

М. М. Чепурний, Н. В. Резидент

НАГНІТАЧІ ТА ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

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

М. М. Чепурний, Н. В. Резидент

НАГНІТАЧІ ТА ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 536.2 (075)
ББК 31.31я73
Ч44

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 7 від 23.02.2012 р.)

Рецензенти :

С. С. Титар, кандидат технічних наук, професор

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

І. І. Пуховий, доктор технічних наук, професор

Чепурний, М. М.

Ч44 Нагнітачі та теплові двигуни : навчальний посібник /
М. М. Чепурний, Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 99 с.

В посібнику розглянуто теоретичні основи з теорії нагнітачів та теплових двигунів, наведено конкретні приклади розв'язування задач, сформовано контрольні запитання і набір задач для самостійної роботи студентів заочної та очної форми навчання.

УДК 536.2(075)
ББК 31.31я73

ЗМІСТ

Передмова.....	4
1 НАГНІТАЛЬНІ МАШИНИ.....	5
1.1 Класифікація нагнітальних машин.....	5
1.2 Лопаткові нагнітачі. Робота лопаткового колеса.....	9
1.3 Основне енергетичне рівняння лопаткових нагнітачів.....	11
1.4 Елементи конструкцій лопаткових нагнітачів.....	12
1.5 Напори насосної установки.....	13
1.6 Потужність насоса (нагнітача).....	15
1.7 Режими роботи нагнітачів і умови подібності режимів.....	16
1.8 Коефіцієнт швидкохідності.....	18
1.9 Теоретичні характеристики лопаткових нагнітачів.....	19
1.10 Характеристика мережі та робоча точка нагнітача.....	20
1.11 Сумісна робота нагнітачів на загальну мережу.....	21
1.12 Явище кавітації в насосах.....	23
1.13 Експлуатація лопаткових насосів.....	25
1.13.1 Пуск насосів.....	25
1.13.2 Регулювання подачі насосів.....	26
1.14 Нестійка робота насосів.....	29
1.15 Струминні насоси.....	30
1.16 Об'ємні нагнітачі.....	32
1.16.1 Поршневі компресори.....	32
1.16.2 Поршневі насоси.....	34
1.17 Приклади розв'язання задач.....	36
Контрольні запитання.....	43
2 ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ.....	45
2.1 Загальні відомості.....	45
2.2 Перетворення енергії на робочих лопатках.....	49
2.3 Втрати в східці та ККД східця турбіни.....	53
2.3.1 Внутрішні втрати.....	53
2.3.2 Зовнішні втрати.....	57
2.4 Приклади розрахунків східців турбін.....	58
2.5 Багатосхідцеві турбіни.....	64
2.6 Класифікація парових турбін.....	65
2.7 Витрата пари на турбіну і потужність турбіни.....	66
2.8 Принципові теплові схеми паротурбінних установок.....	68
2.9 Приклади розрахунків теплових схем паротурбінних установок.....	71
2.10 Газові турбіни і газотурбінні установки.....	77
Контрольні запитання.....	82
Література.....	84
Завдання на СРС.....	85
Додатки.....	89
Українсько-англійський словник найбільш вживаних термінів.....	97

ПЕРЕДМОВА

Даний початковий посібник призначений для студентів заочної та денної форми навчання напряму підготовки теплоенергетика. Він підготовлений відповідно до навчальної програми дисципліни «Нагнітачі та теплові двигуни». В рамках годин, відведених за навчальним планом (32 год лекцій і 16 год практичних занять), автори намагались в стислому вигляді викласти основи теорії нагнітачів (насосів, компресорів, вентиляторів) та теплових двигунів (парових і газових турбін), а також ознайомити з елементами їх конструкцій.

Автори виходили з того, що в процесі навчання важливо отримати навички інженерних розрахунків нагнітальних машин і теплоенергетичних двигунів. Зважаючи на це, в посібнику наведено приклади розрахунків нагнітачів і теплових двигунів. Безумовно, наведені приклади розрахунків не вичерпують всю їх багатоваріантність, але висвітлюють основні принципи та інженерні підходи. Викладений в посібнику матеріал буде корисним в подальших процесах курсового та дипломного проектування.

В посібнику подано необхідний додатковий матеріал, що спрощує роботу з літературними та довідковими джерелами. Він містить набір задач для виконання контрольних робіт студентами заочної форми навчання або виконання самостійної роботи студентами стаціонарного відділення. Автори вдячні рецензентам за поради і зауваження в процесі підготовки рукопису посібника.

1 НАГНІТАЛЬНІ МАШИНИ

1.1 Класифікація нагнітальних машин

Нагнітальними машинами (*pumping machines*) називають пристрої, які призначені для стиску та переміщення рідин і газів. Нагнітачі (НГ) для рідин називають насосами, а для газів – вентиляторами (до тиску 2 – 12 кПа), газодувками (до тиску 15 – 30 кПа), компресорами (до тиску $P > 30$ кПа).

За принципом дії НГ поділяють на струминні, лопаткові, об'ємні. В струминних (ежекторах) використовується енергія струмини рідини або газоподібних речовин. Об'ємні НГ поділяються на поршневі, зубчасті та пластинчасті.

В об'ємних НГ потужність речовині (робочому тілу, *working body*) передається шляхом її безпосереднього стиску робочим органом нагнітача; в лопаткових – внаслідок закручування колесом, що обертається, а в струминних – внаслідок змішування зі струминою активного робочого середовища. У відцентрових (*centrifugal*) НГ робоче тіло РТ в лопатковому колесі переміщується в радіальному напрямку, а в осьових – в осьовому.

Поршневий об'ємний НГ в найпростішому випадку (рис. 1.1) являє

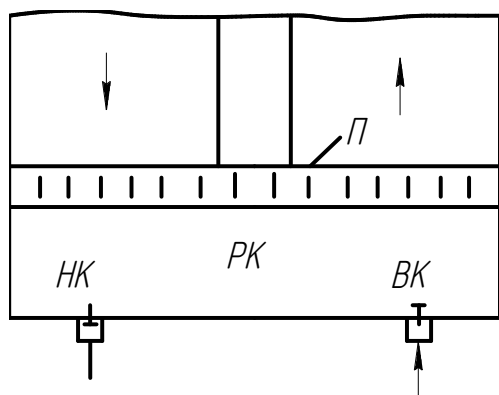


Рисунок 1.1 – Схема поршневого нагнітача

собою розташований в циліндричному корпусі поршень, при русі якого в один бік середовище всмоктується через всмоктувальний клапан ВК і надходить в робочу камеру (РК). В разі зворотного руху поршня РТ стискається і виштовхується із робочої камери через нагнітальний клапан НК.

Позитивними якостями такого НГ є досить високе значення ККД, можливість стиску до високих тисків (*pressure*) P , незалежність подачі (*supply*) від створеного тиску. Недо-

ліками є: громіздкість, труднощі з'єднання з електродвигуном, наявність клапанів, нерівномірність та періодичність подачі, складнощі регулювання.

Шестеренні (*gearing*) нагнітачі (ШН) складаються з пари зчеплених між собою шестерень (рис. 1.2), які розташовані в корпусі з мінімальним зазором між зубцями (*tooth*) і корпусом. Зубці під час обертання захоплюють рідину і переносять її з боку всмоктування в бік нагнітання. Стиск здійснюється в зазорі між зубцями. Такі нагнітачі конструктивно дуже прості та компактні. Їх можна безпосередньо з'єднувати з електродвигуном. Вони призначені для в'язких рідин, мають малу подачу і більш низь-

кий ККД. Це пояснюється втратами в торцевих зазорах і тертям від зчеплення шестерень.

