9
1	0,40	1	0,2	0,8
2	0,35	2	0,3	0,7
3	0,33	3	0,4	0,6
4	0,31	4	0,5	0,5
5	0,47	5	0,6	0,4
6	0,54	6	0,7	0,3
7	0,57	7	0,8	0,2
8	0,62	8	0,9	0,1
9	0,66	9	0,5	0,5

Завдання № 2. hs -Діаграма водяної пари. Дроселювання

Водяна пара має початкові параметри $P_1 = 5$ МПа та $x_1 = 0,9$. Вона нагрівається при постійному тиску до температури t_2 , а потім дроселюється до тиску P_3 . При тиску P_3 пара попадає до сопла Лавалю, де розширюється до тиску $P_4 = 5$ кПа.

Користуючись hs -діаграмою, визначити:

- кількість теплоти, яку необхідно підвести до пари для нагрівання її до температури t_2 ;

- зміну внутрішньої енергії на кожному етапі;

- кінцеву температуру t_3 в процесі дроселювання;

- кінцеві параметри та швидкість на виході із сопла;

- витрату пари при розширенні від P_3 до P_4 .

Усі процеси побудувати на hs -діаграмі.

Вихідні дані наведені в таблиці 35.

Таблиця 35 – Вихідні дані

Перша цифра варіанта	P_3 , МПа	Площа перерізу сопла f_{min} , см ²	Друга цифра варіанта	t_2 , °C
0	1,4	10	0	300
1	1,3	20	1	330
2	1,2	30	2	370
3	1,1	40	3	400
4	1,0	50	4	420
5	0,9	60	5	460
6	0,8	70	6	500
7	0,7	80	7	570
8	0,6	90	8	550
9	0,5	100	9	600

Завдання № 3. Теплопередача

Задача 1. Плоска стальна стінка товщиною δ_1 з теплопровідністю сталі $\lambda_1 = 40$ Вт/(м·К) з однієї сторони омивається газами з коефіцієнтом тепловіддачі α_1 , а з другої сторони стінка ізольована шаром ізоляції товщиною δ_2 з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_2 = 0,15$ Вт/(м·К). Коефіцієнт тепловіддачі від шару ізоляції до повітря α_2 . Задані також температура газу t_2 та повітря t_n . Вихідні дані наведені в таблиці 36. Визначити:

- густину теплового потоку q ,
- температури t_{cm}' , $t_{ш}'$ та t_{cm}'' .

Навести рисунок з позначенням температур.

Таблиця 36 – Вихідні дані для задачі 1

Перша цифра варіанта	δ_2 , мм	α_2 , Вт/(м ² ·К)	t_n , °С	Друга цифра варіанта	δ_1 , мм	α_1 , Вт/(м ² ·К)	t_2 , °С
0	10	5	30	0	5	35	350
1	12	6	25	1	6	45	400
2	14	7	20	2	7	40	370
3	16	8	15	3	8	30	350
4	18	9	10	4	9	35	330
5	20	10	5	5	10	25	300
6	22	9	0	6	6	42	380
7	24	8	-5	7	5	30	320
8	26	6	-10	8	3	34	400
9	28	5	-20	9	4	38	280

Задача 2. Повітря рухається всередині труби при температурі t_n та швидкості w , внутрішній діаметр труби d_1 , товщина стінки труби δ , а теплопровідність стінки $\lambda = 20$ Вт/(м·К). Зовнішня поверхня труби омивається гарячими газами, температура газів t_2 , коефіцієнт тепловіддачі до труби α_2 . Вихідні дані наведені в таблиці 37. Визначити:

- коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до повітря α_1 ,
- тепловий потік на 1 м довжини труби.

При виконанні завдання потрібно використовувати дані додатків **Е** та **Ж**.

Таблиця 37 – Вихідні дані для задачі 2

Перша цифра варіанта	d_1 , мм	δ , мм	t_n , °C	Друга цифра варіанта	t_2 , °C	α_2 , Вт/(м ² ·К)	ω , м/с
0	70	3	150	0	500	20	10
1	80	5	200	1	550	20	9
2	60	4	180	2	600	40	6
3	40	3	100	3	650	50	8
4	20	2	150	4	700	40	10
5	50	3	200	5	750	60	12
6	80	5	250	6	800	50	14
7	60	4	200	7	780	40	16
8	40	3	150	8	740	30	18
9	20	2	100	9	520	20	20

Завдання № 4. Теплообмінне устаткування

Визначити поверхню нагріву рекуперативного газоповітряного теплообмінника при прямоточній та протиточній схемах руху теплоносіїв, якщо об'ємна витрата повітря при нормальних умовах V_n , середній коефіцієнт теплопередачі від продуктів згорання до повітря K , початкові та кінцеві температури продуктів згорання та повітря, відповідно, t_1' , t_1'' , t_2' і t_2'' . Вихідні дані наведені в таблиці 38. Зобразити графіки зміни температур теплоносіїв при прямоточній та протиточній схемах руху. При виконанні завдання потрібно використовувати дані додатка Ж.

