

**О. А. Вассерман,
О. Г. Слинько, М. А. Шутенко**

**ІННОВАЦІЙНІ
ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЦИКЛИ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

О. А. Вассерман,
О. Г. Слинько, М. А. Шутенко

ІННОВАЦІЙНІ ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЦИКЛИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Під редакцією О. А. Вассермана

Одеса
Фенікс
2020

УДК 536.24(075.8)
В19

*Рекомендовано до видання Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 2 засідання Вченої ради від 30 вересня 2020 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, випускник ОПМФ 1953 року;
О. Г. Слинько, кандидат технічних наук, професор кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації Одеського національного морського університету, випускник ОПМФ 1964 року;
М. А. Шутенко, кандидат технічних наук, керівник відділу стратегії та розвитку ТОВ «Фастон», випускник ОДМУ 1999 року.

Рецензенти:

В. М. Горбов, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
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.

Вассерман О. А., Слинько О. Г., Шутенко М. А.

В19 Інноваційні термодинамічні цикли енергетичних установок. —
Одеса : Фенікс, 2020. — 184 с.
ISBN 978-966-928-616-1

Наведений огляд класичних термодинамічних циклів двигунів внутрішнього згоряння, газотурбінних і паротурбінних установок. Пропонуються удосконалення циклів таких установок, які дозволяють підвищити їх потужність і термічний коефіцієнт корисної дії. Ефективність модернізації енергетичних установок підтверджена відповідними тепловими розрахунками.

Рекомендується науковцям та інженерно-технічним працівникам, які досліджують термодинамічні цикли енергетичних установок.

УДК 536.24(075.8)

ISBN 978-966-928-616-1

© О. А. Вассерман, О. Г. Слинько,
М. А. Шутенко, 2020

Зміст

ВСТУП	7
РОЗДІЛ ПЕРШИЙ	
ЦИКЛИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	
1.1. Класичні цикли двигунів внутрішнього згорання	10
1.2. Удосконалення циклів ДВЗ з вихлопом в атмосферу	18
1.2.1. Цикл з утилізаційною турбіною, в якій гази розширюються до атмосферного тиску	18
1.2.2. Цикл з утилізаційною турбіною, в якій гази розширюються до тиску нижче атмосферного	20
1.2.3. Цикл з попереднім охолодженням повітря, що подається в циліндри ДВЗ	24
1.2.4. Цикл з охолодженням повітря, що подається в циліндри ДВЗ, та з утилізаційною турбіною, в якій гази розширюються до атмосферного тиску	28
1.2.5. Цикл з охолодженням повітря, що подається в циліндри ДВЗ, та з утилізаційною турбіною, в якій гази розширюються до тиску нижче атмосферного	31
1.3. Удосконалення циклів ДВЗ із наддувом	37
1.3.1. Цикл ДВЗ із механічним наддувом без охолодження повітря, що подається в циліндри ДВЗ	37
1.3.2. Цикл ДВЗ із механічним наддувом з охолодженням повітря, що подається в циліндри ДВЗ, до температури оточуючого середовища	41
1.3.3. Цикл ДВЗ із механічним наддувом з охолодженням повітря, що подається в циліндри, до температури нижче температури оточуючого середовища	44
1.3.4. Цикл ДВЗ із механічним наддувом без охолодження повітря, що подається в циліндри, та з утилізаційною турбіною, в якій гази розширюються до атмосферного тиску	47

1.3.5. Цикл ДВЗ із механічним наддувом з охолодженням повітря, що подається в циліндри, до температури оточуючого середовища та з утилізаційною турбіною, в якій гази розширюються до атмосферного тиску	50
1.3.6. Цикл ДВЗ із механічним наддувом з охолодженням повітря, що подається в циліндри, до температури нижче температури оточуючого середовища та з утилізаційною турбіною, в якій гази розширюються до атмосферного тиску	53
1.3.7. Цикл ДГТУ з газотурбінним наддувом без охолодження повітря, що подається в циліндри ДВЗ, та з розширенням газів в турбіні до атмосферного тиску	56
1.3.8. Цикл ДГТУ з газотурбінним наддувом з охолодженням повітря, що подається в циліндри ДВЗ, до температури оточуючого середовища та з розширенням газів в турбіні до атмосферного тиску	59
1.3.9. Цикл ДГТУ з газотурбінним наддувом з охолодженням повітря, що подається в циліндри ДВЗ, до температури нижче температури оточуючого середовища та з розширенням газів в турбіні до атмосферного тиску	62
1.3.10. Цикл ДГТУ з газотурбінним наддувом без охолодження повітря, що подається в циліндри ДВЗ, та з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного	65
1.3.11. Цикл ДГТУ з газотурбінним наддувом з охолодженням повітря, що подається в циліндри ДВЗ, до температури оточуючого середовища та з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного	69
1.3.12. Цикл ДГТУ з газотурбінним наддувом з охолодженням повітря, що подається в циліндри ДВЗ, до температури нижче температури оточуючого середовища та з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного	72