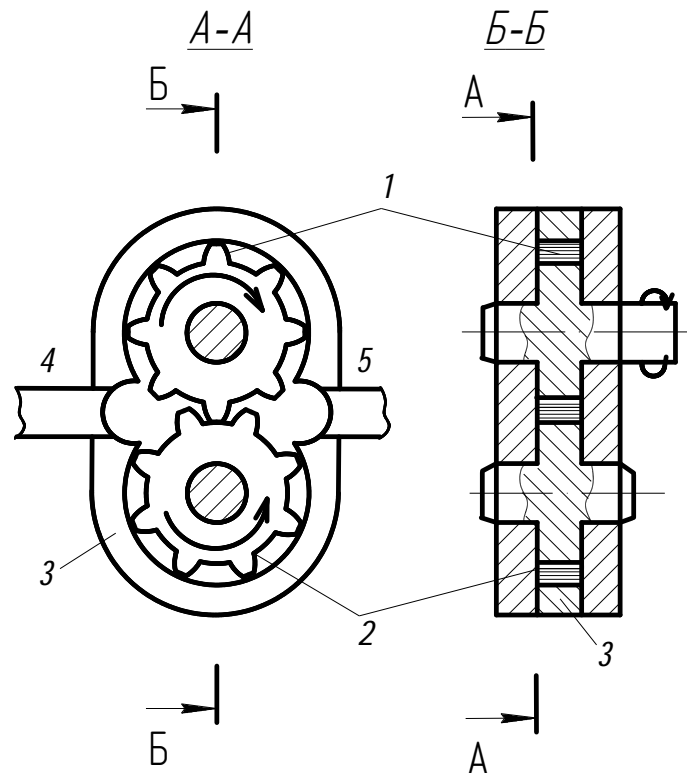


Рисунок 1.2 – Шестеренний насос: 1 і 2 – шестерні; 3 – корпус; 4 і 5 – нагнітальна та всмоктувальна лінія, відповідно

Пластинчасті нагнітачі, або ротаційні (*rotaty*), в найпростішому випадку (рис. 1.3) являють собою циліндричний корпус 1, в якому ексцентрично розташований ротор 2, в пазах якого перебувають пересувні пластини (*plates*) 3. Під час обертання ротора пластини пересуваються в пазах

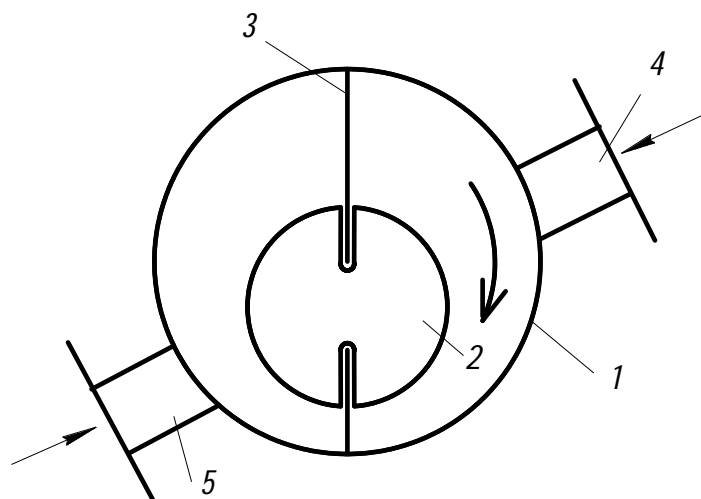


Рисунок 1.3 – Схема пластинчастого нагнітача

(*slot*). Внаслідок зменшення простору між пластинами і стінками корпусу рідина, яка надходить через всмоктувальний патрубок 4, стискається і виштовхується в нагнітальний патрубок 5. Принцип дії на рідину в поршневому і пластинчастому насосі схожий. Але в першому поршень переміщується поступально, а в другому здійснюється більш зручний для привода обертальний рух.

Схема струминного (*streaming*) нагнітача показана на рис. 1.4. Він складається із корпуса 1 з патрубками 2 і 3, сопла 4, камери змішування 5 і дифузора 6. Рідина з великим тиском надходить в сопло 4, де швидкість її зростає а тиск значно зменшується. Це дозволяє через патрубок 3 підсмоктувати іншу рідину або газ. В процесі перемішування струмин виникає обмін кількості руху між частинками середовищ, які мають різні швидкості. Завдяки цьому в кільцевих зазорах між соплом і камерою змішування надходить підсмоктувальне середовище. Тиск суміші підвищується в дифузори. Такі насоси називають також ежекторами (*ejector*), інжекторами (*injector*) та елеваторами (*elevator*).

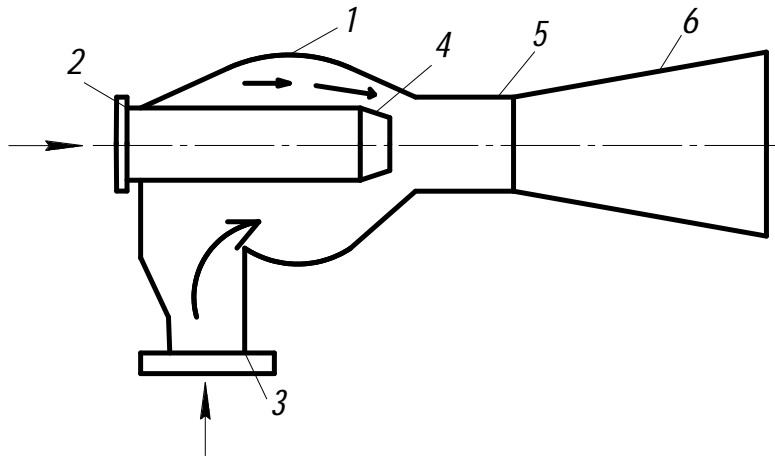


Рисунок 1.4 – Схема струминного нагнітача

Вони дуже прості за конструкцією, але мають низький ККД.

Лопаткові відцентрові (*bladeing centrifugal*) нагнітачі (рис. 1.5)

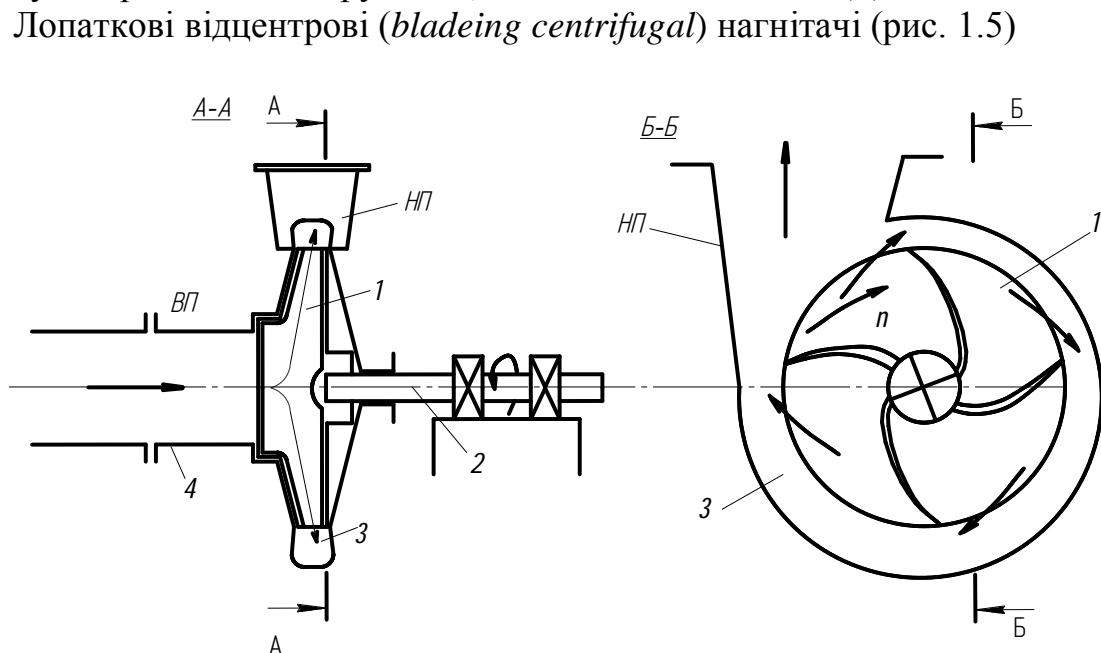


Рисунок 1.5 – Схема відцентрового нагнітача: 1 – колесо, 2 – вал, 3 – передній диск, 4 – задній диск, 5 – лопатки, 6 – підшипники, 7 і 8 – ущільнення, 9 – підвід, 10 – спіральний відвід, 11 – напірний патрубок

являють собою лопаткове колесо 1, яке розташоване в спіральній камері (*spiral chamber*) 3. Під час обертання колеса рідина, яка надходить в осьовому напрямку через всмоктувальну трубку (*suctioning tube*) 4, відхиляється від цього напрямку на 90° і надходить в міжлопаткові канали. Під дією відцентрової сили здійснюється закручування потоку і виштовхування ре-

човини в спіральну камеру 3, де через нагнітальний патрубок НП спрямовується в нагнітальний трубопровід. Відцентрові НГ мають порівняно високий ККД, досить прості за конструкцією. Мають плавну подачу, а їх подача залежить від тиску середовища. Відцентрові НГ використовуються як насоси, так і вентилятори, а також як багатоступеневі компресори.