Таблиця 38 – Вихідні дані

Перша цифра варіанта	$V_n \cdot 10^{-3}$, м ³ /годину	K , Вт/(м ² ·К)	Друга цифра варіанта	t_1' , °C	t_1'' , °C	t_2' , °C	t_2'' , °C
0	1	18	0	600	400	20	300
1	2	19	1	625	425	15	325
2	3	20	2	650	450	25	350
3	4	21	3	675	475	30	375
4	5	22	4	700	500	10	400
5	6	23	5	725	525	12	425
6	7	24	6	750	550	18	450
7	8	25	7	775	575	28	475
8	9	26	8	800	600	32	500
9	10	27	9	575	375	8	275

5.2 Тести для перевірки рівня підготовки до захисту розрахункових робіт

Завдання № 1

I Доповніть вислів

- 1 В ізобарному процесі теплота дорівнює зміні ...
- 2 В ізохорному процесі теплота дорівнює зміні ...
- 3 Кількість теплоти, яку потрібно витратити для нагріву 1 кг газу на 1°C , називається ...
- 4 Кількість теплоти, яку потрібно витратити для нагріву 1 м^3 газу на 1°C , називається ...
- 5 Робота, яку виконує 1 кг газу при підвищенні його температури на 1°C , називається ...
- 6 Приведена теплота, або відношення кількості теплоти до абсолютної температури, називається ...
- 7 У ... процесі робота завжди дорівнює нулю.
- 8 У ... процесі уся теплота, яка підведена до робочого тіла, витрачається на виконання роботи.
- 9 При нагріванні до однакової температури в ізобарному процесі витрачається теплоти ... у порівнянні з ізохорним процесом.
- 10 Усі ідеальні термодинамічні процеси об'єднує ... процес.

II Запишіть код відповіді, який ви вважаєте правильним

- 11 Площа, яка обмежена на **PV**-діаграмі лінією процесу та крайніми ординатами, еквівалентна:
 - а) зміні внутрішньої енергії;
 - б) теплоті процесу;
 - в) роботі процесу;
 - г) зміні ентропії.
- 12 Площа, яка обмежена на **TS**-діаграмі лінією процесу та крайніми ординатами, еквівалентна:
 - а) зміні внутрішньої енергії;
 - б) теплоті процесу;
 - в) роботі процесу;
 - г) зміні ентропії.

III Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

13 Вказати особливості здійснення ідеальних термодинамічних процесів:

Тип процесу	Умови здійснення
1) Ізохорний	а) $P=\text{const}$
2) Ізобарний	б) $T=\text{const}$
3) Ізотермічний	в) $V=\text{const}$
4) Адіабатний	г) $C=\text{const}$
5) Політропний	д) $S=\text{const}$
6) Ізоентропний	е) $Q=0$

14 Вказати особливості зображення ідеальних термодинамічних процесів на **PV**-діаграмі:

Тип процесу	Зображення на PV -діаграмі
1) Ізохорний	а) Пряма вертикальна лінія
2) Ізобарний	б) Пряма горизонтальна лінія
3) Ізотермічний	в) Рівнобічна гіпербола
4) Адіабатний	г) Нерівнобічна гіпербола
5) Ізоентропний	д) Логарифмічна лінія

15 Вказати особливості зображення ідеальних термодинамічних процесів на **TS**-діаграмі:

Тип процесу	Зображення на TS -діаграмі
1) Ізохорний	а) Пряма вертикальна лінія
2) Ізобарний	б) Пряма горизонтальна лінія
3) Ізотермічний	в) Рівнобічна гіпербола
4) Адіабатний	г) Нерівнобічна гіпербола
5) Ізоентропний	д) Логарифмічна лінія

16 Вказати характер зв'язку між параметрами ідеальних термодинамічних процесів на **TS**-діаграмі:

Тип процесу	Характер зв'язку між параметрами
1) Ізохорний	а) При збільшенні температури тиск збільшується
2) Ізобарний	б) При збільшенні температури тиск зменшується
3) Ізотермічний	в) При збільшенні температури об'єм збільшується
4) Адіабатний	г) При збільшенні температури об'єм зменшується
5) Політропний	д) При збільшенні тиску об'єм збільшується
	е) При збільшенні тиску об'єм зменшується

17 Вказати одиниці вимірювання величин:

Величина	Одиниця вимірювання
1) Газова постійна	а) Дж
2) Питома ентальпія	б) Дж/кг
3) Питома ентропія	в) Дж/К
4) Масова питома теплоємність	г) Дж/(кг·К)
5) Об'ємна питома теплоємність	д) Дж/(м ³ ·К)
6) Питома кількість теплоти	
7) Повна робота процесу	

Завдання № 2

I Доповніть вислів

1 Пара, що знаходиться в термічній рівновазі з водою, яка кипить, називається ...

2 Суха насичена водяна пара, до якої додатково підведена теплота, називається ...

3 Насичена водяна пара, в якій відсутні частини рідкої фази, називається ...

4 Пароутворення, яке здійснюється при будь-якій температурі з вільної поверхні рідини або твердого тіла, називається ...

5 Процес переходу речовини з газоподібного стану до рідкого, називається ...

6 Пароутворення, яке здійснюється як з вільної поверхні рідини, так і по всьому об'єму, називається ...

7 Лінії, які характеризують ізобари та ізотерми, на *hs*-діаграмі в області вологої водяної пари ...

8 Процес переходу речовини із рідкого стану до газоподібного називається ...

II Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

9 Вказати кількість величин, які потрібно знати для характеристики стану робочого тіла:

Робоче тіло	Кількість величин
1) Вода, яка кипить	а) Одна
2) Суха насичена пара	б) Дві
3) Волога водяна пара	в) Три
4) Перегріта водяна пара	

10 Встановити відповідність лінії та областей на *hs*-діаграмі стану водяної пари:

Назва області або лінії	Стан водяної пари
1) Область АКВ	а) Вода
2) Область вище АК	б) Вода, яка кипить
3) Область вище КВ	в) Волога водяна пара
4) Лінія АК	г) Суха водяна пара
5) Лінія КВ	д) Перегріта водяна пара

11 Вказати зображення процесів на *hs*-діаграмі водяної пари:

Процес	Зображення
1) Дроселювання	а) Вертикальна лінія
2) Ізобарне нагрівання	б) Горизонтальна лінія
3) Адіабатне розширення	в) Логарифмічна лінія

12 Скільки і які величини потрібно знати для побудови точки на *hs*-діаграмі водяної пари?