РОЗДІЛ ДРУГИЙ

ЦИКЛИ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

2.1. Сучасні цикли газотурбінних установок	78
2.1.1. Термодинамічний цикл простої відкритої ГТУ	78

2.1.2. Термодинамічний цикл ГТУ з регенерацією теплоти	80
2.1.3. ГТУ з двоступеневим стисненням повітря з його проміжним охолодженням до температури оточуючого середовища та регенерацією теплоти	82
2.1.4. Цикл відкритої ГТУ з ізохорним підведенням теплоти	85
2.2. Високотемпературна регенерація теплоти в ГТУ	88
2.2.1. Регенеративний підігрів повітря газами, які відпрацювали у ТВГ	88
2.2.2. Вплив температури газів, що надходять у РТО, на ККД циклу ГТУ	92
2.3. Удосконалення термодинамічних циклів простих відкритих газотурбінних установок	98
2.3.1. Цикл ГТУ з попереднім охолодженням повітря	98
2.3.2. Цикл ГТУ з попереднім охолодженням повітря та з регенерацією теплоти відпрацювавших газів	101
2.3.3. Цикл ГТУ з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного	104
2.3.4. Цикл ГТУ з попереднім охолодженням повітря і з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного	107
2.3.5. Цикл ГТУ з попереднім охолодженням повітря, розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного та з регенеративним підігрівом стиснутого повітря	110
2.3.6. Цикл ГТУ з двоступеневим стисненням повітря з проміжним охолодженням до температури оточуючого середовища та з розширенням газів до тиску нижче атмосферного	114
2.3.7. Цикл ГТУ з попереднім охолодженням повітря, його двоступеневим стисненням з проміжним охолодженням до температури навколишнього середовища та з розширенням газів до тиску нижче атмосферного	119
2.3.8. Цикл ГТУ з двоступеневим стисненням повітря з проміжним охолодженням до температури навколишнього середовища, з розширенням газів у турбіні до тиску нижче атмосферного та з регенерацією теплоти відпрацювавших газів	121

2.3.9. Цикл ГТУ з попереднім охолодженням повітря, його двоступеневим стисненням з проміжним охолодженням до температури навколишнього середовища, розширенням газів у турбіні до тиску нижче атмосферного та з регенерацією теплоти відпрацювавших газів	124
---	-----

РОЗДІЛ ТРЕТІЙ

ЦИКЛИ ПАРОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

3.1. Класичні термодинамічні цикли паротурбінних установок. . .	129
3.1.1. Спрощена схема базової ПТУ	129
3.1.2. Цикл з регенеративним підігрівом живильної води	136
3.1.3. Цикл з проміжним перегрівом пари	142
3.2. Підвищення середньої температури підведення теплоти в ПТУ	144
3.2.1. Підвищення середньої температури підведення теплоти шляхом змішування перегрітої пари з високотемпературними газами	149
3.2.2. Підвищення ККД паротурбінних установок шляхом ізобарно–ізотермічного підведення теплоти до робочого тіла. . .	154
3.2.3. Реалізація розглянутих вище способів підвищення ККД ПТУ	161
3.3. Удосконалення термодинамічних циклів ПТУ шляхом регулювання температури (тиску) конденсації та вологості пари	165
3.3.1. Цикл з штучно регулюємою температурою (тиском) конденсації пари.	165
3.3.2. Цикл з штучно регулюємою температурою конденсації пари та з регенеративним підігрівом живильної води	168
3.3.3. Цикл з штучно регулюємими температурою конденсації і ступенем сухості пари та з регенеративним підігрівом живильної води.	170
3.3.4. Цикл з штучно регулюємою температурою конденсації пари та з двома проміжними перегрівами	174
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.	177
ЛІТЕРАТУРА.	180

ВСТУП

Термодинамічний цикл перетворення теплової енергії в механічну має важливу роль в одержанні електричної енергії та в забезпеченні руху транспортних засобів, тому вдосконалення цього циклу є актуальним. Як відомо, при будь-якому процесі перетворення одного виду енергії в інший мають місце втрати. У процесі перетворення теплової енергії в механічну і механічної в електричну найбільші втрати мають місце при першому перетворенні (40...60% від теплоти згоряння палива). Тому вдосконалення процесу одержання електричної енергії треба починати з удосконалення тепломеханічних установок.