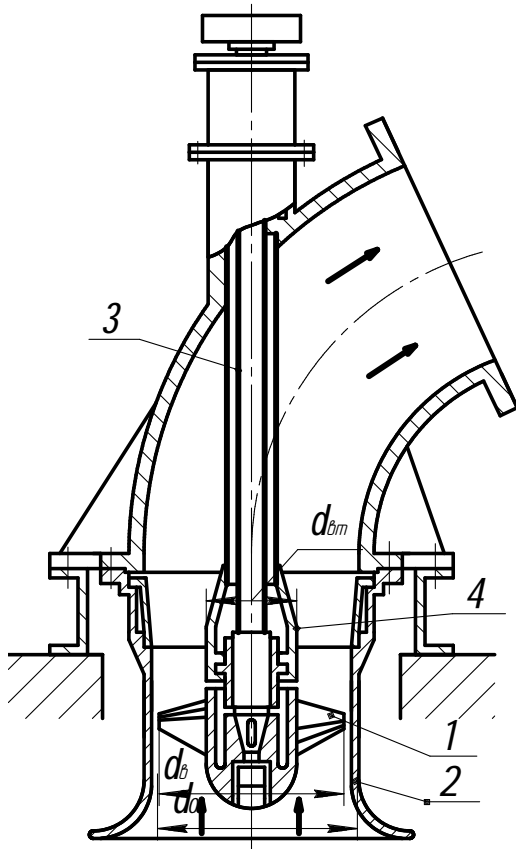


Рисунок 1.6 – Схема осевого нагнітача

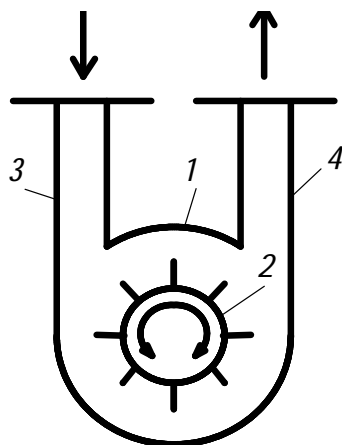


Рисунок 1.7 – Схема вихорового нагнітача

Осьові (*axles*) нагнітачі (рис. 1.6) найпростішого типу мають вигляд лопаткового колеса 1, яке розташоване в циліндричному кожусі 2.

Вертикальний осьовий насос на валі 3 має втулку, на якій кріпиться лопаткове колесо 1. Під час обертання колеса здійснюється рух середовища за віссю обертання. Осьовий нагнітач порівняно з відцентровим може мати більш високий ККД, бути реверсним. Він більш компактний, але створює менший тиск, оскільки в ньому не створюються відцентрові сили. Такі нагнітачі призначені для отримання більш високих подач.

Вихорові (*whirlwinding*) нагнітачі в найпростішому вигляді являють собою лопаткове колесо (рис. 1.7). Яке нагадує відцентрове, але з прямими лопатками. Речовина надходить в корпус 1 по дотичній, переміщується завдяки обертанню робочого колеса 2 і відводиться також по дотичній в нагнітальну лінію 4. Ці нагнітачі відносяться до групи лопаткових. Через відсутність радіального переміщення речовини їх не можна відносити до відцентрових, а через відсутність осьового переміщення – до

мощується завдяки обертанню робочого колеса 2 і відводиться також по дотичній в нагнітальну лінію 4. Ці нагнітачі відносяться до групи лопаткових. Через відсутність радіального переміщення речовини їх не можна відносити до відцентрових, а через відсутність осьового переміщення – до

осьових. Вони конструктивно прості, можуть працювати в реверсному режимі, але мають невеликий ККД.

1.2 Лопаткові нагнітачі. Робота лопаткового колеса

Основною частиною будь-якого лопаткового нагнітача є робоче колесо з лопатками, яке в процесі обертання передає середовищу (рідині або газу) енергію від привода (двигуна). В інших частинах нагнітача (кожусі, напрямних апаратах) величина повного тиску може зменшуватись, хоча статичний тиск, як правило, зростає внаслідок зменшення динамічного тиску. Розглядаємо рух речовини вздовж лопатки робочого колеса нагнітача в міжлопатковому просторі, утвореному двома сусідніми лопатками (рис. 1.8).

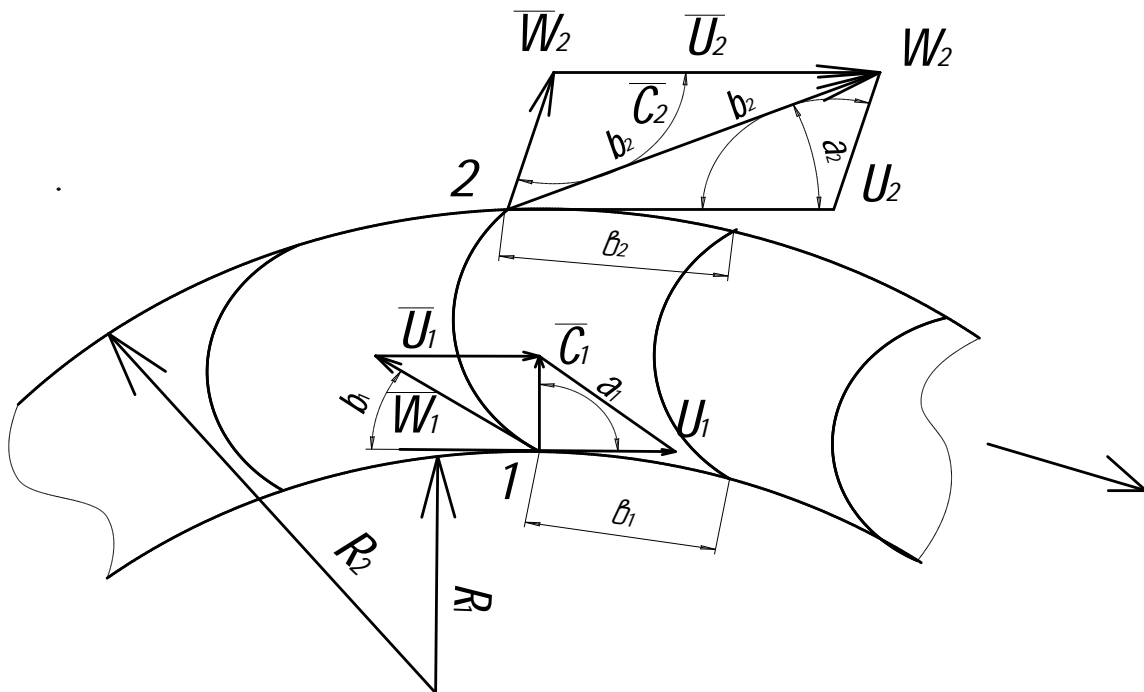


Рисунок 1.8 – Трикутники швидкостей

Речовина на вході в робоче колесо (*wheel*) надходить в радіальному напрямку (*radial direction*) з абсолютною швидкістю (*absolute velocity*) C_1 . В міжлопатковому просторі її рух складний: вона переміщується вздовж профілю лопаток з відносною (*relatively*) швидкістю W і одночасно переміщується по колу з коловою (*circular*) швидкістю U , яка направлена по дотичній в будь-якій точці робочого колеса. Ця швидкість дорівнює [3, 7]

$$U = \pi \cdot D \cdot n / 60, \quad (1.1)$$

де D – діаметр робочого колеса; n – кількість обертів за хвилину.

За умови безударної дії нагнітача відносна швидкість W має бути направлена по дотичній (*tangent*) в будь-якій точці лопатки. Розглянемо особливості руху речовини на вході в робоче колесо та на виході з нього.

Контрольні запитання

1. Поясніть, на які типи поділяються нагнітальні машини (нагнітачі).
2. Поясніть принцип дії лопаткових нагнітачів.
3. Поясніть принцип дії струминного нагнітача.
4. Поясніть суть основного енергетичного рівняння лопаткових нагнітачів.
5. Поясніть, що розуміють під напорами насосної установки.
6. Поясніть, як визначаються втрати напору в нагнітальній та всмоктувальній лініях насоса.
7. Поясніть, як змінюється робота робочого колеса нагнітача від подачі насоса за умови сталої кількості обертів.
8. Поясніть, що розуміють під подібними режимами роботи нагнітачів.
9. Поясніть, як залежать витрата, напір і потужність нагнітачів від числа обертів вала.
10. Поясніть, що розуміють під коефіцієнтом швидкохідності.
11. Поясніть, що розуміють під теоретичними характеристиками лопаткових нагнітачів і як вони залежать від конструкції робочого колеса.
12. Поясніть, як визначається робоча точка нагнітача, який працює на даний трубопровід.
13. Поясніть особливості паралельної роботи нагнітачів на загальну мережу.
14. Поясніть особливості послідовної схеми роботи нагнітачів на загальну мережу.
15. Поясніть, що розуміють під кавітацією та допустимою висотою всмоктування лопаткових насосів.
16. Поясніть схеми пуску насосів.
17. Поясніть принцип дросельного регулювання нагнітача.
18. Поясніть принцип регулювання нагнітача зміною кількості обертів вала.
19. Поясніть принцип дії поршневих компресорів.
20. Поясніть принцип дії поршневих насосів.
21. Поясніть засоби вирівнювання нерівномірності подачі поршневих насосів.