Робоче тіло	Величина
1) Вода, яка кипить	а) Тиск
2) Волога водяна пара	б) Температура
3) Суха водяна пара	в) Питомий об'єм
4) Перегріта: водяна пара	г) Ступень сухості

Завдання № 3

I Доповніть вислів

- 1 Критерій, який характеризує режим руху середовища, називається ...
- 2 Критерій, який характеризує інтенсивність конвективного теплообміну, називається ...
- 3 Критерій, який характеризує інтенсивність вільної (природної) конвекції, називається ...
- 4 Критерій, який характеризує співвідношення товщини динамічного і температурного прикордонних шарів, називається ...
- 5 Критерій, який характеризує співвідношення перепаду тиску до швидкісного напору, називається ...

II Вкажіть усі види вказаного предмета (явища)

- 6 Факторами, які визначають вид критеріального рівняння для розрахунку конвективного теплообміну, являються: ...
- 7 Критеріями, які використовують для опису конвективного теплообміну, являються: ...

III Запишіть коди відповідей, які ви вважаєте правильними

- 9 Величина теплового потоку через стінку при стаціонарному режимі та граничних умовах 3-го роду збільшується:
 - а) при збільшенні товщини стінки;
 - б) при зменшенні товщини стінки;
 - в) при збільшенні коефіцієнта тепловіддачі;
 - г) при зменшенні коефіцієнта тепловіддачі;
 - д) при збільшенні коефіцієнта теплопровідності;
 - е) при зменшенні коефіцієнта теплопровідності.
- 10 Величина теплового потоку через циліндричну стінку при стаціонарному режимі і граничних умовах 1-го роду зменшується:
 - а) при збільшенні товщини стінки;
 - б) при зменшенні товщини стінки;
 - в) при збільшенні коефіцієнта теплопровідності;
 - г) при зменшенні коефіцієнта теплопровідності.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

- 11 Вказати інформацію, яка потрібна для розрахунку критеріїв:

Назва критерію	Інформація
1) Рейнольдса	а) Природа середовища
2) Нуссельта	б) Температура середовища
3) Прандтля	в) Швидкість руху середовища
4) Грасгоффа	г) Розмір поверхні (каналу)
	д) Коефіцієнт тепловіддачі
	е) Температура поверхні (каналу)

12 Вказати фактори, які впливають на величини коефіцієнтів:

Величина	Фактор
1) Коефіцієнт теплопровідності	а) Природа середовища
2) Коефіцієнт тепловіддачі	б) Температура середовища
3) Коефіцієнт теплопередачі	в) Швидкість руху середовища
	г) Товщина стінки
	д) Матеріал стінки

Завдання № 4

I Доповніть вислів

- 1 Величина теплового потоку, яка передається в теплообміннику, зменшується при ... витрати теплоносія.
- 2 Величина теплового напору теплообмінника більше при ... схемі руху теплоносіїв.
- 3 Теплообмінник, в якому теплоносій віддає тепло пристрою, що акумулює, називається ...
- 4 Теплообмінник, в якому один теплоносій віддає тепло іншому теплоносію через роздільну стінку, називається ...
- 5 Теплообмінник, в якому теплообмін здійснюється за рахунок змішування теплоносіїв, називається ...

II Вкажіть усі види вказаного предмета (явища)

- 6 У теплообмінному устаткуванні використовують наступні схеми руху теплоносіїв: ...
- 7 Розрахунки теплообмінного устаткування можуть бути 2 наступних типів: ...

III Запишіть коди відповідей, які ви вважаєте правильними

8 Факторами, від яких залежить величина теплового потоку, котрий передається в теплообміннику, є:

- а) розміри теплообмінника;
- б) матеріал теплообмінника;
- в) швидкість теплоносіїв;
- г) тип теплоносіїв;
- д) температура теплоносіїв;
- е) витрата теплоносіїв.

9 Інформацією, яка потрібна для розрахунку величини площі теплообмінника, є:

- а) розміри теплообмінника;
- б) витрата теплоносія;
- в) матеріал теплообмінника;
- г) температури теплоносіїв;
- д) швидкості теплоносіїв;
- е) схема руху теплоносіїв;
- ж) коефіцієнт теплопередачі.

10 Факторами, від яких залежить величина температурного напору теплообмінника, є:

- а) матеріал стінки теплообмінника;
- б) температура теплоносіїв;
- в) тип теплоносіїв;
- г) витрата теплоносіїв;
- д) схема руху теплоносіїв.

11 Інформацією, яка потрібна для розрахунку величини теплового потоку, є:

- а) тип теплоносія;
- б) масова витрата теплоносія;
- в) об'єм теплоносія;
- г) маса теплоносія;
- д) температури теплоносія;
- е) коефіцієнт теплопередачі.

