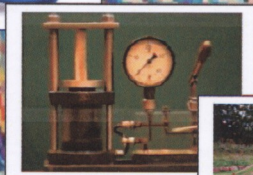


Альтман Е. І., Бошкова І. Л.

ГІДРАВЛІКА

Навчальний посібник



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Одеська національна академія харчових технологій

Альтман Е. І., Бошкова І. Л.

ГІДРАВЛІКА

Навчальний посібник

Одеса
2020

*Рекомендовано Вченою радою
Одеської національної академії харчових технологій
від 6 жовтня 2020 протокол № 3*

Рецензенти:

Петраш В. Д. – д. т. н., професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Одеської державної академії будівництва і архітектури;

Арсирій В. А. – д. т. н., професор, зав. кафедри прикладної екології та гідро-газодинаміки Одеського національного політехнічного університету;

Мазур В. О. – д. т. н., професор, зав. кафедри термодинаміки та відновлювальної енергетики Одеської національної академії харчових технологій.

Гідравліка : Навчальний посібник / Альтман Е. І., Бошкова І. Л. –
Г 46 Одеса: ФОП Бондаренко М. О., 2020. – 210 с.

ISBN 978-617-7829-88-0

Представлені методичні матеріали, в яких викладені загальні теоретичні відомості, необхідні для вивчення дисципліни «Гідравліка», а також варіанти завдань та питання для самоперевірки. Навчальний посібник складається з дванадцяти розділів: властивість рідин і газів, гідростатика, динаміка і кінематика рідини, рівняння руху рідини, рух рідини в трубах та гідравлічні опори, розрахунок трубопроводів, витікання рідини через отвори і насадки, силова взаємодія потоку рідини і твердого тіла, гідродинамічна подоба, елементи теорії гідродинамічного пограничного шару, гідравлічні машини.

Навчальний посібник розроблений для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології».

УДК 621.221-62/075.5

ISBN 978-617-7829-88-0

© Альтман Е. І., Бошкова І. Л., 2020

© Одеська національна академія
харчових технологій, 2020

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	8
ВСТУП	9
1 Властивості рідин і газів	14
1.1 Визначення рідини	14
1.2 Фізичні властивості рідини і газів	16
1.3 Абстрактні моделі рідини та газів	28
1.4 Сили, що діють у рідині (газі)	29
1.5 Питання для самоконтролю	32
1.6 Задачі	32
2 ГІДРОСТАТИКА	34
2.1 Основні поняття та визначення. Прилади для вимірювання тиску	34
2.2 Основне рівняння гідростатики. Епюри гідростатичного тиску	38
2.3 Закон Паскаля	39
2.4 Поняття про вільну поверхню, п'єзометричну висоту та п'єзометричну площину	40
2.5 Поняття про площину порівняння, гідростатичний і п'єзометричний напір	42
2.6 Диференціальне рівняння рівноваги рідини (рівняння Ейлера)	44
2.7 Рівновага рідини і газу в полі сил тяжіння	46
2.7.1 Рівновага рідини в полі сил тяжіння	46
2.7.2 Рівновага газів у полі сил тяжіння	47
2.8 Відносний спокій рідини	48
2.9 Сила гідростатичного тиску на плоскі та криволінійні поверхні	51
2.9.1 Сила гідростатичного тиску на плоску поверхню	51
2.9.2 Сила гідростатичного тиску на криволінійні поверхні	53
2.10 Закон Архімеда	55
2.11 Питання для самоконтролю	57

2.12	Задачі	58
3	ДИНАМІКА І КІНЕМАТИКА РІДИНИ	60
3.1	Класифікація рухів	60
3.2	Поняття про струминний рух рідини	61
3.3	Основні теореми кінематики	63
3.4	Рівняння нерозривності (суцільності)	64
3.5	Режими плин у в'язкій рідині	66
3.6	Кінематичні розходження між двома режимами плин у	69
3.7	Контрольні питання	71
3.8	Задачі	72
34	РІВНЯННЯ РУХУ РІДИНИ	73
4.1	Диференціальні рівняння руху ідеальної рідини	73
4.2	Інтегрування рівнянь Ейлера	75
4.3	Диференціальні рівняння в'язкої рідини. Рівняння Нав'є-Стокса	77
4.4	Рівняння Бернуллі для елементарного струмка ідеальної нестисливої рідини	78
4.5	Геометричний і енергетичний зміст рівняння Бернуллі. Діаграма Бернуллі для елементарного струмка ідеальної рідини	79
4.6	Рівняння Бернуллі для елементарного струмка в'язкої рідини	82
4.7	Рівняння Бернуллі для потоку ідеальної і реальної рідини	83
4.8	Використання рівняння Бернуллі для вирішення технічних задач	85
4.9	Питання для самоконтролю	89
4.10	Задачі	89
5	РУХ РІДИНИ В ТРУБАХ. ГІДРАВЛІЧНІ ОПОРИ	91
5.1	Загальні рівняння для визначення втрат напору	91
5.2	Ламінарний рух в'язкої рідини в трубах	92
5.2.1	Розподіл швидкості по перетину. Формула Стокса	92
5.2.2	Витрата рідини	94
5.2.3	Втрати напору на тертя. Формула Гагена - Пуазейля	95