2 ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

2.1 Загальні відомості

Сучасними тепловими двигунами в теплоенергетиці є парові (*steam*) та газові (*gas*) турбіни (*turbine*). Турбіна являє собою ротаційний двигун лопатного типу. Струмина пари (газу) за допомогою напрямних соплових апаратів надходить на криволінійні лопатки, які закріплені на робочому колесі (диску) двигуна. Соплові (*nozzle*) апарати призначені для перетворення потенціальної енергії тиску та теплової енергії робочого тіла на кінетичну енергію потоку. Крім того, вони забезпечують необхідний кут входу потоку на робочі лопатки (*work plate*). Робоче тіло, безударно обті-

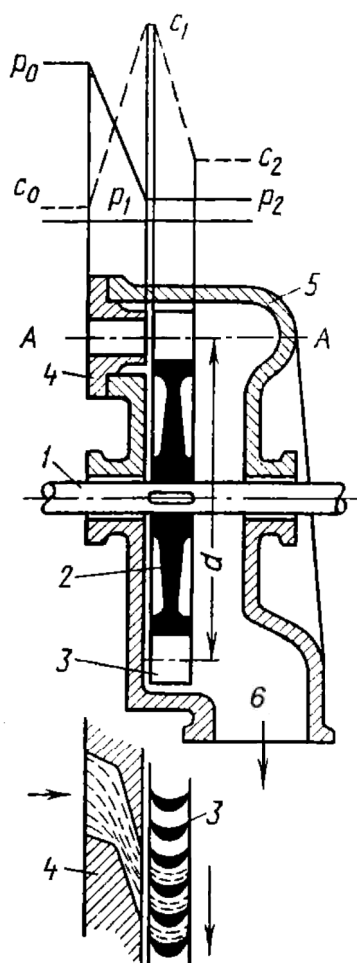


Рисунок 2.1 – Схема східця турбіни:
1 – вал; 2 – диск; 3 – лопатки; 4 – сопла;
5 – корпус; 6 – вихідний патрубок

від C_0 до значення C_1 поза соплами (рис. 2.1)

Турбіни, в яких перетворення енергії (потенціальної на кінетичну) здійснюється тільки в соплах, називаються активними (*active*). Тут тиск на робочих лопатках практично не змінюється. На робочих лопатках швид-

каючи профілі лопаток, змінює вектор швидкості як за модулем, так і за напрямком. Внаслідок цього виникає колова сила, яка створює крутильний момент на валі і ротор турбіни обертається.

Схема односхідцевої турбіни показана на рис. 2.1, де також наведені діаграми зміни тиску P і швидкості потоку C в соплах і на робочих лопатках.

Східцем турбіни називають один ряд соплових апаратів, які закріплені в корпусі (статорі) і одне робоче колесо із закріпленими на ньому робочими лопатками. Шийки вала з робочим колесом лежать в опорних підшипниках, які на рис. 2.1 не показані. Потік робочого тіла надходить в сопла 4, де розширюється від початкового тиску P_0 , до кінцевого тиску P_2 . Зниження тиску супроводжується зменшенням ентальпії, внаслідок чого потенціальна енергія перетворюється на кінетичну (швидкісну) енергію струмини. При цьому абсолютна швидкість потоку зростає

кість струмینی зменшується (зменшується її кінетична енергія), яка перетворюється на механічну роботу обертання вала. Відпрацьоване в сіддці робоче тіло видаляється через випускний патрубок. Турбіни, в яких розширення пари (газу) здійснюється як в соплах, так і на робочих лопатках, називаються реактивними (*jet turbine*).

Не дивлячись на просту будову, односідцеві турбіни не набули поширення внаслідок невеликої потужності (0,5 – 0,8 МВт) та економічності. Тому сучасні турбіни виконують багатосідцевими, які являють собою ряд послідовно розташованих в одному корпусі сіддців. При цьому розрізняють сіддці тиску і сіддці швидкості. На рис. 2.2 зображена схема активної турбіни з трьома сіддцями тиску.

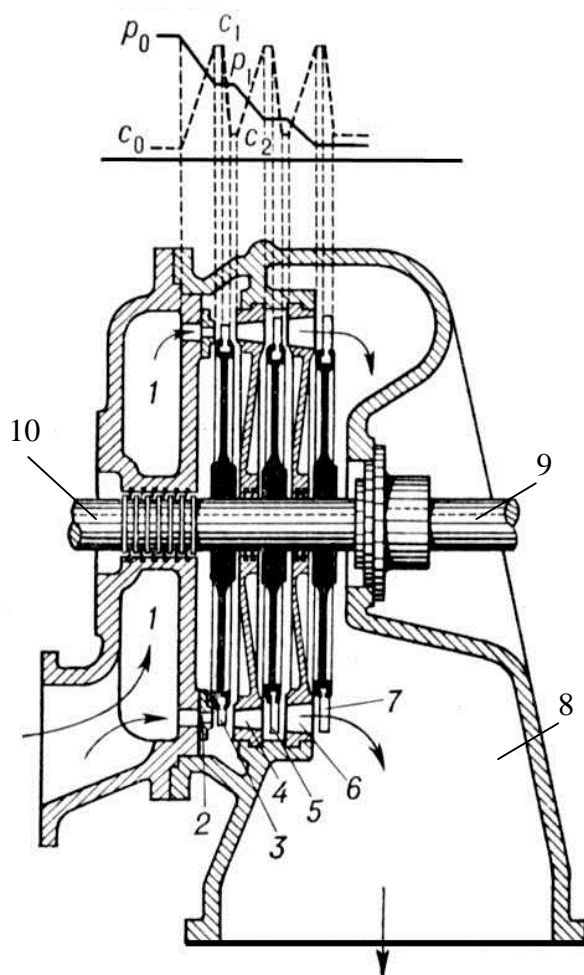


Рисунок 2.2 – Турбіна з трьома сіддцями тиску:
1 – камера робочого тіла; 2, 4, 6 – сопла; 3, 5, 7 – робочі лопатки; 8 – камера відпрацьованого робочого тіла; 9 – вал; 10 – осьові ущільнення

турбіни з трьома сіддцями тиску. Тут також наведені діаграми зміни тиску та швидкості потоку в проточній частині турбіни. В такій турбіні на валі закріплені три колеса з робочими лопатками. Сопла першого сіддця розташовані в корпусі, а сопла другого і третього сіддця – в діафрагмах, які відокремлюють один сіддець від іншого. Для зменшення витоків робочого тіла через зазори та діафрагми змонтовано діафрагмові та осьові ущільнення. В кожному із сіддців відбуваються такі самі перетворення енергії, як і в окремій односідцевій турбіні.

Якщо швидкість потоку за робочими лопатками сіддця велика, то для використання кінетичної енергії установлюють не один, а два ряди робочих лопаток і між ними – додаткові напрямні апарати, в яких робоче тіло

не розширюється, а лише спрямовується на наступне робоче колесо під певним кутом до робочих лопаток. Такі сіддці називаються сіддцями швидкості. На рис. 2.3 схематично показано активну турбіну з двома сіддцями (вінцями) швидкості на одному робочому колесі. На першому та

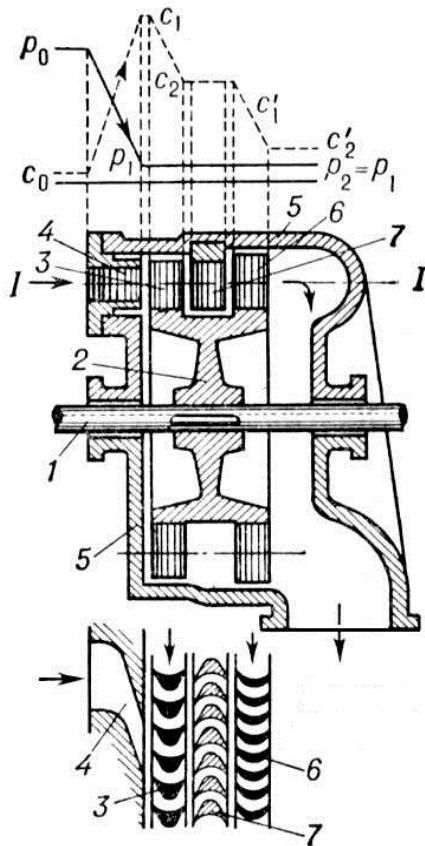


Рисунок 2.3 – Схема східця швидкості:
1 – вал; 2 – диск; 3 – перший ряд робочих лопаток; 4 – сопло; 5 – корпус; 6 – другий ряд робочих лопаток; 7 – напрямні апарати