IV Встановіть відповідність у вигляді комбінації цифр і літер

12 Вказати рівняння для визначення величини

Величина	Рівняння
1) Тепловий баланс	а) $Q^* = \alpha \cdot F \cdot \Delta t_{сер}$
2) Рівняння теплопередачі	б) $G_1 \cdot C_1 (t_1^k - t_1^n) = G_2 \cdot C_2 (t_2^k - t_2^n)$
3) Температурний напір	в) $Q^* = K \cdot F \cdot \Delta t_{сер}$
	г) $\Delta t_{сер} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{lg \Delta t_B / \Delta t_M}$

13 Вказати одиниці вимірювання величин

Величина	Одиниця вимірювання
1) Густина	а) К
2) Тепловий потік	б) Вт
3) Температурний напір	в) кг/с
4) Масова питома теплоємність	г) м ³ /с
5) Об'ємна питома теплоємність	д) кг/ м ³
6) Масова витрата	е) Дж/(кг·К)
7) Об'ємна витрата	ж) Дж/ (м ³ ·К)

6 ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ІСПИТУ

- 1 Робоче тіло, види, параметри. Визначення абсолютного тиску робочого тіла.
- 2 Рівняння Клапейрона. Газова постійна. Суміші ідеальних газів.
- 3 Теплоємність газів: види, залежність від факторів, засоби визначення.
- 4 Внутрішня енергія робочого тіла. Робота розширення газів.
- 5 Перший закон термодинаміки. Ентальпія, її визначення.
- 6 Ентропія. TS -діаграма.
- 7 Другий закон термодинаміки. Кругові термодинамічні процеси.
- 8 Цикл Карно. Поняття термічного ККД.
- 9 Термодинамічні процеси ідеальних газів: ізохорний, ізобарний, ізотермічний, адіабатний, політропний.
- 10 Перший закон термодинаміки для потоку газу.
- 11 Витікання газів через отвори. Основні рівняння витікання газів.
- 12 Вплив профілю каналу на швидкість витікання.
- 13 Дроселювання газів.
- 14 Реальні гази, визначення властивостей.
- 15 Водяна пара: PV -, TS - та hS -діаграми.
- 16 Атмосферне повітря: характеристики, hd -діаграма.
- 17 Теплопередача, основні поняття.
- 18 Теплопровідність. Градієнт температури. Рівняння Фур'є. Закон Фур'є (диференціальне рівняння теплопровідності).
- 19 Теплопровідність при стаціонарному режимі та граничних умовах першого роду.
- 20 Теплопровідність при нестационарному режимі.
- 21 Теплопровідність при стаціонарному режимі та граничних умовах третього роду (теплопередача).
- 22 Основні положення конвективного теплообміну.
- 23 Моделювання конвективного теплообміну. Числа подібності.
- 24 Вимушений теплообмін: при течії в трубах, при обтіканні труби та пучків труб, при обтіканні поверхні.
- 25 Вільний теплообмін.
- 26 Основні положення випромінювання.
- 27 Закони: Планка, Стефана-Больцмана, Кірхгофа та Ламберта.
- 28 Випромінювання газів.
- 29 Розрахунки теплообміну випромінюванням. Складний теплообмін.
- 30 Розрахунки теплообмінного устаткування.
- 31 Стиснення газів. Поршневий компресор.
- 32 Цикли газотурбінних установок (ГТУ): $P=\text{const}$, $V=\text{const}$, методи підвищення ККД ГТУ.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 **Баскаков, А.П.** Теплотехника : учебник для вузов / А.П. Баскаков [и др.] ; под ред. А.П. Баскакова. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоиздат, 1991. – 224 с.
- 2 **Гуржий, А.А.** Теплотехника / А.А.Гуржий, П.И.Огородников. – К. : Издательский дом «Слово», 2003. – 254 с. – ISBN 966-8407-05-9.
- 3 **Дементий, Л.В.** Краткий курс лекций по дисциплине «Теоретические основы теплотехники» / Л.В. Дементий, А.П. Авдеенко. – Краматорск : ДГМА, 2000. – 168 с. – ISBN 5-7763-2051-8.
- 4 **Дементий, Л.В.** Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче / Л.В. Дементий, А.А.Кузнецов, Ю.В. Менафова. – Краматорск : ДГМА, 2002. – 260с. – ISBN 5-7763-2069-0.
- 5 **Драганов, Б.Х.** Теплотехніка / Б.Х. Драганов [та ін.] ; за ред. Б.Х. Драганова. – К. : ІНКОС, 2005. – 504 с. – ISBN 966-8347-23-4.
- 6 **Ерофеев, В.А.** Теплотехника : учебник для вузов / В.А. Ерофеев, П.Д. Семенов, А.С. Пряхин ; под ред. В.А. Ерофеева. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. – 456 с. – ISBN 5-94628-227-1.
- 7 **Кривандин, В.А.** Металлургическая теплотехника. В 2-х томах. Т.1. Теоретические основы : учебник для вузов / В.А. Кривандин [и др.]; под ред. В.А. Кривандина. – М. : Металлургия, 1986. – 424 с.
- 8 **Коновалова, С.А.** Лабораторный практикум по курсам «Теоретические основы теплотехники», «Теплотехника и теплоэнергетика» / С.А. Коновалова, Ю.В. Менафова, А.П. Авдеенко. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 164 с. – ISBN 5-7763-1355-4.
- 9 **Лабай, В.Й.** Тепломасообмін / В.Й. Лабай. – Львів : Тріада Плюс, 2004. – 260 с. – ISBN 5-7763-8829-5.
- 10 **Луканин, В.Н.** Теплотехника : учебник / В.Н.Луканин [и др.] ; под ред. В.Н. Луканина. – 4-е изд., испр. – М. : Высш.шк., 2003. – 671с. – ISBN 5-06-03958-7.
- 11 **Нащокин, В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – М. : Высш. шк., 1986. – 469 с.
- 12 **Шоно, С.А.** Посібник-довідник до лекційних курсів «Теплотехніка та теплоенергетика» і «Теоретичні основи теплотехніки» / С.А. Шоно, Ю.В. Менафова. – Краматорськ : ДДМА, 2001.– 136 с.– ISBN 5-7763-8552-0.

