

О. А. Вассерман
О. Г. Слинько

**ТЕХНІЧНА
ТЕРМОДИНАМІКА
І ТЕПЛООБМІН**

О. А. Вассерман

О. Г. Слинько

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА І ТЕПЛОБМІН

Підручник

Одеса

«Фенікс»

2019

Рекомендовано до видання Вченою радою Одеського національного морського університету в якості підручника для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Морський та річний транспорт» (протокол № 2 засідання Вченої ради від 25 вересня 2019 року)

Автори:

О. А. Вассерман, доктор технічних наук, Заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації Одеського національного морського університету;

О. Г. Слинько, кандидат технічних наук, професор кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації Одеського національного морського університету

Рецензенти:

О. В. Дорошенко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри термодинаміки та відновлюваної енергетики Одеської національної академії харчових технологій;

В. Р. Нікульшин, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної, загальної й нетрадиційної енергетики Одеського національного політехнічного університету;

М. І. Радченко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кондиціювання і рефрижерації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Вассерман О. А., Слинько О. Г. Технічна термодинаміка і теплообмін :
В19 підручник / О. А. Вассерман, О. Г. Слинько. — Одеса : Фенікс, 2019. — 496 с.
ISBN 978-966-928-490-7

В підручнику розглядаються основні поняття, визначення, перший та другий закони термодинаміки, процеси в ідеальному газі, термодинамічні цикли двигунів внутрішнього згоряння та газотурбінних установок. Також розглядаються особливості термодинамічної поведінки реальних газів, процеси в цих газах, цикли паротурбінних і холодильних установок і методи розрахунку і аналізу їх ефективності. Описані властивості вологого повітря та процеси в ньому. Викладені теоретичні основи протікання процесів теплообміну, наведені основні рівняння, що виражають закони теплопровідності, конвекції, теплового випромінювання.

Наприкінці кожного розділу наведені контрольні питання та приклади рішення задач, які охоплюють матеріал цих розділів і дозволяють студентам самостійно перевіряти рівень своїх знань.

Рекомендується студентам судномеханічних спеціальностей та інженерно-технічним працівникам, які займаються розрахунками термодинамічних і теплообмінних процесів і дослідженнями циклів енергетичних установок.

УДК 536.24(075.8)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
ЧАСТИНА ПЕРША.	
ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЦИКЛИ В ІДЕАЛЬНОМУ ГАЗІ	
Розділ 1. Основні поняття та визначення	10
1.1. Термодинамічна система та її стан	10
1.2. Термічні параметри стану.....	11
1.3. Рівняння стану робочого тіла	14
1.4. Суміші ідеальних газів	16
1.5. Термодинамічні процеси.....	18
1.6. Робота і теплота процесу	19
1.7. Теплосмність	21
Контрольні питання	23
Приклади розв'язання типових задач.....	25
Розділ 2. Перший закон термодинаміки	28
2.1. Формулювання першого закону термодинаміки.....	29
2.2. Основне рівняння термодинаміки для стаціонарного потоку.....	32
2.3. Рівняння першого закону термодинаміки для ідеального газу.....	34
2.4. Ентропія ідеального газу.....	36
Контрольні питання	39
Приклади розв'язання типових задач.....	40
Розділ 3. Термодинамічні процеси в ідеальному газі	43
3.1. Ізохорний процес	43
3.2. Ізобарний процес	45
3.3. Ізотермічний процес	47
3.4. Адіабатний процес.....	49
3.5. Політропний процес	51
3.6. Робота поршневого компресора.....	56
Контрольні питання	61
Приклади розв'язання типових задач.....	63
Розділ 4. Другий закон термодинаміки та поняття про термодинамічні цикли	70
4.1. Формулювання другого закону термодинаміки	70
4.2. Існування ентропії для будь-якого тіла	72
4.3. Ентропія як міра необоротності процесів в системі	74
4.4. Термодинамічні цикли	76
4.5. Цикл Карно.....	79
4.6. Золоте правило технічної термодинаміки	83
Контрольні питання	85
Приклади розв'язання типових задач.....	86

