


532.5  
Г46

С.М. Василенко, В.Р. Кулінченко  
О.Ю. Шевченко, В.А. Піддубний

# ГІДРОГАЗОДИНАМІКА



 **КОНДОР**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ**

**С. М. Василенко, В. Р. Кулінченко**

**О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний**

# **ГІДРОГАЗОДИНАМІКА**

**Київ**



**2016**

УДК 532.5  
ББК 22.253.3  
Г 464

*Рецензенти:* **О. М. Яхно**, доктор технічних наук (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»); **Б. І. Басок**, заступник директора з наукової роботи ІТТФ НАН України чл.-кор.НАН України, доктор технічних наук, професор;

**Г 464 Василенко С. М., Кулінченко В. Р., Шевченко О. Ю., Піддубний В. А.** Гідрогазодинаміка. – К.: Кондор-Видавництво, 2016. – 676 с.

ISBN 978-617-7278-58-9

Містить теоретичні основи отримані на підставі підвищеного і загального знання математики. Викладені основні закони і рівняння руху рідин і газів. Описані закономірності одномірного дво- і тримірного руху нестисливої ньютонівської і реологічної рідини. Подані основні поняття теорії подібності. Висвітлені основи приграничного шару під час ламінарного і турбулентного режимів руху.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямком підготовки «Теплоенергетика».

**УДК 532.5**  
**ББК 22.253.3**

ISBN 978-617-7278-58-9

© Василенко С. М.,  
Кулінченко В. Р.,  
Шевченко О. Ю.,  
Піддубний В. А., 2016  
© Кондор-Видавництво, 2016

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	8
<b>Умовні позначення</b> .....	14
<b>Розділ 1. Властивості рідини і газу</b> .....	16
1.1. Тиск, густина і вага одиниці об'єму.....	18
1.2. Класифікація режимів і течій руху рідини і газу.....	22
1.3. Поверхневий натяг. Швидкість розповсюдження звуку.....	29
<b>Розділ 2. Рівновага (статика) рідин і газів</b> .....	32
2.1. Напруга в рідинах, що знаходяться в рівновазі.....	32
2.2. Диференціальні рівняння рівноваги (рівняння гідростатики Ейлера).....	34
2.3. Рівновага в полі сил тяжіння.....	37
2.4. Сили тиску рідини на тверді поверхні.....	39
<b>Розділ 3. Кінематика рідин і газів</b> .....	43
3.1. Дві форми опису руху суцільного середовища.....	43
3.2. Лінії струменів і траєкторії.....	47
3.3. Рівняння нерозривності.....	49
3.4. Функції струменя для двомірних течій нестисливої рідини.....	52
3.5. Вихровий і безвихровий рухи.....	55
3.6. Потенціал швидкості і його зв'язок з функцією струменя.....	58
3.7. Основна теорема кінематики.....	66
<b>Розділ 4. Рівняння руху рідин і газів</b> .....	69
4.1. Напруга і деформації.....	69
4.2. Співвідношення між напругою і швидкостями деформацій для ньютонівських рідин.....	72
4.3. Рівняння балансу імпульсу.....	76
4.4. Рівняння Нав'є - Стокса.....	78
4.5. Приклади вирішення рівнянь Нав'є - Стокса.....	82
4.6. Рівняння (теорема) Бернуллі.....	95

<b>Розділ 5. Основи теорії подібності і розмірності</b> .....	111
5.1. Подібність фізичних явищ.....	112
5.2. Аналіз розмірностей і $\pi$ -теорема.....	117
5.3. Числа гідро газодинамічної подібності.....	124
5.4. Моделювання руху рідин і газів.....	132
5.5. Наближена подібність і моделювання.....	140
<b>Розділ 6. Турбулентний рух</b> .....	145
6.1. Виникнення турбулентності.....	147
6.2. Швидкість, енергія і умови нерозривності під час турбулентної течії.....	151
6.3. Турбулентна дотична напруга і турбулентна в'язкість.....	155
6.4. Рівняння Рейнольдса і супутні рівняння.....	160
6.5. Прості алгебраїчні моделі.....	167
6.6. Моделі з одним звичайним диференціальним рівнянням і моделі з одним рівнянням перенесення.....	184
6.7. Моделі з двома рівняннями.....	190
6.8. Інші методи розрахунку турбулентності.....	196
<b>Розділ 7. Течія рідин і газів у пограничному шарі</b> .....	197
7.1. Загальні властивості двомірного пограничного шару.....	198
7.2. Рівняння руху в пограничному шарі. Характерна товщина пограничного шару.....	200
7.3. Рішення Блазіуса для ламінарного пограничного шару. Інші рішення.....	208
7.4. Відрив пограничного шару.....	228
7.5. Наближені методи аналізу усталених пограничних шарів.....	233
<b>Розділ 8. Втрати енергії під час руху рідин і газів</b> .....	244
8.1. Втрати енергії на тертя.....	245
8.2. Втрати енергії на місцевих опорах.....	251
8.3. Опори, обумовлені дією геометричного тиску.....	270
8.4. Розрахунок гідравлічного опору трубопроводів.....	271