Додаток А

Таблиця А.1 – Фізичні властивості деяких газів

Газ	Хімічна формула	Відносна молекулярна маса, кг/кмоль	Газова постійна, Дж/(кг·К)	Густина газу, кг/м ³
Нітроген	N_2	28	296,8	1,250
Аміак	NH_3	17	488,2	0,771
Ацетилен	C_2H_2	26	320	1,171
Бензол	C_6H_6	78,1	106	-
Бутан	C_4H_{10}	58,1	143	2,673
Водень	H_2	2	4124,3	0,090
Водяна пара	H_2O	18	461,6	0,804
Двоокис азоту	NO_2	46	181	-
Двоокис вуглецю	CO_2	44	189	1,977
Двоокис сірки	SO_2	64,1	130	2,93
Етан	C_2H_6	30,1	277	1,36
Етилен	C_2H_4	28,1	297	1,26
Кисень	O_2	32	259,8	1,429
Метан	CH_4	16	519	0,72
Окис вуглецю	CO	28	296,8	1,250
Повітря	—	28,96	287	1,293
Пропан	C_3H_8	44,1	189	2,02
Пропилен	C_3H_6	42,1	198	1,91
Сірководень	H_2S	34,1	244	1,54
Хлор	Cl_2	70,9	117	3,22
Аргон	Ar	40	208,2	1,784

Додаток Б

*Таблиця Б.1 – Середня масова теплоємність газів при
постійному тиску, кДж/(кг·К)*

<i>t, °C</i>	<i>O₂</i>	<i>N₂</i>	<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂O</i>	<i>SO₂</i>	<i>Повітря</i>
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	0,607	1,0036
100	0,9282	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	0,662	1,0115
300	0,9500	1,0400	1,0538	0,9487	1,9192	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	0,724	1,0387
600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	0,762	1,0710
900	1,0258	1,0982	1,1200	1,1045	2,1097	0,775	1,0815
1000	1,0350	1,1078	1,1304	1,1225	2,1436	0,783	1,0907
1100	1,0434	1,1170	1,1401	1,1384	2,1771	0,791	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,1493	1,1530	2,2106	0,795	1,1082
1300	1,0580	1,1342	1,1577	1,1660	2,2429	-	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	-	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	-	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1995	2,3346	-	1,1380
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,3630	-	1,1443
1800	1,0886	1,1690	1,1924	1,2179	2,3907	-	1,1501
1900	1,0940	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	-	1,1560
2000	1,0990	1,1910	1,2033	1,2334	2,4422	-	1,1610
2100	1,1040	1,1970	1,2080	1,2400	2,4660	-	1,1660
2200	1,1090	1,2010	1,2130	1,2470	2,4900	-	1,1710
2300	1,1140	1,2060	1,2180	1,2530	2,5120	-	1,1760
2400	1,1180	1,2100	1,2220	1,2590	2,5330	-	1,1800
2500	1,1230	1,2140	1,2260	1,2640	2,5540	-	1,1850
2600	1,1270	1,2160	1,2310	1,2710	2,5740	-	1,1890
2700	1,1310	1,2220	1,2350	1,2750	2,5940	-	1,1030
2800	1,1350	1,2260	1,2380	1,2840	2,6120	-	1,1970
2900	1,1390	1,2310	1,2420	1,2880	2,6300	-	1,2010
3000	1,1430	1,2350	1,2450	1,2920	-	-	1,2060

*Таблиця Б.2 – Середня масова теплоємність газів при
постійному об'ємі, кДж/(кг·К)*

<i>t, °C</i>	<i>O₂</i>	<i>N₂</i>	<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂O</i>	<i>SO₂</i>	<i>Повітря</i>
0	0,6548	0,7352	0,7427	0,6259	1,398	0,477	0,7164
100	0,6632	0,7365	0,7448	0,677	1,4114	0,507	0,7193
200	0,6753	0,7394	0,7494	0,7214	1,4323	0,532	0,7243
300	0,6900	0,7448	0,7570	0,7599	1,4574	0,557	0,7319
400	0,7051	0,7524	0,7666	0,7938	1,4863	0,578	0,7415
500	0,7193	0,7616	0,7775	0,8240	1,5160	0,595	0,7519
600	0,7827	0,7716	0,7892	0,8508	1,5474	0,607	0,7624
700	0,7448	0,7821	0,8009	0,8746	1,5805	0,624	0,7733
800	0,7557	0,7926	0,8122	0,8964	1,6140	0,632	0,7842
900	0,7658	0,8030	0,8231	0,9157	1,6483	0,645	0,7942
1000	0,7750	0,8127	0,8336	0,9332	1,6823	0,653	0,8039
1100	0,7834	0,8219	0,8432	0,9496	1,7158	0,662	0,8127
1200	0,7913	0,8307	0,8566	0,9638	1,7488	0,666	0,8215
1300	0,7984	0,8390	0,8608	0,9772	1,7815	-	0,8294
1400	0,8051	0,8470	0,8688	0,9893	1,8129	-	0,8369
1500	0,8114	0,8541	0,8763	1,0006	1,8434	-	0,8441
1600	0,8173	0,8612	0,8830	1,0107	1,8728	-	0,8508
1700	0,8231	0,8675	0,8893	1,0203	1,9016	-	0,8570
1800	0,8286	0,8738	0,8956	1,0291	1,9293	-	0,8633
1900	0,8340	0,8792	0,9014	1,0371	1,9552	-	0,8688
2000	0,8390	0,8940	0,9064	1,0446	1,9804	-	0,8742
2100	0,8440	0,9000	0,9120	1,0520	2,0050	-	0,8790
2200	0,8490	0,9050	0,9160	1,0580	2,0280	-	0,8840
2300	0,8540	0,9090	0,9210	1,0640	2,0500	-	0,8890
2400	0,8580	0,9140	0,9250	1,0700	2,0720	-	0,8930
2500	0,8630	0,9180	0,9290	1,0750	2,0930	-	0,8970
2600	0,8680	0,9200	0,9310	1,0800	2,1130	-	0,9000
2700	0,8720	0,9230	0,9340	1,0840	2,1320	-	0,9030
2800	0,8750	0,9260	0,9360	1,0890	2,1510	-	0,9060
2900	0,8780	0,9290	0,9390	1,0930	2,1680	-	0,9080
3000	0,8810	0,9310	0,9410	1,0970	-	-	0,9110