5.3	Турбулентний рух рідини в трубах	96
5.3.1	Загальні зведення. Рівняння Рейнольдса	96
5.3.2	Розподіл швидкості при турбулентному руху	99
5.3.3	Втрати напору при турбулентному русі рідини. Поняття про гідрравлічні гладкі і шорсткуваті труби	102
5.4	Місцеві гідрравлічні опори	106
5.5	Питання для самоконтролю	109
5.6	Задачі	110
6	РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВОДІВ	111
6.1	Розрахунок простого трубопроводу	111
6.2	Розрахунок складного трубопроводу	118
6.2.1	Послідовне з'єднання трубопроводів	118
6.2.2	Рівнобіжне з'єднання трубопроводів	119
6.2.3	Розрахунок розгалуженого трубопроводу	123
6.2.4	Трубопровід з безперервною роздачею	126
6.2.5	Сифонний трубопровід	127
6.3	Гідрравлічний удар у трубах	128
6.4	Кавітація	133
6.5	Питання для самоконтролю	135
6.6	Задачі	136
7	ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ І НАСАДКИ	138
7.1	Витікання рідини через отвір при постійному напорі	139
7.2	Витікання рідини через затоплений отвір	142
7.3	Витікання рідини через насадки	143
7.4	Витікання рідини при перемінному напорі	147
7.5	Питання для самоконтролю	149
7.6	Задачі	150
8	СИЛОВА ВЗАЄМОДІЯ ПОТОКУ РІДИНИ І ТВЕРДОГО ТІЛА	151
8.1	Активна взаємодія між струменем і перешкодою	151
8.2	Реактивна взаємодія між струменем рідини і твердим тілом	153

8.3	Питання для самоконтролю	154
8.4	Задачі	155
9	ГІДРОДИНАМІЧНА ПОДОБА	156
9.1	Умови подоби	157
9.2	Критерії гідродинамічної подоби	158
9.3	Питання для самоконтролю	160
9.4	Задачі	160
10	ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПОГРАНИЧНОГО ШАРУ	162
10.1	Основні поняття	162
10.2	Рівняння гідродинамічного пограничного шару	164
10.3	Характеристики пограничного шару	166
10.4	Відрив гідродинамічного пограничного шару	168
10.5	Струминні течії	168
10.6	Питання для самоконтролю	172
10.7	Задачі	173
11	ГІДРАВЛІЧНІ МАШИНИ	174
11.1	Класифікація насосів	174
11.2	Схема насосної установки. Основні параметри насоса	175
11.3	Висота всмоктування насоса. Явище кавітації	177
11.4	Лопатеві насоси	179
11.4.1	Відцентрові насоси	179
11.4.2	Осьові насоси	182
11.5	Вибір параметрів насоса, що працює на гідравлічну мережу. Робоча точка насоса	183
11.6	Регулювання режиму роботи відцентрового насоса	185
11.6.1	Регулювання засувкою (дресселюванням)	185
11.6.2	Регулювання зміною частоти обертання робочого колеса	186
11.6.3	Регулювання перепуском (байпасуванням)	186
11.6.4	Регулювання зменшенням діаметра робочого колеса шляхом	188

його обточки

11.7	Послідовна та паралельна робота насосів на мережу	188
11.8	Об'ємні насоси	190
11.8.1	Поршневі насоси	191
11.8.2	Пластинчато-роторні насоси	193
11.8.3	Шестерневі насоси	195
11.9	Гвинтові насоси	196
11.10	Питання для самоконтролю	198
12	ГАЗОДИНАМІКА	200
12.1	Основні рівняння газодинаміки. Параметри гальмування	200
12.2	Параметри гальмування газового потоку. Гранична швидкість руху газу	202
12.3	Критичні параметри. Число Маха. Коефіцієнт швидкості	203
12.4	Питання для самоконтролю	205
12.5	Задачі	206
	Рекомендована література	207

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник до курсу «Гідравліка» призначений для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів за спеціальністю спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології.

