

536
К31

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПОВІТРЯНИХ СИЛ імені ІВАНА КОЖЕДУБА

О. О. Кашенко

АЕРОГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Частина 1

ОСНОВИ ТЕХНІЧНОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ
І ГАЗОВОЇ ДИНАМІКИ

Харків
2020

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПОВІТРЯНИХ СИЛ імені ІВАНА КОЖЕДУБА

О. О. Кащенко

АЕРОГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Частина 1

ОСНОВИ ТЕХНІЧНОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ
І ГАЗОВОЇ ДИНАМІКИ

Навчальний посібник



Харків
2020

Рецензенти:

С. А. Калкаманов, д-р техн. наук, професор (Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба);

І. Б. Ковтонюк, д-р техн. наук, професор (Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба).

Кашенко О. О.

K88 **Аерогідрогазодинаміка:** Ч. 1. Основи технічної термодинаміки і газової динаміки: навч. посіб. / О. О. Кашенко. – Х.: ХНУПС, 2020. – 236 с.

Наведено загальні теоретичні відомості про рівняння стану ідеального газу, теплоту і роботу процесу, термодинамічні процеси ідеального газу, перший і другий закони термодинаміки, основні властивості рідини і газу, моделі потоку, основні рівняння, характерні швидкості і параметри одномірного руху газу, надзвукові течії газу, основи теорії приповерхневого шару, прискорення газового плинину і цикли турбореактивних двигунів та розрахункові формули, необхідні для рішення завдань і виконання розрахунково-графічних робіт.

Призначений для курсантів льотної факультету, які вивчаються за напрямком “Воєнні науки, національна безпека, безпека державного кордону”, спеціальності “Військове управління (за видами Збройних Сил)”, спеціалізації “Льотна експлуатація та бойове застосування літаків”, “Льотна експлуатація та бойове застосування вертольотів”, “Бойове управління польотами авіації”, “Навігація та бойове застосування літальних апаратів”.

УДК 536.7+532.5(075.8)

© Кашенко О. О., 2020

© Харківський національний
університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба, 2020

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник з дисципліни "Аерогідрогазодинаміка" складається із двох частин – "Основи технічної термодинаміки і газової динаміки" і "Аеродинаміка профілю крила та основи теорії авіаційних газотурбінних двигунів".

Перша частина містить у собі розділи "Основи технічної термодинаміки" і "Основи газової динаміки", теоретичний і практичний матеріал яких вивчається на лекціях, групових заняттях та під час лабораторних робіт.

У навчальному посібнику наведено загальні теоретичні відомості з: рівняння стану ідеального газу; теплоти і роботи процесу; термодинамічних процесів ідеального газу; першого і другого закону термодинаміки; основних властивостей рідини і газу; моделей потоку; основних рівнянь, характерних швидкостей і параметрів одновимірного руху газу; прискорення газового потоку; надзвукової течії газу; основ теорії примежового шару; циклів турбореактивних двигунів, та розрахункові формули, які необхідні для розв'язання завдань і виконання розрахунково-графічних робіт курсантами.

Навчальний посібник призначений для самостійної роботи курсантів льотного факультету, які навчаються за напрямком підготовки "Воєнні науки, національна безпека, безпека державного кордону", спеціальності "Військове управління (за видами Збройних Сил)", спеціалізації "Льотна експлуатація та бойове застосування літаків", "Льотна експлуатація та бойове застосування вертольотів", "Бойове управління польотами авіації", "Навігація та бойове застосування літальних апаратів".

Він може бути корисним і для самостійної роботи курсантів інженерно-авіаційного факультету, і для авіаційного персоналу, професійна діяльність яких пов'язана з льотною експлуатацією і технічним обслуговуванням літальних апаратів.

Зміст цієї книги відповідає вимогам кредитно-модульної системи навчання і діючої робочої навчальної програми з дисципліни "Аерогідрогазодинаміка".

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТЕХНІЧНОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ.....	4
Глава 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ.....	4
1.1. Роль і місце технічної термодинаміки серед наукових дисциплін.....	4
1.2. Основні поняття, терміни і визначення технічної термодинаміки.....	5
1.3. Сили, що діють на рідину і газ.....	6
1.4. Параметри стану робочого тіла.....	9
Контрольні запитання.....	13
Глава 2. РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ	14
2.1. Рівняння стану ідеального газу.....	14
2.2. Повна і внутрішня енергія робочого тіла.....	18
Контрольні запитання.....	22
Глава 3. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ	23
3.1. Теплота процесу і теплосмість газу	23
3.2. Робота процесу.....	27
3.3. Внутрішня і зовнішня робота.....	30
3.4. Перший закон термодинаміки.....	33
3.5. Ентальпія (тепломісткість).....	35
Контрольні запитання.....	37
Глава 4. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ.....	38
4.1. Методика дослідження термодинамічних процесів.....	38
4.2. Термодинамічні процеси ідеального газу.....	41
4.2.1. Ізохорний процес (закон Шарля).....	41
4.2.2. Ізобарний процес (закон Гей-Люсака).....	43
4.2.3. Ізотермічний процес (закон Бойля-Маріотта).....	46
4.2.4. Адіабатний процес.....	48
4.2.5. Політропний процес.....	52
4.3. Аналіз розташування політроп у p - v -координатах.....	57
Контрольні запитання.....	58
Глава 5. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ.....	59
5.1. Оборотні та необоротні процеси.....	59
5.2. Кругові термодинамічні процеси (цикли).....	62