Розділ 5. Термодинамічні цикли двигунів внутрішнього згорання	98
5.1. Індикаторна діаграма та цикли ДВЗ	98
5.2. Модифікації термодинамічних циклів ДВЗ	102
5.3. Визначення термічних ККД циклів ДВЗ	103
5.4. Порівняння ефективності циклів ДВЗ	108
5.5. Удосконалення термодинамічного циклу ДВЗ з вихлопом в оточуюче середовище	113
Контрольні питання	120
Приклади розв'язання типових задач	122
Розділ 6. Цикли газотурбінних установок	139
6.1. Схема і цикл простої газотурбінної установки	139
6.2. Цикл газотурбінної установки з регенерацією теплоти	141
6.3. Цикл ГТУ з ізотермічним стисненням повітря	147
6.4. Цикл ГТУ з багатоступеневими стисненням повітря та розширенням газів	149
6.5. Удосконалення термодинамічного циклу газотурбінних установок	154
Контрольні питання	158
Приклади розв'язання типових задач	160
ЧАСТИНА ДРУГА.	
ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЦИКЛИ В РЕАЛЬНОМУ ГАЗІ	
Розділ 7. Термодинамічні властивості реального газу	172
7.1. Особливості термодинамічної поведінки реального газу	172
7.2. Рівняння стану і таблиці термодинамічних властивостей реальних газів	178
7.3. Термодинамічні діаграми реального газу	184
Контрольні питання	188
Приклади розв'язання типових задач	190
Розділ 8. Термодинамічні процеси в реальному газі	195
8.1. Ізобарний процес	196
8.2. Ізохорний процес	198
8.3. Ізотермічний процес	200
8.4. Ізоентропний процес	201
8.5. Процес дроселювання	204
8.6. Процес течії	206
Контрольні питання	215
Приклади розв'язання типових задач	217
Розділ 9. Термодинамічні цикли паротурбінних установок	237
9.1. Схема і цикл базової паротурбінної установки	237
9.2. Цикл з регенеративним підігрівом живильної води	244
9.3. Цикл з проміжним перегрівом пари	254
9.4. Цикл ІПУ з регулюємою температурою конденсації пари	260
9.5. Бінарні та газопарові цикли	263
Контрольні питання	268
Приклади розв'язання типових задач	270

Розділ 10. Цикли холодильних установок	289
10.1. Принцип роботи холодильних установок	289
10.2. Схема і термодинамічний цикл повітряної холодильної установки	291
10.3. Схема і цикл одноступеневої парокомпресорної холодильної установки	294
10.4. Тепловикористовуючі холодильні установки	299
10.5. Теплові насоси і теплофікаційні холодильні установки	303
10.6. Форми представлення даних про термодинамічні властивості холодоагентів	305
<i>Контрольні питання</i>	307
<i>Приклади розв'язання типової задачі</i>	309
Розділ 11. Ексергетичний метод аналізу ефективності теплових установок	313
11.1. Поняття про ексергію	313
11.2. Методи аналізу ефективності теплоенергетичних установок	317
<i>Контрольні питання</i>	323
<i>Приклади розв'язання типових задач</i>	325
Розділ 12. Основи термодинаміки вологого повітря	327
12.1. Термодинамічні властивості вологого повітря	327
12.2. Діаграма h, d вологого повітря	332
<i>Контрольні питання</i>	339
<i>Приклади розв'язання типових задач</i>	340
ЧАСТИНА ТРЕТЯ.	
ОСНОВИ ТЕПЛООБМІНУ	
Розділ 13. Теплопровідність	349
13.1. Основні поняття і визначення	349
13.2. Закон Фур'є	350
13.3. Теплопровідність плоскої стінки	351
13.4. Теплопровідність циліндричної стінки	355
13.5. Теплопровідність однорідної сфери та тіл складної форми	359
13.6. Теплопровідність тіл із внутрішніми джерелами теплоти	361
<i>Контрольні питання</i>	363
<i>Приклади розв'язання типових задач</i>	364
Розділ 14. Основи теорії конвективного теплообміну	370
14.1. Загальні поняття та визначення	370
14.2. Математичний опис процесу тепловіддачі	373
14.3. Основні положення теорії подібності	378
14.4. Узагальнення дослідних даних за допомогою теорії подібності	382
<i>Контрольні питання</i>	385
Розділ 15. Конвективний теплообмін між рідиною та поверхнею	387
15.1. Тепловіддача при обтіканні пластин	387
15.2. Тепловіддача при обтіканні сферичної поверхні	388
15.3. Тепловіддача при течії рідини в трубах	389
15.4. Тепловіддача при поперечному обтіканні труб	391
15.5. Тепловіддача при вільній конвекції	396
<i>Контрольні питання</i>	400
<i>Приклади розв'язання типових задач</i>	401