Гідравлічні системи є однією з основних складових структурних елементів більшості механізмів і машин, що реалізують технологічні процеси транспорту нафти. Ефективність експлуатації об'єктів нафтогазової галузі визначається значною кількістю факторів, які ускладнюють прогнозування робочого процесу нафтогазового обладнання. В цих умовах суттєво зростають вимоги до сучасних методів аналітичного визначення гідродинамічних характеристик гідравлічних систем.

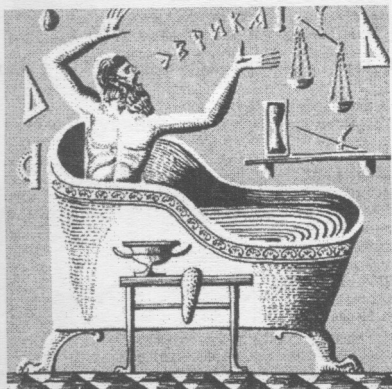
Матеріал, викладений в посібнику, дасть можливість студентам при самостійній роботі вникнути в матеріал курсу, а також більш глибоко освоїти лекційний матеріал. Посібник складається з 12 розділів, в яких викладений аналіз наступних складових курсу: основні фізичні властивості рідин і газів; загальні закони і рівняння статички, кінематики та динаміки рідин і газів; сили, діючі в рідинах; абсолютний і відносний спокій (рівновагу) рідких середовищ; модель ідеальної (нев'язкої) рідини; загальна інтегральна форма рівнянь кількості руху і моменту кількості руху; подоби гідромеханічних процесів; загальне рівняння енергії в інтегральній і диференціальній формі; одномірні струми рідин і газів; плоский (двовимірне) рух ідеальної рідини; рівняння руху для в'язкої рідини; приграничний шар; опір тіл, обтічних в'язкою рідиною; опір при плинні рідини в трубах; місцеві опори; турбулентність і її основні характеристики; рівняння Нав'є - Стокса і Рейнольдса; надзвукові течії; гідравлічні машини, їх класифікація та методи регулювання насосів; особливості процесів течії газів, параметри гальмування та критичні параметри.

ВСТУП

Об'єкти, досліджувані наукою гідрогазодинаміка, ми зустрічаємо на кожнім кроці. І самі ми, і усе, що нас оточує, рухається або в повітрі (птахи, автомобілі, літаки), або у воді (риби, дельфіни, підводні і надводні судна). Людині приходить вивчати повітряні і морські течії, приливні і вітрові

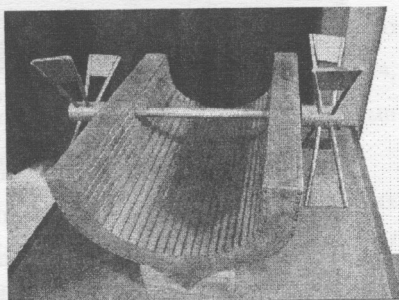
хвилі, рух нафти і газу в тисячокілометрових трубах, плин крові в мікроскопічних кровоносних судинах.

Гідромеханіка, як і всяка наука, виникла і розвивається відповідно до потреб практики. Відповідаючи запитам древніх кораблебудівників, Архімед (287-212 р. до н.е.) сформулював закони плавання і стійкості тіл, що плавають.



Під сильним впливом Аристотеля довгий час знаходився Леонардо да Вінчі, що у 1506 р. установив поняття опору рідких і газоподібних середовищ тілам, що рухаються в них. Однак опір приймався як стиск повітря в лобовій частині тіла.

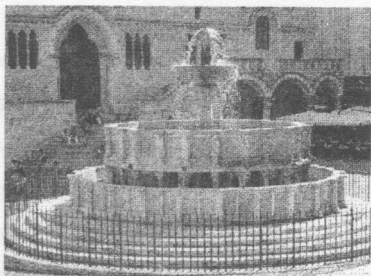
Аналогічне пояснення дав Леонардо да Вінчі і походженню піднімальної сили, що підтримує птаха в польоті, вважаючи, що повітря, стискаючись під крилом, тим самим створює опору для крила.



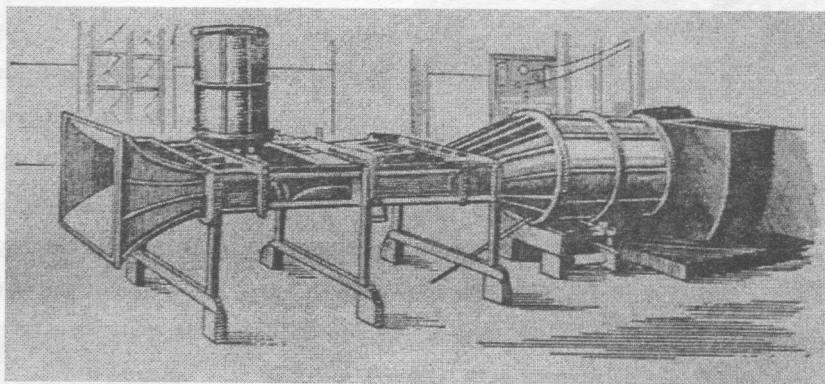
Колесна лодка Леонардо да Вінчі

Будівництво каналів, гребель, шлюзів, фонтанів, подальший розвиток суднобудування і мореплавання в XVII – XVIII вв. служило серйозним стимулом для розвитку гідромеханіки. Саме в цей час з'явилися