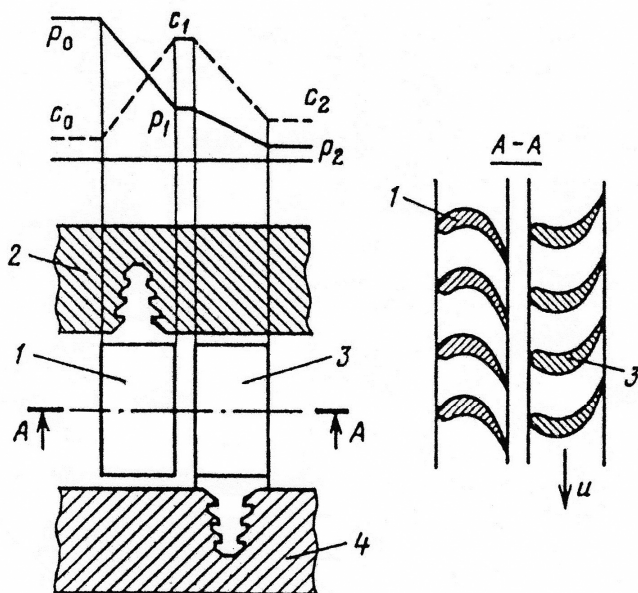


Рисунок 2.4 – Схема реактивного східця:
1 – напрямні апарати; 2 – корпус; 3 – робочі лопатки; 4 – ротор

другому рядях лопаток здійснюється перетворення кінетичної енергії робочого тіла на роботу обертання вала. При цьому його енергія зменшується на першому вінці від C_1 до C_2 , а на другому від C_1' до C_2' . Тиск зменшується від P_0 до P_2 лише в соплових апаратах. В напрямних (*directing*) апаратах тиск теоретично вважається незмінним як і на робочих лопатках. Таку конструкцію односхідцевої турбіни з двома вінцями швидкості запропонував в 1900 р. Кертис. Цей східець отримав назву назву диска (*disk*) Кертиса. Основними перевагами турбін зі східцями швидкостей їх проста конструкція, невелика вартість, компактність, надійність в роботі, а недоліками – невеликий ККД, внаслідок збільшення втрат на тертя на робочих лопатках і в напрямних апаратах. Турбіни цього типу застосовуються переважно для приводів відцентрових насосів, судових генераторів та інших машин невеликої потужності.

Як уже зазначалося раніше, в реактивних турбінах перетворення потенціальної енергії в кінетичну здійснюється як в соплах, так і на робочих лопатках. Схема реактивного східця турбіни наведена на рис. 2.4. Робоче тіло надходить в канали між напрямними апаратами, які нерухомо закріплені в корпусі, та розширюється, але меншою мірою, ніж в соплах активного

східця. Далі розширення робочого тіла здійснюється в каналах, що утворені робочими лопатками, які закріплені на роторі турбіни.

При цьому тиск від значення P_0 зменшується до значення P_2 в усіх міжлопаткових каналах, як рухомих, так і нерухомих. В нерухомих каналах швидкість потоку робочого тіла зростає від значення C_0 до значення C_1 , а в рухомих зменшується від значення C_1 до значення C_2 . В разі багатосхідцевої реактивної турбіни ці процеси повторюються. Схема багатосхідцевої реактивної турбіни показана на рис. 2.5.

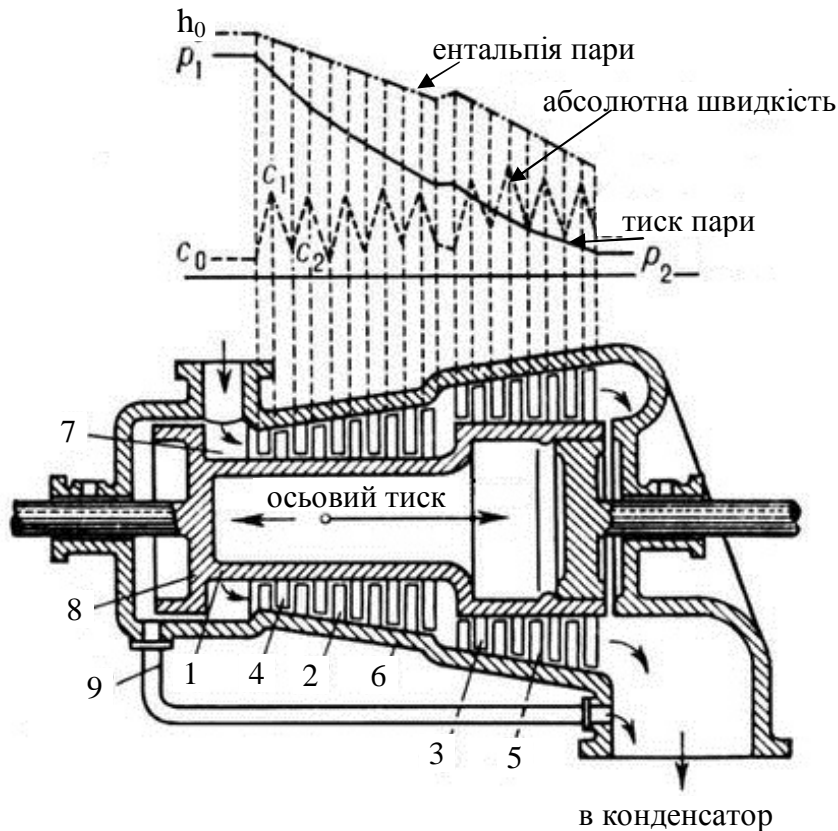


Рисунок 2.5 – Схема багатосхідцевої реактивної турбіни:
1 – барабан ротора; 2 і 3 – робочі лопатки; 4 і 5 – напрямні лопатки; 6 – корпус; 7 – кільцева камера свіжої пари; 8 – розвантажувальний поршень; 9 – з'єднувальний паропровід

особливим пристроєм, який розвантажує вал від дії осевого зусилля, цей пристрій називається розвантажувальним (*unloading*) поршнем 8. Кільцева камера 7 з'єднується за допомогою паропроводу 9 з вихлопним патрубком турбіни, в якому тиск робочого тіла нижчий, ніж в камері справа. Різниця тисків $P_1 - P_x$ діє зліва на всю площину розвантажувального поршня і створює силу R , яка спрямована проти руху робочого тіла і зрівноважує діюче осеве зусилля. Турбіни, які складаються тільки з реактивних східців, не будуються. Перед реактивним східцем установлюють кілька активних східців.

Внаслідок того, що розширення відбувається в напрямних і робочих лопатках, завжди існує різниця (перепад) тисків з обох боків робочої лопатки. Цей перепад тисків створює зусилля в напрямку руху потоку (осеве зусилля), яке намагається зсунути ротор турбіни. Для зменшення цього зусилля ротор реактивних турбін виготовляється у вигляді барабана, в якому закріплюються робочі лопатки. Реактивні тур-

2.2 Перетворення енергії на робочих лопатках

На лопатках активного східця. В активних східцях робоче тіло розширюється тільки в соплах, де потенціальна енергія тиску і тепла енергія перетворюється на кінетичну енергію. Зі зменшенням тиску в процесі розширення зменшується і ентальпія потоку. На робочих лопатках лише здійснюється перетворення кінетичної енергії потоку на механічну роботу. Розглянемо рух робочого тіла в проточній (*flowing*) частині східця (рис. 2.6).