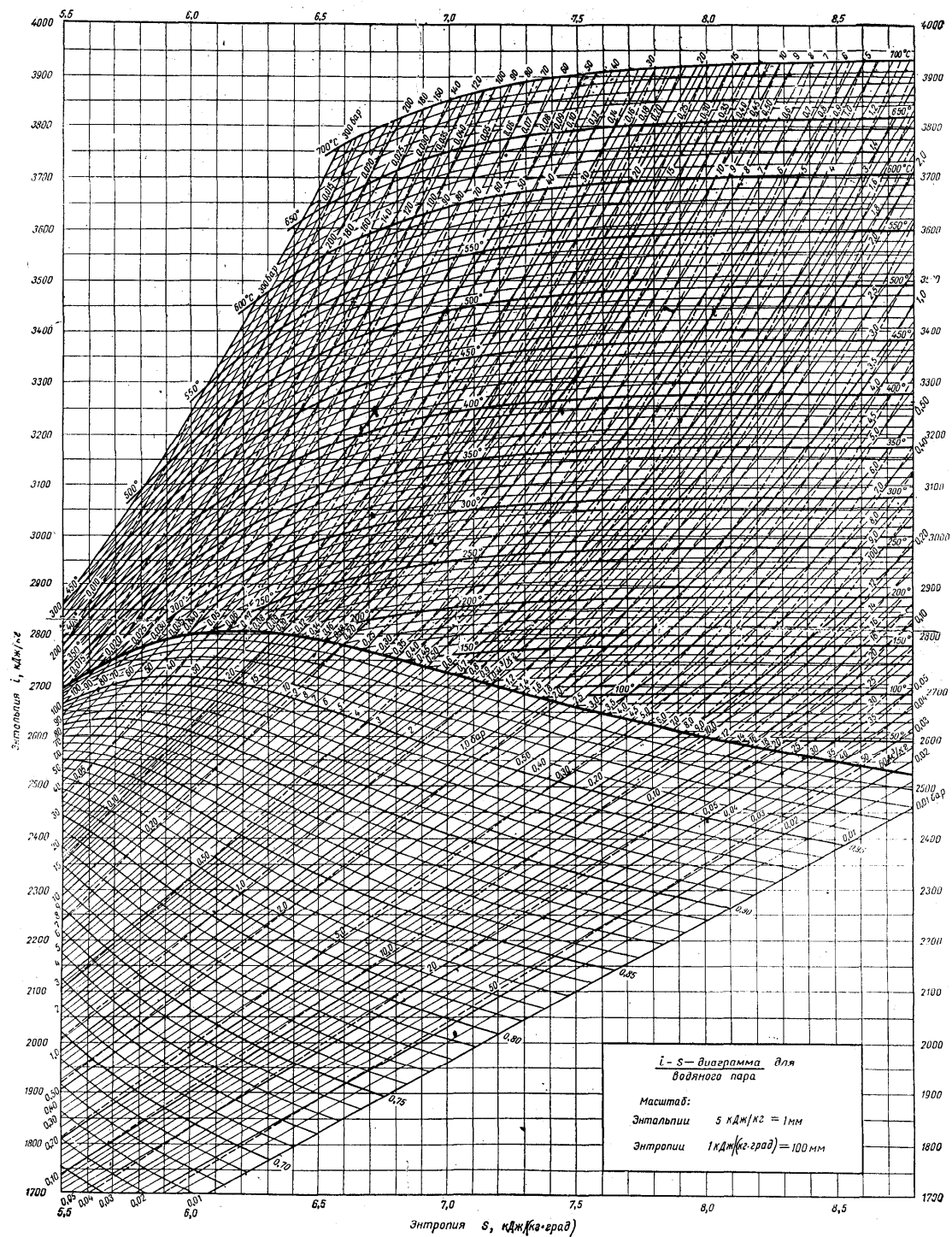
Додаток В

Таблиця В.1 – Інтерполяційні формули для розрахунку середньої масової теплоємності газів