Розділ 16. Теплообмін при зміні агрегатного стану речовини	408
16.1. Теплообмін при кипінні рідини	408
16.2. Теплообмін при конденсації пари	417
<i>Контрольні питання</i>	425
<i>Приклади розв'язання типових задач</i>	426
Розділ 17. Теплообмін випромінюванням	431
17.1. Основні поняття та визначення	431
17.2. Закони теплового випромінювання	433
17.3. Променевий теплообмін між тілами	438
17.4. Променевий теплообмін при наявності екранів	441
17.5. Випромінювання газів	443
<i>Контрольні питання</i>	446
<i>Приклади розв'язання типових задач</i>	447
Розділ 18. Теплопередача	452
18.1. Складний теплообмін	452
18.2. Теплопередача через плоску стінку	453
18.3. Теплопередача через циліндричну стінку	455
18.4. Теплопередача через сферичну стінку	457
18.5. Теплопередача через складні стінки	459
18.6. Інтенсифікація теплопередачі	461
18.7. Теплова ізоляція	463
<i>Контрольні питання</i>	466
<i>Приклади розв'язання типових задач</i>	467
Розділ 19. Основи розрахунку теплообмінних апаратів	480
19.1. Типи теплообмінних апаратів	480
19.2. Основи теплового розрахунку теплообмінних апаратів	482
19.3. Деякі особливості теплових розрахунків теплообмінників	488
<i>Контрольні питання</i>	490
<i>Приклади розв'язання типових задач</i>	491
Література	494

ВСТУП

Термодинаміка виникла як розділ фізичного вчення про теплоту і спочатку вивчала закони взаємного перетворення теплоти і роботи. Зараз коло питань, якими займається термодинаміка, значно розширилося — вона розглядає фізичні, хімічні та інші явища з точки зору перетворень енергії, які в них здійснюються.

Термодинаміку можна визначити як вчення про взаємні енергетичних зв'язки, що мають місце у всіх явищах природи і, перш за все, про зв'язки між теплотою і іншими видами енергії. При цьому теплота протиставляється іншим видам енергії тому, що на підставі другого закону термодинаміки всі види енергії можуть бути повністю перетворені в теплоту, тоді як теплота, взята від будь-якого джерела, *не може бути повністю перетворена* в інші види енергії.

В основу термодинаміки закладено *три закони*, які узагальнюють людський досвід насамперед в області взаємних перетворень різних видів енергії. Термодинаміка являє собою логічний та математичний розвиток цих законів. Термодинамічний метод передбачає вивчення властивостей макроскопічних об'єктів в цілому без урахування мікроскопічної поведінки атомів і молекул, які утворюють термодинамічну систему (робоче тіло).

Технічна термодинаміка — наука, що вивчає процеси взаємного перетворення теплової і механічної енергії. Знання цих процесів необхідно для побудови, розрахунку та дослідження циклів енергетичних і холодильних установок, пов'язаних з такими перетвореннями.

Головні задачі технічної термодинаміки:

1. Визначення фізичних умов, за яких можливо безперервне перетворення теплової енергії в механічну або безперервне «генерування холоду» за рахунок механічної або теплової енергії.
2. Виявлення факторів, які забезпечують підвищення ефективності роботи теплового двигуна або холодильної установки при заданих умовах їх роботи.