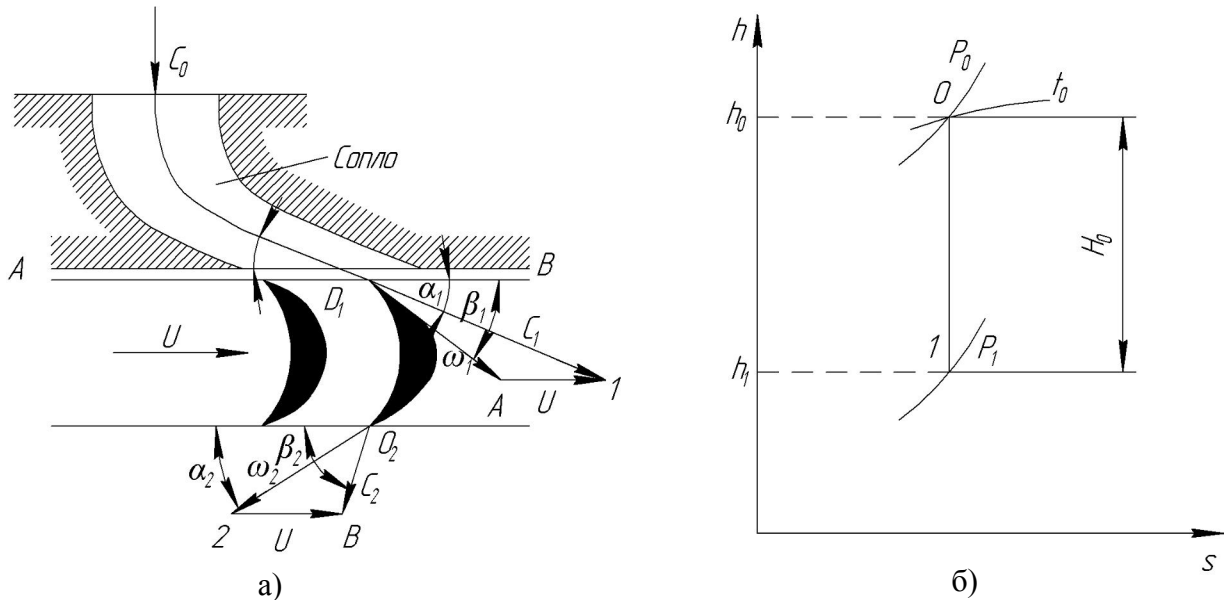


Рисунок 2.6 – Трикутники швидкостей в активному східці (а) і теоретичний процес розширення в соплах (б)

На h - s діаграмі точка 0 відповідає стану робочого тіла на вході в сопла, який характеризується початковими параметрами P_0 , t_0 , h_0 і C_0 . Теоретичний процес розширення в соплах, як відомо з технічної термодинаміки, здійснюється ізоентропно, тобто за умови $S_0 = S_1$ від тиску P_0 до тиску P_1 . При цьому ентальпія робочого тіла зменшується на величину $H_0 = h_0 - h_1$, яка називається теоретичним теплоперепадом. Абсолютна швидкість потоку на виході з сопла визначається за відомою формулою, м/с

$$C_1 = 44,72 \cdot \varphi \sqrt{H_0 + \frac{C_0^2}{2000}}, \quad (2.1)$$

де H_0 вимірюється в кДж/кг; φ – швидкісний коефіцієнт, який враховує зменшення швидкості внаслідок тертя.

Початковою швидкістю C_0 , як правило, нехтують. Струмина, яка витікає із сопла спрямовується на лопатки під певним кутом α_1 . Робочий диск з лопатками має обертатись на валі з коловою швидкістю U , яка дорівнює:

Контрольні запитання

1. Поясніть, що розуміють під східцем турбіни та його будову.
2. Поясніть закономірності зміни тиску і швидкості в активному східці турбіни (діаграми).
3. Поясніть, як будуються трикутники швидкості в активному східці турбіни.
4. Поясніть, що розуміють під східцем швидкості (диском Кертиса), які його переваги та недоліки.
5. Поясніть перетворення енергії в соплах і на лопатках східця турбіни.
6. Поясніть, як визначається робота і потужність на лопатках східця.
7. Поясніть закономірності течії в реактивному східці турбіни.
8. Поясніть, які внутрішні втрати енергії є в східці турбіни та як визначається внутрішній ККД східця.
9. Поясніть, що розуміють під зовнішніми втратами та як визначають ефективний, відносний електричний та абсолютний ККД турбін.
10. Поясніть особливості робочого процесу в багатосхідцевих турбінах.
11. Поясніть, що розуміють під коефіцієнтом повернення теплоти та як визначається внутрішній теплоперепад в турбіні.
12. Поясніть, на які типи поділяються парові турбіни за класифікацією.
13. Поясніть теплову схему конденсаційної турбіни.
14. Поясніть теплову схему теплофікаційної турбіни.
15. Поясніть теплову схему турбін з промисловим відбором пари.
16. Поясніть теплову схему протитискової турбіни.
17. Поясніть, як визначаються витрати пари на турбіні та її потужність.
18. Поясніть, для чого застосовують регенеративний підігрів живильної води в паротурбінних установках.
19. Поясніть принцип дії газотурбінної установки та її схему.
20. Поясніть порядок розрахунків теплової схеми ГТУ.

Література

1. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / Черкасский В. М. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
2. Поляков В. В. Насосы и вентиляторы / В. В. Поляков, Л. С. Скворцов. – М. : Стройиздат, 1990. – 336 с.
3. Шерстюк А. Н. Насосы, вентиляторы, компрессоры / Шерстюк А. Н. – М. : Высшая школа, 1977. – 338 с.
4. Паровые и газовые турбины / под ред. А. Г. Костюна и В. В. Фролова – М. : Энергоатомиздат. 1985. – 316 с.
5. Щегляев А. В. Паровые турбины / Щегляев А. В. – М. : Энергия, 1976. – 328 с.
6. Паровые и газовые турбины. Сборник задач / под ред. Б. М. Трояновского, Г. С. Самойловича. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 235 с.
7. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко – Вінниця : Поділля, 2000. – 353 с.
8. Кривченко Г. И. Гидравлические машины / Кривченко Г. И. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
9. Мандрус В. І. Гідравлічні та аеродинамічні машини / Мандрус В. І. – Львів : Магнолія, 2006 – 2007. – 328 с.

Завдання на СРС

Задача 1. Визначити потужність двигуна для привода відцентрового вентилятора з подачею Q . Барометричний тиск B , температура повітря t . Частота обертання вала ω . Діаметри робочого колеса: D_1 , D_2 . Абсолютні швидкості повітря на вході в робоче колесо та на виході з нього C_1 , C_2 . Поперечний переріз повітропроводу $a \times b$; його довжина l , еквівалентна шорсткість матеріалу K_e . Сумарний коефіцієнт місцевих втрат $\sum \xi$, ККД вентилятора η_v ; ККД електродвигуна $\eta_{ед}$. Дані для розрахунків в таблиці. Кут на вході α_1 , кут на виході α_2 .

№ вар.	Q , м ³ /с	B , мм.рт.ст	t ,°C	ω , рад/с	D_1 ,м	D_2 ,м	C_1 , м/с	C_2 , м/с	$a \times b$, м	l ,м	K_e , мм	$\sum \xi$	η_v	$\eta_{ед}$	α_1	α_2
1	7,6	755	15	125,6	0,62	0,74	28	58	0,8×0,8	18	0,16	9	0,65	0,96	82	22
2	4,5	745	12	106,76	0,47	0,64	22	49	0,6×0,6	17,5	0,14	10	0,64	0,95	77	18
3	5,4	760	16	125,6	0,52	0,68	20	36	0,7×0,7	24	0,13	12	0,66	0,95	84	26
4	6,2	748	17	100,48	0,48	0,62	23	44	0,6×0,6	22	0,15	14	0,65	0,96	78	17
5	6,8	750	14	169,56	0,5	0,7	22	46	0,7×0,7	34	0,125	16	0,645	0,955	80	28
6	5,8	753	10	109,9	0,49	0,69	27	45	0,6×0,6	19,6	0,135	18	0,652	0,95	85	25
7	8,4	747	9	163,28	0,5	0,72	28	49	0,75×0,75	16	0,142	15	0,648	0,96	78	24
8	3,8	756	8	116,78	0,42	0,62	25	48	0,4×0,4	18	0,155	13	0,642	0,96	79	19
9	4,2	748	6	141,3	0,5	0,73	22	50	0,5×0,5	14	0,145	14	0,65	0,96	77	16
10	4,8	746	7	153,86	0,54	0,78	24	48	0,45×0,45	13	0,13	12	0,644	0,95	75	26
11	7,2	743	12	160,14	0,65	0,82	27	50	0,7×0,7	16	0,127	17	0,65	0,96	86	25
12	6,4	744	13	147,58	0,5	0,72	24	48	0,6×0,6	15	0,136	13	0,646	0,957	83	21
13	5,3	741	15	131,88	0,41	0,68	23	44	0,7×0,7	14,8	0,162	17	0,64	0,96	85	20
14	3,6	747	14	163,28	0,38	0,62	27	49	0,5×0,5	17	0,18	15	0,638	0,955	79	18
15	4,6	752	16	113,04	0,46	0,64	25	42	0,5×0,5	19	0,19	14	0,64	0,95	80	18
16	6,6	754	20	106,76	0,6	0,84	23	48	0,7×0,7	22	0,21	15	0,643	0,955	83	17
17	5,5	752	21	147,58	0,54	0,72	22	47	0,7×0,7	24	0,16	16	0,642	0,96	79	24
18	3,9	750	18	113,04	0,38	0,68	23	43	0,5×0,6	18	0,155	15	0,65	0,95	77	23
19	4,4	752	16	128,74	0,46	0,64	24	45	0,4×0,5	22	0,137	14	0,64	0,96	84	19
20	5	738	15	141,3	0,55	0,78	27	51	0,5×0,6	34	0,141	16	0,642	0,95	80	17
21	5,7	741	14	135,02	0,5	0,72	26	49	0,7×0,6	27	0,137	12	0,643	0,96	81	20
22	3,7	750	17	131,88	0,38	0,62	27	48	0,4×0,6	31	0,142	17	0,642	0,954	80	18
23	4,9	748	20	144,44	0,44	0,72	28	48	0,6×0,5	27	0,15	16	0,65	0,954	84	20