Газ	Масова теплоємність, кДж/(кг·К)
В межах від 0 до 1000°C	
O_2	$C_p = 0,9127 + 0,00012724 t_{сер}$
	$C_v = 0,6527 + 0,00012724 t_{сер}$
N_2	$C_p = 1,0258 + 0,00008382 t_{сер}$
	$C_v = 0,7289 + 0,00008382 t_{сер}$
CO	$C_p = 1,0304 + 0,00009575 t_{сер}$
	$C_v = 0,7335 + 0,00009575 t_{сер}$
<i>Повітря</i>	$C_p = 0,9952 + 0,00009349 t_{сер}$
	$C_v = 0,7084 + 0,00009349 t_{сер}$
H_2O	$C_p = 1,8401 + 0,00029278 t_{сер}$
	$C_v = 1,3783 + 0,00029278 t_{сер}$
SO_2	$C_p = 0,6314 + 0,00015541 t_{сер}$
	$C_v = 0,5016 + 0,00015541 t_{сер}$
В межах від 0 до 1500°C	
H_2	$C_p = 14,2494 + 0,00059574 t_{сер}$
	$C_v = 10,1241 + 0,00059574 t_{сер}$
CO_2	$C_p = 0,8725 + 0,00024053 t_{сер}$
	$C_v = 0,6837 + 0,00024053 t_{сер}$

Додаток Г

hs-Діаграма водяної пари



Зак. 151

Рисунок Г.1 – hs-Діаграма водяної пари

Додаток Д

*Таблиця Д.1 - Суха насичена пара і вода на кривій насичення
(у залежності від температури)*

$t, ^\circ\text{C}$	$P_n, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$h', \text{кДж}/\text{кг}$	$h'', \text{кДж}/\text{кг}$	$r, \text{кДж}/\text{кг}$	$s', \text{кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$	$s'', \text{кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2500,8	2500,8	0	9,1644
10	0,0012271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	0,1511	8,8995
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,9	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03036	125,69	2555,6	2430	0,4367	8,4523
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,256
50	0,012335	0,0010121	12,05	0,08302	209,3	2591,6	2382,3	0,7038	8,0751
60	0,01992	0,0010171	7,678	0,1302	251,12	2609,2	2358	0,8311	7,9084
70	0,03116	0,0010228	5,045	0,1982	292,99	2626,4	2333,3	0,955	7,7544
80	0,4736	0,001029	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	1,1924	7,4785
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
120	0,19854	0,0010603	0,8917	1,122	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734	2144,9	1,7392	6,9304
160	0,618	0,0011021	0,3068	3,259	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
200	1,555	0,0011565	0,1272	7,863	852,4	2793	1940,6	2,3308	6,4318
220	2,3202	0,0011900	0,08606	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
240	3,348	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
280	6,419	0,0013321	0,03013	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049
320	11,28	0,001499	0,01545	64,74	1462	2699,6	1237,6	3,4495	5,5354
330	12,864	0,001562	0,01297	77,09	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
340	14,608	0,001639	0,01078	92,77	1594,8	2621,8	1027	3,6605	5,3361
350	16,537	0,001741	0,008805	113,6	1671,4	2564,6	893	3,7786	5,2117
360	18,674	0,001894	0,006943	144,1	1761,4	2481,1	719,7	3,9163	5,053
370	21,053	0,00222	0,00493	202,4	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951
474	22,087	0,0028	0,00347	288	2031,9	2147	114,7	4,3258	4,5029

*Таблиця Д.2 – Суха насичена пара і вода на кривий насичення
(у залежності від тиску)*

P , МПа	t_n , °C	v' , м³/кг	v'' , м³/кг	ρ , кг/м³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/кг·К	s'' , кДж/кг·К
0,002	17,486	0,001	67,24	0,0149	73,4	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,004	29,95	0,001	34,93	0,0286	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,006	36,17	0,001	23,77	0,0421	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,008	41,53	0,001	18,13	0,0552	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,010	45,82	0,001	14,7	0,0681	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,020	60,08	0,001	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,03	69,12	0,001	5,232	0,1911	289,3	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,001	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,671
0,05	81,33	0,001	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,06	85,94	0,001	2,734	0,3658	359,9	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,08	93,5	0,001	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,10	99,62	0,001	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,12	104,8	0,001	1,43	0,6992	439,34	2683	2243,6	1,361	7,2972
0,16	113,31	0,0011	1,092	0,916	475,41	2696,3	2220,8	1,455	7,2017
0,2	120,23	0,0011	0,886	1,129	504,74	2706,8	2202	1,5306	7,1279
0,3	133,54	0,0011	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
0,4	143,62	0,0011	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,5	151,84	0,0011	0,3749	2,667	640,1	2748,9	2108,7	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
1	179,88	0,0011	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
2	212,36	0,0012	0,0996	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
3	233,83	0,0012	0,0666	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
4	250,33	0,0013	0,0498	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5	263,91	0,0013	0,0394	25,39	1154,2	2793,9	1639,6	2,921	5,9739
6	275,56	0,0013	0,0324	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
7	285,8	0,0014	0,0274	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8	294,98	0,0014	0,0235	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9	303,31	0,0014	0,0205	48,8	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10	310,96	0,0015	0,018	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
11	318,04	0,0015	0,016	62,62	1450,2	2705,2	1255	3,4297	5,5528
12	324,64	0,0015	0,0143	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,493
13	330,81	0,0016	0,0128	78,22	1531,3	2662,3	1131,1	3,5606	5,4333
14	330,63	0,0016	0,0115	87,04	1570,8	2637,9	1067	3,6233	5,3731
16	347,32	0,0017	0,0093	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18	356,96	0,0018	0,0075	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20	365,71	0,002	0,0059	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,928
22	373,7	0,0027	0,0037	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Додаток Е