5.3.	Термічний коефіцієнт корисної дії циклу.....	64
5.4.	Цикл Карно і його значення.....	65
5.5.	Математичний вираз другого закону термодинаміки.....	67
5.6.	Ентропія і її властивості.....	69
5.7.	Зміна ентропії в оборотних і необоротних процесах.....	70
5.8.	Закон зростання ентропії і деградація енергії системи.....	75
5.9.	Зміна ентропії у термодинамічних процесах ідеального газу.....	77
5.10.	Ентропійна система координат, її властивості і основні термодинамічні процеси у неї.....	78
	Контрольні запитання.....	83
	РОЗДІЛ 2. ОСНОВИ ГАЗОВОЇ ДИНАМІКИ.....	84
	Глава 6. ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИНИ І ГАЗУ.....	84
6.1.	Основні механічні характеристики рідини і газу.....	84
6.2.	Основні фізичні властивості рідини і газу.....	86
6.2.1.	Об'ємні властивості рідини і газу.....	86
6.2.2.	В'язкість рідини і газу.....	93
	Контрольні запитання.....	100
	Глава 7. КІНЕМАТИКА ПОТОКУ РІДИНИ І ГАЗУ.....	101
7.1.	Моделі потоку рідини і газу.....	101
7.2.	Основні поняття про кінематичні характеристики потоку рідини.....	102
7.3.	Лінії та трубки струму. Живий перетин потоку.....	106
7.4.	Витрата рідини.....	108
	Контрольні запитання.....	110
	Глава 8. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ ОДНОМІРНОГО РУХУ ГАЗУ.....	111
8.1.	Основні терміни, поняття й визначення.....	111
8.2.	Рівняння нерозривності (витрати).....	114
8.3.	Рівняння енергії газового потоку.....	116
8.4.	Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини і газу.....	122
8.5.	Рівняння Бернуллі для в'язкої рідини і газу.....	128
8.6.	Диференціальні рівняння руху ідеальної нестисливої рідини.....	130
8.7.	Режими руху рідини і газу.....	136
	Контрольні запитання.....	139
	Глава 9. ХАРАКТЕРНІ ШВИДКОСТІ І ПАРАМЕТРИ ОДНОМІРНОГО ПОТОКУ ГАЗУ.....	140
9.1.	Параметри загальмованого потоку.....	140
		231

9.2.	Гранична швидкість руху газу	145
9.3.	Вимір швидкості повітряного потоку.....	147
9.4.	Критичні й безрозмірні параметри потоку.....	149
9.5.	Газодинамічні функції і їхнє застосування.....	152
Контрольні запитання.....		157
Глава 10. НАДЗВУКОВІ ТЕЧІЇ ГАЗУ.....		158
10.1.	Утворення поверхонь розриву у газі.....	158
10.2.	Поширення слабких збурень у потоці газу. Конус збурень	159
10.3.	Плин розширення. Поворот потоку на малі кінцеві кути	162
10.4.	Плин стиску. Утворення ударних хвиль (стрибків ущільнення).....	164
10.5.	Зміна параметрів газу на стрибку ущільнення.....	169
10.5.1.	Збереження маси на стрибку ущільнення.....	170
10.5.2.	Зміна швидкості потоку на стрибку ущільнення.....	170
10.5.3.	Зміна щільності потоку на стрибку ущільнення.....	171
10.5.4.	Зміна тиску і температури на стрибку ущільнення.....	172
10.5.5.	Визначення кута нахилу стрибка ущільнення.....	173
10.5.6.	Зміна параметрів гальмування на стрибку ущільнення....	174
10.6.	Хвильовий опір тиску.....	176
Контрольні запитання.....		177
Глава 11. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПРИМЕЖОВОГО ШАРУ.....		178
11.1.	Основні поняття про примежовий шар.....	178
11.2.	Ламінарний і турбулентний примежовий шар.....	181
11.3.	Положення точки переходу ламінарного шару в турбулентний.....	184
11.4.	Опір тертя.....	186
11.5.	Вихровий опір тиску.....	187
11.6.	Вплив градієнта тиску на примежовий шар. Відрив потоку.....	192
11.7.	Взаємодія примежового шару й стрибків ущільнення. Хвильовий зрив.....	193
Контрольні запитання.....		195
Глава 12. ПРИСКОРЕННЯ ГАЗОВОГО ПОТОКУ.....		196
12.1.	Вплив форми каналу на зміну швидкості потоку.....	196
12.2.	Швидкість витікання газу із сопла	200
12.3.	Витрата газу через сопло.....	207
12.4.	Плин газу у соплі, що звужується.....	209
12.4.1.	Режим повного розширення газу.....	210

12.4.2.	Режим неповного розширення газу.....	211
12.5.	Плин газу у соплі Лавалю.....	212
12.5.1.	Розрахунковий режим роботи сопла Лавалю – режим повного розширення газу.....	212
12.5.2.	Нерозрахований режим роботи сопла Лавалю – режим повного розширення газу.....	213
12.5.3.	Нерозрахований режим роботи сопла Лавалю – режим перерозширення газу.....	214
	Контрольні запитання.....	216
Глава 13.	ЦИКЛИ ТУРБОРЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ.....	217
13.1.	Методика дослідження циклів.....	217
13.2.	Ідеальний цикл турбореактивних двигунів (цикл Брайтона)	218
13.3.	Ідеальний цикл турбореактивних двигунів з двоступеневим підведенням теплоти (форсований цикл Брайтона).....	222
13.4.	Реальний цикл турбореактивних двигунів.....	224
	Контрольні запитання.....	227
	ЛІТЕРАТУРА.....	229