Задача 2. Визначити допустиму висоту всмоктування і потужність відцентрового насоса тувальної та нагнітальної лінії d_v , d_n , а їх довжини l_v , l_n , відповідно. Висота всмоктування H_v лінії P_n ; шорсткість труб K_e , сумарні коефіцієнти місцевих втрат в лініях $\sum \xi_{mv}$, $\sum \xi_{mn}$. Температура тродвигуна η_n , $\eta_{ед}$. Визначити також, як зміняться подача, напір і потужність насоса, якщо кі до n_2 . Дані для розрахунків наведені в таблиці. Висота нагнітання H_n .

№ вар.	Q, м ³ /год	d_v , мм	d_n , мм	l_v , м	l_n , м	H_v , м	H_n , м	P_n , МПа	K_e , мм	$\sum \xi_v$	$\sum \xi_n$	t , °
1	48	108/102	88/85	13	1400	5,2	42	0,14	0,15	22	50	20
2	24	52/48	52/48	10	1250	5,6	36	0,16	0,14	20	46	30
3	36	79/76	79/76	12	1300	5,8	48	0,15	0,13	24	38	24
4	52	110/106	98/95	11	1380	5,4	52	0,12	0,145	21	47	27
5	28	60/57	60/57	14	1420	5,6	45	0,13	0,16	23	49	20
6	42	86/82	78/75	15	1560	5,9	50	0,145	0,17	21	52	28
7	18	56/52	52/48	12	1480	6	38	0,125	0,175	20	46	33
8	32	62/58	58/55	16	1340	5,4	29	0,16	0,18	18	38	30
9	50	100/96	96/92	9	1410	5,8	52	0,125	0,185	20	42	28
10	44	92/88	92/88	11,5	1390	5,7	49	0,14	0,19	18	44	20
11	19,6	54/50	62/58	12,5	1280	5,8	50	0,13	0,2	19	48	25
12	14,6	48/44	48/44	10,2	1310	5,7	44	0,14	0,12	20	38	24
13	34	70/67	68/62	11,8	1400	5,9	54	0,15	0,16	17	41	27
14	27	56/52	56/52	12,2	1320	5,5	39	0,133	0,17	14	47	28
15	33	66/62	68/64	14	1280	5,75	48	0,14	0,14	22	30	32
16	22	48/44	46/42	13	1350	5,8	50	0,15	0,15	24	42	34
17	16,8	44/40	48/44	12	1800	6,0	48	0,145	0,17	19	47	35
18	19,6	50/48	50/46	11,6	1530	5,8	39	0,13	0,18	21	38	33
19	26	60/57	60/57	12	1310	5,5	54	0,16	0,19	22	48	30
20	32	70/67	66/62	14	1280	5,65	38	0,12	0,2	18	29	32
21	42	79/75	79/75	13,2	1410	6,2	47	0,13	0,155	20	46	30

Задача 3. Паротурбінна установка (ПТУ) з електричною потужністю N і початковими параметрами паропостачальника промисловим споживачам з тиском P_1 і в систему теплофікації. Потужність промислових споживачів становить частину річної потужності ПТУ, а витрата пари на підігрівник мережної води системи теплофікації становить частину витрати пари в конденсатор. Параметри пари в конденсаторі: P_k , t_k , x_k , а величина питомої втрати теплоти – q_k . Живильна вода підігрівника – 2 конденсат із конденсатора підігрівається до температури $t_{рп}$. Живильна вода підігрівника – 2 конденсат із конденсатора повертається з температурою $95\text{ }^\circ\text{C}$. Відносний внутрішній ККД турбіни становить $0,958$. Визначити витрату умовного палива на виробництво одиниці енергії, якщо $\eta_{пг} = 0,7$ і $0,8$, відношення витрати умовного палива до витрати умовного палива на насоса $40,8$ м. в. ст. Дані для заданого варіанта вибрати в таблиці даних.

№ варіанта	N , МВт	P_0 , МПа	t_0 , $^\circ\text{C}$	P_k , МПа	t_k , $^\circ\text{C}$	x_k	q_k , кВт·год	$t_{рп}$, $^\circ\text{C}$	$t_{жв}$, $^\circ\text{C}$	$\eta_{пг}$
1	12	5	510		29		0,595	60	155	
2	25	9		4		0,89		65	135	
3	40		500		29			50	125	
4	50	8		5			0,6	70	150	
5	60		475		33		0,605	75	130	
6	70	4	440		34			68	150	
7	10	5		4		0,9		55	142	
8	12		490		33		0,615	58	153	
9	25	9		3,5		0,88		72	125	
10	80	10	540		29			63	150	
11	60	3,5	435	4,5			0,585	72	140	
12	40		470	4		0,89		70	128	
13	24	11	540		30			58	133	
14	50	12			29	0,88		60	140	
15	40	13	550	5,5			0,61	78	150	
16	60	9	520		33			58	145	
17	100		540	5		0,9		75	128	
18	25	8			34		0,59	70	150	
19	12	5	490	4,5				66	152	

Задача 4. Виконати розрахунок газотурбінної установки та визначити витрату умовного компресора 0,85; ККД газової турбіни 0,87; ККД камери згорання 0,98; електромеханічний ККД $\eta_{em} = 0,98$; $P_3 = 0,98P_2$; $P_4 = 115$ кПа; $C_{pr} = 1,14$ кДж/(кг·К).

Примітка. Якщо за умови завдання або в результаті розрахунків міра підвищення тиску ється двоступінчастий компресор з проміжним охолодженням повітря. Дані для розв'язування

№ варіанта	Ne, МВт	Витрата повітря тис.м ³ /ГОД	T ₃ , К	T ₄ , К	T ₂ , К	T ₃ /T ₂	ρ_1/ρ_4	ρ_1/ρ_3	ρ_2/ρ_4	ρ_4/ρ_3	№ варіанта	Ne, МВт	Витрата повітря тис.м ³ /ГОД	T ₃ , К	T ₄ , К	T ₂ , К
1		136						0,348		0,15	14	50			745	
2	27				695				22		15		196	1333		
3		108		750					22		16	40				61
4	37						2,6			0,146	17		146		740	
5		116	1373			2,3					18	48				
6	25							0,355		0,145	19		154	1253		
7		180			653		2				20	25				
8	42		1273	740							21		178	1373	730	
9		128				2,65			15		22	32				67
10	45						2,6	0,249			23		216	1403		
11		154					2,7			0,15	24	30				64
12	30				610				9,2		25		200	1333		
13		180	1293					0,26			26	50			733	

Додатки

Додаток А

Теплофізичні властивості води на лінії насичення

t, °C	$p \cdot 10^{-5}$ Па	ρ , кг/м ³	h, кДж/ кг	C_p , кДж/ (кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/ (м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
0	1,013	999,9	0,000	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+0,7	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	875,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	15,8	288,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,9	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,6	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,1	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,4	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,7	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,5	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

Додаток Б
**Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмо-
сферного тиску**

t, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/кг°C	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/м°C	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,548	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,803	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	44,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Додаток В

Теплофізичні властивості деяких мастильних матеріалів

Таблиця В.1 – Теплофізичні властивості трансформаторного масла

t, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ν , 10 ⁶ м ² /с	a , 10 ⁸ м ² /с	β , 10 ⁴ 1/К	Pr
10	886,4	1,62	0,111	37,9	7,83	6,85	484
20	880,3	1,666	0,11	22,5	7,55	6,9	298
30	874,2	1,729	0,1092	14,7	7,27	6,95	202
40	868,2	1,787	0,1089	10,3	7,027	7	146
50	862,1	1,846	0,108	7,58	6,8	7,05	111
60	856	1,905	0,107	5,78	6,58	7,1	87,8
70	850	1,963	0,106	4,54	6,36	7,15	71,3
80	843,9	2,026	0,1056	3,66	6,16	7,2	59,3
90	837,8	2,095	0,1046	3,03	6,0	7,25	50,5
100	831,8	2,14	0,1038	2,56	5,83	7,3	43,9
110	825,7	2,2	0,103	2,2	5,66	7,35	38,8
120	819	2,25	0,1022	1,92	5,33	7,4	34,9