Таблиця Е.1 – Критеріальні рівняння конвективного теплообміну

Вид теплообміну	Сфера застосування	Критеріальні рівняння
Вимушений рух		
Течія рідини в трубах	$Re < 2000$	$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$
Течія повітря в трубах	$Re < 2000$	$Nu = 0,13 Re^{0,33} Gr^{0,1}$
Течія рідини в трубах	$Re > 10000$	$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$
Течія газу в трубах	$Re > 10000$	$Nu = 0,018 Re^{0,8}$
Поперечне обтікання труби рідиною	$Re < 1000$	$Nu = 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,38} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$
Поперечне обтікання труби повітрям	$Re < 1000$	$Nu = 0,43 Re^{0,5}$
Поперечне обтікання труби рідиною	$Re > 1000$	$Nu = 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$
Поперечне обтікання труби повітрям	$Re > 1000$	$Nu = 0,216 Re^{0,6}$
Обтікання пластини рідиною	$Re < 100000$	$Nu = 0,76 Re^{0,5} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$
Обтікання пластини повітрям	$Re < 100000$	$Nu = 0,66 Re^{0,5}$
Обтікання пластини рідиною	$Re > 100000$	$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$
Обтікання пластини повітрям	$Re > 100000$	$Nu = 0,032 Re^{0,8}$
Природна конвекція		
Природна конвекція	$Gr Pr < 500$	$Nu = 1,18 (Gr Pr)^{0,125}$
Природна конвекція	$500 \leq Gr Pr < 2 \cdot 10^7$	$Nu = 0,54 (Gr Pr)^{0,25}$
Природна конвекція	$Gr Pr \geq 2 \cdot 10^7$	$Nu = 0,135 (Gr Pr)^{0,33}$

Додаток Ж

*Таблиця Ж.1 – Фізичні параметри сухого повітря при тиску
101325 Па*

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, 10^{-2}, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\nu, 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
263	1,342	1,009	2,361	12,43	0,712
273	1,293	1,005	2,442	13,28	0,707
283	1,247	1,005	2,512	14,16	0,705
293	1,205	1,005	2,593	15,06	0,703
303	1,165	1,005	2,675	16,00	0,701
313	1,128	1,005	2,756	16,96	0,699
323	1,093	1,005	2,826	17,95	0,698
333	1,060	1,005	2,896	18,97	0,696
343	1,029	1,009	2,966	20,02	0,694
353	1,000	1,009	3,047	21,09	0,692
373	0,946	1,009	3,210	23,13	0,688
393	0,898	1,009	3,338	25,45	0,686
413	0,854	1,013	3,489	27,80	0,684
433	0,815	1,017	3,640	30,09	0,682
453	0,779	1,021	3,780	32,49	0,681
473	0,746	1,026	3,931	34,85	0,680
573	0,615	1,047	4,606	48,33	0,674
673	0,524	1,068	5,21	63,09	0,678
773	0,456	1,093	5,74	79,38	0,687
873	0,404	1,114	6,22	96,89	0,699
973	0,362	1,135	6,71	115,4	0,706
1073	0,329	1,156	7,18	134,8	0,713
1173	0,301	1,172	7,63	155,1	0,717
1373	0,257	1,198	8,50	199,3	0,722
1473	0,239	1,210	9,15	223,7	0,724

Додаток И

Таблиця К.1 – Фізичні властивості води на лінії насичення

T, K	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, 10^{-2}, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\nu, 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr	$\beta, 10^{-4}, \text{K}^{-1}$
273	999,9	4,212	0,551	1,789	13,67	-0,63
283	999,7	4,191	0,575	1,306	9,52	+0,70
293	998,2	4,183	0,599	1,006	7,02	1,82
303	995,7	4,174	0,618	0,805	5,42	3,21
313	992,2	4,174	0,634	0,659	4,31	3,87
323	988,1	4,174	0,648	0,556	3,54	4,49
333	983,2	4,178	0,659	0,478	2,98	5,11
343	977,8	4,187	0,668	0,415	2,55	5,70
353	971,8	4,195	0,675	0,365	2,21	6,32
363	965,3	4,208	0,680	0,326	1,95	6,95
373	958,4	4,220	0,683	0,295	1,75	7,52
383	951,0	4,233	0,685	0,272	1,60	8,08
393	943,1	4,250	0,686	0,252	1,47	8,64
403	934,8	4,266	0,686	0,233	1,36	9,19
413	926,1	4,287	0,685	0,217	1,26	9,72
433	907,40	4,346	0,683	0,191	1,10	10,7
453	886,9	4,417	0,675	0,173	1,00	11,9
473	863,0	4,505	0,663	0,158	0,93	13,3
493	840,3	4,614	0,645	0,148	0,89	14,8
513	813,6	4,756	0,628	0,141	0,87	16,8
533	784,0	4,949	0,605	0,135	0,87	19,6
553	750,7	5,229	0,575	0,131	0,90	23,7
573	712,5	5,736	0,540	0,128	0,97	29,2
593	667,1	6,473	0,506	0,128	1,11	38,2
613	610,1	8,163	0,457	0,127	1,39	53,4
633	528,0	13,984	0,395	0,126	2,35	109

Навчальне видання

КОНОВАЛОВА Світлана Олексіївна

ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА

З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕПЛОТЕХНІКА»

для спеціальностей ЛВ, ОМТ денної форми навчання

Редактор

О.О.Дудченко

Комп'ютерна верстка

О.П.Ордіна

82/2008. Підп. до друку	Формат 60x84/16
Папір офсетний. Ум. друк.арк	. Обл.-вид.арк. .
Тираж прим.	Зам.№

Видавець і виготівник
«Донбаська державна машинобудівна академія»
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру
серія ДК №1633 від 24.12.2003 р.