<b>Розділ 9. Витікання газів з отворів і сопел.....</b>	<b>281</b>
9.1. Витікання нестисливого газу.....	281
9.2. Витікання газу під високим тиском.....	284
<b>Розділ 10. Турбулентні газові струмені.....</b>	<b>309</b>
10.1. Основні властивості турбулентних струменів.....	309
10.2. Динаміка затопленого струменя.....	313
10.3. Розвиток турбулентного струменя у потоці супутньому або зустрічному.....	323
10.4. Зіткнення двох струменів у необмеженому просторі.....	338
10.5. Напівобмежені турбулентні струменеві течії.....	340
10.6. Обмежені турбулентні струменеві течії.....	352
<b>Розділ 11. Струменевий інжектор.....</b>	<b>360</b>
11.1. Суть інжекції.....	361
11.2. Рівняння інжекції.....	364
11.3. Умови працездатності інжектора і його оптимальні розміри.....	368
11.4. Конструктивні параметри інжектора і складання його характеристики.....	371
<b>Розділ 12. Рідинно-газові струминні апарати.....</b>	<b>378</b>
12.1. Область застосування і конструкції апаратів.....	378
12.2. Розрахунок рідинно-газових апаратів з компактним струменем.....	382
12.3. Основи розрахунку рідинно-газових апаратів з диспергованим струменем.....	395
12.4. Установки з рідинно-газовим струминними апаратами.....	396
12.4.1. Вакуумні установки з рідинно-газовими струминними апаратами.....	396
12.4.2. Установки для вакуумування відцентрових насосів перед пуском.....	396
12.4.3. Застосування ежекторів для зменшення тиску в	

ущільненнях відцентрових насосів.....	413
12.5. Струминні гідрокомпресорні установки.....	417
12.6. Струминні змішувачі для рідин і газів.....	422
12.6.1. Використання ежекторів як змішувачів рідин і газів.....	423
12.6.2. Використання ежекторів для отримання насичених розчинів газів у рідинах.....	423
12.7. Приклади розрахунку гідроструминних насосів.....	428
<b>Розділ 13. Струминні насоси для однорідних рідин.....</b>	<b>452</b>
13.1. Конструкції і принцип дії струминних насосів.....	452
13.2. Розрахунок і гідравлічні характеристики струминних насосів для однорідних рідин.....	462
13.3. Коефіцієнти корисної дії струминних насосів.....	484
13.4. Кавітаційні характеристики струминних насосів.....	490
13.5. Основи проектування гідроструминних насосів.....	499
<b>Розділ 14. Особливості руху газу у печах і пристрої, що приводять його в рух.....</b>	<b>513</b>
14.1. Розподіл потоків газу у лежаках і каналах в умовах неізотермічної течії.....	515
14.2. Будова і принцип роботи вентиляторів.....	527
14.3. Димарі. Робота і розрахунок.....	539
14.4. Особливості розрахунку руху рідин і газів у шарових печах і установках.....	544
<b>Розділ 15. Двофазні течії в трубах і каналах.....</b>	<b>556</b>
15.1. Характеристики двофазних потоків.....	556
15.2. Модель гомогенної течії.....	561
15.3. Модель роздільної течії.....	569
15.4. Модель потоку дрейфу.....	574
15.5. Системи рідина-газ.....	580
<b>Розділ 16. Чисельні методи у механіці рідин і газів.....</b>	<b>599</b>
16.1. Змінні вирувань і функція струменя.....	602
16.2. Первинні змінні для нестационарних течій.....	635

16.3. Перемінні змінні для стаціонарних течій.....	642
Питання для самоперевірки знань.....	649
Рекомендована література для курсу.....	654
Додатки.....	655
Д.1. Визначення.....	655
Д.2. Аналітичні вирази для векторних операцій.....	656
Д.3. Множення векторів та скалярів.....	656
Д.4. Диференціальні операції з векторами та скалярами.....	657
Д.5. Аналітичні вирази тензорних операцій.....	658
Д.6. Теорема Гауса-Остроградського (лема Гріна).....	659
Д.7. Одиниці фізичних величин.....	659
Д.8. Міжнародна система одиниць СІ(SI).....	661
Д.9. Написання позначень одиниць.....	662
Д.10. Когерентні одиниці величин, що застосовуються в механіці рідини.....	662
Д.11. Одиниці величин у рівняннях механіки рідини.....	663
Д.12. Одиниці величин під час застосування безрозмірних параметрів.....	663
Д.13. Кінематика рідини. Основні поняття.....	664
Д.14. Швидкість.....	664
Д.15. Прискорення.....	667
Д.16. Деформація, швидкість деформації.....	668
Д.17. Основні поняття динаміки рідини. Фізичні властивості реальних рідин.....	673