Таблиця В.2 – Теплофізичні властивості масла МС-20

t, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	μ , 10 ⁴ Н·с/м ²	ν ·10 ⁶ м ² /с	a ·10 ⁸ м ² /с	β ·10 ⁴ 1/К	Pr
10	911,0	1,645	0,1510	35414	3883	9,94	8,56	39000
20	903,0	1,712	0,1485	18560	1514	9,58	8,64	15800
30	894,5	1,758	0,1461	6180	691,2	9,28	8,71	7450
40	887,5	1,804	0,1437	3031	342,0	8,97	8,79	3810
50	879,0	1,851	0,1413	1638	186,2	8,69	8,86	2140
60	871,5	1,897	0,1389	961,4	110,6	8,39	8,95	1320
70	846,0	1,943	0,1363	603,3	69,3	8,14	9,03	858
80	856,0	1,989	0,1340	399,3	46,6	7,89	9,12	591
90	848,0	2,035	0,1314	273,7	32,3	7,61	9,20	424
100	840,7	2,081	0,1290	202,1	24,0	7,33	9,28	327
110	838,0	2,127	0,1264	145,2	17,4	7,11	9,37	245
120	825,0	2,173	0,1240	110,4	13,4	6,92	9,46	193,5
130	817,0	2,219	0,1214	87,31	10,7	6,69	9,54	160,0
140	809,2	2,265	0,1188	70,34	8,70	6,53	9,65	133,3
150	801,6	2,311	0,1168	56,90	7,10	6,25	9,73	113,5

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Параметри сухої насиченої пари і води за тиском

P , МПа	t , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
0,0010	6,920	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,875
0,0015	13,038	0,0010007	87,90	0,01138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827
0,0020	17,514	0,0010014	66,47	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,0025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,50	2539	2451	0,3124	8,642
0,0030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,4	2545	2444	0,3546	8,576
0,0035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	11,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,0040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,0050	32,88	0,0010053	28,19	0,03541	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,0060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,0070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,0080	41,54	0,0010085	18,10	0,05525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0,0090	43,79	0,0010094	16,20	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,010	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,012	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085
0,014	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0,016	55,34	0,0010147	9,429	0,1060	231,7	2601	2369	0,7722	7,984
0,018	57,82	0,0010159	8,444	0,1185	241,9	2605	2363	0,8038	7,944
0,020	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,025	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
0,030	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,040	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2634	2318	1,0261	7,670
0,050	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2304	1,0910	7,593
0,060	85,95	0,0010330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
0,070	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,080	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0,090	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
0,10	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
0,12	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
0,14	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246

Продовження таблиці Г.1

P , МПа	t , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
0,16	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
0,18	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
0,20	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,124
0,22	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
0,24	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
0,26	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
0,28	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
0,30	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
0,35	138,88	0,0010736	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	9,941
0,40	143,62	0,0010786	0,5241	2,288	584,5	2732	2148	1,728	6,897
0,45	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
0,50	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
0,60	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2186	1,931	6,761
0,70	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
0,80	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
0,90	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
1,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
1,1	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
1,3	191,06	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
1,4	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
1,5	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
1,6	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,442
1,7	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
1,9	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
2,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
2,2	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272
2,6	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242

Продовження таблиці Г.1

P , МПа	t , $^{\circ}\text{C}$	v' , $\text{м}^3 / \text{кг}$	v'' , $\text{м}^3 / \text{кг}$	ρ'' , $\text{кг} / \text{м}^3$	h' , $\text{кДж} / \text{кг}$	h'' , $\text{кДж} / \text{кг}$	r , $\text{кДж} / \text{кг}$	S' , $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$	S'' , $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$
2,8	230,04	0,0012088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213
3,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
3,5	242,54	0,0012345	0,05704	17,53	1049,8	2803	1753	2,725	6,125
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
4,5	257,41	0,0012690	0,04404	22,71	1122,1	2798	1676	2,862	6,020
5,0	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
5,5	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
6,0	274,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
6,5	280,83	0,0013347	0,02937	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
7,0	285,80	0,0013510	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
7,5	290,50	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
8,5	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
9,0	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678
9,5	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
10	310,96	0,0014512	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
11	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
12	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
13	330,81	0,001567	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
14	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1056,9	3,623	5,372
15	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
16	347,32	0,001710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
18	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
20	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
22	373,70	0,00273	0,00367	272,5	2016	2198	182	4,303	4,591

Додаток Д

Теплофізичні властивості димових газів

(В=760 мм рт.ст. $\approx 0,01 \cdot 10^5$ Па; $\bar{p}(\text{CO}_2) = 0,13$; $\bar{p}(\text{H}_2\text{O}) = 0,11$; $\bar{p}(\text{N}_2) = 0,76$)

t, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·К)	λ , 10 ² Вт/(м·К)	a, 10 ⁶ м ² /с	μ , 10 ⁶ Па·с	ν , 10 ⁶ м ² /с	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,310	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Українсько-англійський словник найбільш вживаних термінів

абсолютна швидкість	<i>absolute velocity</i>
автоколивання	<i>auto-oscillation</i>
активна турбіна	<i>active turbine</i>
випаровування	<i>evaporation</i>
відносна швидкість	<i>relatively speed</i>
всмоктувальна трубка	<i>suctioning tube</i>
газ	<i>gas</i>
гідравлічні втрати	<i>hydraulic losses</i>
диск	<i>disk</i>
діафрагма	<i>diaphragm</i>
допоміжний пристрій	<i>auxiliary device</i>
дотична	<i>tangent</i>
ежектор	<i>ejector</i>
елеватор	<i>elevator</i>
електрична свічка	<i>spurking plug</i>
зазор	<i>aperture</i>
запас	<i>reserve</i>
згорання	<i>combustion</i>
змішувальний тип	<i>mixed type</i>
знос	<i>wear</i>
зубець	<i>tooth</i>
інжектор	<i>injector</i>
кожух	<i>case</i>
колова швидкість	<i>circular speed</i>
компресор	<i>compressor</i>
мережа	<i>hydro-system)</i>
нагнітальна машина	<i>pamping machines</i>
нагнітач	
- осьовий	<i>axles</i>
- відцентровий	<i>centrifugal</i>
- вихоровий	<i>whirlwinding</i>
- лопатевий	<i>bladeing</i>
- шестеренний	<i>gearing</i>
- ротаційний	<i>rotaty</i>
- струминний	<i>streaming</i>
напір	<i>pressure</i>
напрямний апарат	<i>directing device</i>
насосна установка	<i>pumping installation</i>
обвідний трубопровід	<i>round pipeline</i>
паз	<i>slot.</i>
паливний насос	<i>fuel pump</i>

пара	<i>steam</i>
підігрівник	<i>preheater</i>
пластина	<i>plate</i>
повернення теплоти	<i>return heat</i>
подача	<i>supply</i>
поршневий насос	<i>piston pump</i>
промислові споживачі	<i>industrial consumers</i>
протитиск	<i>anti-pressure</i>
проточний	<i>flowing</i>
радіальний напрямок	<i>radial direction</i>
реактивна турбіна	<i>jet turbine</i>
регулювальні клапани	<i>regulation valves</i>
робоче колесо	<i>working wheel</i>
робоче тіло	<i>working body</i>
робочі лопатки	<i>work plate</i>
розвантажувальний поршень	<i>unloading piston</i>
руйнувати	<i>destroy</i>
системи теплофікації	<i>system of central heating</i>
сопло	<i>nozzle</i>
спіральна камера	<i>spiral chamber</i>
температура насичення	<i>temperature of saturation</i>
теплофікація	<i>central heating</i>
тиск	<i>pressure</i>
турбіна	<i>turbine</i>
удар	<i>blow</i>
циркуляція	<i>circulation</i>

Навчальне видання

Чепурний Марко Миколайович
Резидент Наталія Володимирівна

НАГНІТАЧІ ТА ТЕПЛОВІ ДВИГУНИ

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек
Оригінал-макет підготовлено Н. Резидент

Підписано до друку
Формат 29,7×42 1/4. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.
Наклад прим. Зам. №

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

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