3. Виявлення впливу роду робочого тіла на коефіцієнт корисної дії (ККД) теплових двигунів і теоретичне обґрунтування того факту, що цей ККД завжди менше одиниці.

4. Вивчення термодинамічних властивостей робочих тіл енергетичних і холодильних установок з метою удосконалення останніх.

Дисципліна «Технічна термодинаміка і теплообмін» є визначальною для фахівців теплоенергетиків всіх спеціалізацій. Зокрема, в Одеському національному морському університеті (ОНМУ) для майбутніх судномеханіків вона є теоретичною базою при вивченні всіх профільюючих дисциплін, тобто: двигунів внутрішнього згорання, суднових парових і газових турбін, суднових парових котлів, суднових холодильних установок і систем кондиціонування повітря, нарешті, суднових допоміжних установок і теплообмінних апаратів. Із наведеного списку слідує, що дисципліна «Технічна термодинаміка і теплообмін» є визначальною: від глибини опанування питань, що вивчаються в ній, залежить якість підготовки майбутнього інженера-судномеханіка, тобто глибина розуміння ним процесів, що мають місце в тих або інших суднових установках, його здатність оперативно приймати правильні інженерні рішення на безперервно виникаючі ситуативні питання при експлуатації судової енергетичної установки (СЕУ). Не менш важливим завданням інженера-судномеханіка є прийняття правильних інженерних рішень при проектуванні нових, модернізації морально застарілих і капітальному ремонті складових елементів СЕУ.

Глибина засвоєння навчального матеріалу студентами залежить від багатьох чинників, але, насамперед, від наявності методичної літератури: підручників, посібників, методичних вказівок, тощо, написаних в прийнятному для розуміння студентами стилі дещо нижче середнього рівня їх підготовки.

Не менше значення на глибину засвоєння навчального матеріалу впливає наявність відповідного задачника, в якому розтлумачувались би приклади розв'язання типових задач, для розв'язання яких потрібне глибоке розуміння (осмислення) теоретичних питань, що вивчаються в дисципліні.

Переліченими тезами автори підручника керувались при його написанні.

Матеріал підручника «Технічна термодинаміка і теплообмін» викладено в *трьох* частинах:

- Процеси і цикли в ідеальному газі
- Процеси і цикли в реальному газі
- Основи теплообміну.

Кожна частина підручника поділена на окремі логічно завершені розділи, після яких приведена така кількість питань, яка дозволяє студенту не тільки здійснювати повний самоконтроль глибини освоєння відповідного матеріалу, але й акцентує його увагу на необхідність розуміння і запам'ятовування тих теоретичних положень, які важливі для подальшого розуміння розглядаємих нижче питань, а також при вирішенні практичних питань по термодинаміці і вище перерахованим профілюючим дисциплінам інженера-судномеханіка. Кожен розділ підручника закінчується прикладами розв'язання відповідних типових задач.

В підручник включені розроблені авторами приклади інноваційних термодинамічних циклів ДВЗ, ГТУ та ПТУ, які є удосконаленнями класичних циклів цих перетворювачів теплової енергії в механічну. Удосконалення виконані на базі сформульованого нами «золотого правила» технічної термодинаміки. Ці приклади наведені з метою спонукання студентів і фахівців до винахідницької діяльності. Наведені приклади свідчать, що навіть у такій класичній дисципліні, як технічна термодинаміка, є поле для творчості.

Наприкінці підручника наведено список підручників та інших джерел, ознайомлення з якими дозволить студентам та фахівцям отримати більш глибокі відповіді на питання, які в підручнику по різних причинах розглядаються не повно.

Автори вдячні докторам технічних наук професорам завідувачам кафедр Дорошенко О.В, Нікульшину В.Р. та Радченко М.І за цінні зауваження та поради, висловлені ними при рецензуванні рукопису.

Автори також з вдячністю приймуть всі зауваження та побажання викладачів відповідних вузівських дисциплін, з метою удосконалення підручника