До таких установок відносяться двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), газотурбінні та паротурбінні установки (ГТУ і ПТУ). Оскільки потужності теплових двигунів постійно збільшуються, підвищення їх ефективного коефіцієнта корисної дії (ККД) навіть на частку відсотка призводить до істотної економії палива і відповідного зменшення теплового і газового забруднення оточуючого середовища.

Ефективний ККД теплових двигунів складається з добутку трьох коефіцієнтів: термічного, внутрішнього відносного та механічного. Термічний залежить від властивостей термодинамічних процесів, що утворюють відповідний теоретичний цикл; внутрішній – від якості здійснення цих процесів і, нарешті, механічний – від зовнішньої необоротності, пов'язаної, насамперед, з тертям у елементах двигуна, а також від наявності допоміжних механізмів, «навішених» на двигун.

Зараз найменшим із перерахованих коефіцієнтів є термічний ККД, який приблизно дорівнює: у ДВЗ 0,65, у ГТУ і ПТУ 0,5. Значення внутрішнього відносного і механічного ККД у них приблизно однакові і у середньому дорівнюють 0,8 і 0,9 відповідно. Тому найбільші потенційні можливості для збільшення ефективного ККД теплових двигунів є в збільшенні найменшого із співмножників – термічного ККД.

У монографії розглядаються питання вдосконалення термодинамічних циклів ДВЗ, ГТУ і ПТУ з метою підвищення їх термічного КПД і питомої потужності. Двигуни внутрішнього згоряння є головними двигунами 95% морських суден, тому задача підвищення їх економічності актуальна в першу чергу для транспортного флоту. Удосконаленню термодинамічних циклів ДВЗ присвячений перший розділ монографії. Деякі удосконалення циклів ДВЗ, пов'язані з істотними конструктивними ускладненнями енергетичної установки, не можуть бути реалізовані в судових умовах. Однак вони цілком виправдані в стаціонарних ДВЗ, потужності яких у перспективі будуть збільшуватися, що буде підвищувати вимоги до їхньої ефективності.

Наші дослідження показали, що в перспективі «чисті» ДВЗ великої потужності будуть витиснуті комбінованими дизель-газотурбінними установками (ДГТУ). Термодинамічні цикли останніх дозволяють синтезувати переваги циклів ДВЗ і ГТУ, регулювати параметри газів, що надходять на лопатки турбіни, перерозподіляти потужності між ДВЗ та ГТУ і тим самим підвищувати ефективність процесу перетворення теплоти в роботу.

Газотурбінні установки знаходять усе більш широке застосування, тому що поєднують переваги ДВЗ і ПТУ. Зараз ГТУ є основними приводами компресорів станцій для перекачки газу. Враховуючи мобільність ГТУ в плані пуску та зупинки, вони можуть бути використані на електростанціях під час пікових навантажень електромереж. Тому завдання підвищення порівняно низького термічного ККД таких установок є важливим. Деякі ва-

ріанти розв'язання цього завдання розглянуті в другому розділі монографії.

Паротурбінні установки на сучасному етапі розвитку техніки є основними тепловими двигунами для великих електростанцій. Близько 90% електроенергії виробляється за їх допомогою на звичайних і атомних електростанціях. У зв'язку з цим у третьому розділі розглянуті варіанти більш ефективних циклів ПТУ. Як відомо, термічний ККД будь-якого циклу перетворення теплоти в роботу зростає з підвищенням середньої температури підведення теплоти до робочого тіла та зменшенням середньої температури відведення теплоти. Авторами запропоновані способи здійснення таких змін температури, що дозволяють суттєво підвищити термічний ККД ПТУ.

Усі запропоновані в монографії вдосконалення термодинамічних циклів енергетичних установок засновані на використовувемому в науці і техніці, але чітко сформульованому авторами «золотому» правилі технічної термодинаміки: *для зменшення роботи стиснення робоче тіло необхідно охолоджувати, а для збільшення роботи розширення – нагрівати*. Ефективність всіх удосконалень підтверджується відповідними зіставними тепловими розрахунками.

Більшість підрозділів написані О.А. Вассерманом і О.Г. Слинко, підрозділи 2.2 і 3.2 – О.А. Вассерманом і М.А. Шутенко.

Автори вдячні професорам Горбову В.М., Дорошенко О.В. і Никольшину В.Р. за цінні зауваження й поради, висловлені при рецензуванні рукопису. Вдячні також Галкіну В.М. за оформлення графічної частини монографії.

З вдячністю будуть прийняті авторами всі зауваження та побажання фахівців, спрямовані на подальше вдосконалення циклів енергетичних установок, які не обмежуються тими, що пропонуються в монографії.