фундаментальні роботи Д. Бернуллі, Л. Ейлера. Термін «гідродинаміка» увів Бернуллі, і його книга, що вийшла в 1748 р., так і називалася. Ейлер вивів загальні рівняння руху невязкої рідини, якими ми користуємося і в даний час.



Зародження і розвиток авіації зумовило розширення робіт з аеродинаміки літальних апаратів. І тут насамперед варто згадати професора Н.Е. Жуковського, формули і профілі його дотепер відіграють велику роль в аеродинаміці.



Експериментальна аеродинаміка Н. Е. Жуковського

Якщо всім відомо, що літаки або кораблі на підводних крилах своїми якостями зобов'язані досягненням гідроаеродинаміки, то деяким відомо, що задачу про вхід космічного літального апарата в атмосферу Землі або іншої планети також вирішують гідродинаміки.

Конкретна задача про повернення космічного корабля або балістичної ракети на Землю через щільні шари атмосфери породила численні дослідження з боротьби з розігрівом поверхні твердого тіла за рахунок тепла, що виникає при дисипації механічної енергії потоку поблизу поверхні тіла, із

плавленням або сублімацією поверхні корпусу корабля. І якщо згодом людина створить керовану термоядерну реакцію, то в цьому буде заслуга не



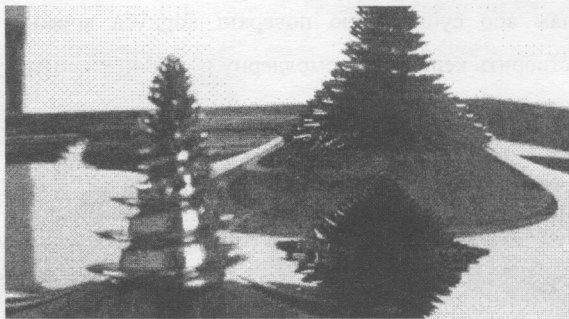
тільки фізиків, але і гідродинаміків.

Досягнення механіки рідини і газу використовують багато областей техніки. Авіація і корабельобудівництво, основними проблемами яких є

швидкість, стійкість і керованість літака, ходовість, стійкість і керованість судна. Важливе значення має гідроаеродинаміка і газодинаміка в турбобудуванні і двигунобудуванні, особливо в створенні реактивних і ракетних двигунів. Проточні частини гідротурбін, парової і газової турбін, реактивного двигуна, компресора або насоса являють собою складні конструкції, що складаються з ряду нерухомих (направляючі апарати) і рухливих (робочі колеса) лопатевих систем. При обертанні робочих коліс складові їх лопатки обтикаються з великими відносними швидкостями водою, газом або паром. Від правильного гідродинамічного розрахунку форми профілів і конструкції лопаток залежить досягнення необхідної потужності машини, її високого коефіцієнта корисної дії.

Широко використовує механіку рідини і газу сучасна теплотехніка, що займається інтенсифікацією процесів горіння в топках парових котлів, камерах горіння газових турбін, реактивних і ракетних двигунів, питаннями охолодження поверхонь, що піддаються дії гарячого газу.

Металургія висуває перед механікою рідини і газу багато важливих задач, зв'язаних з підвищенням ефективності роботи металургійних печей. У зв'язку з питаннями ливарного виробництва особливий клас задач постав перед новим розділом МЖГ – магнітної гідродинаміки.



Феромагнітна рідина

Зараз уже ввійшло в практику використання взаємодії потоку рідини, яка добре проводить електричний струм, з магнітними полями. Гідробудівництво, нафтова гідромеханіка (вивчаюча процеси видобутку нафти і природного газу і складні задачі дослідження руху – фільтрації – двофазного середовища крізь пористі шари і шпари в земній породі), сучасна метеорологія – широко використовує механіку стисливої рідини і теорію турбулентного руху повітря над поверхнею Землі.

Відзначимо, що рух газових мас, що утворюють туманності і зірки, розширення оболонок нових зірок, утворення і вгасання турбулентних збурювань у міжзоряному середовищі складають зміст космічної аеродинаміки.

Гідравліка – прикладна інженерна наука, у якій вивчаються закони рівноваги і руху краплинних рідин, а також методи їхнього застосування в різних областях інженерної практики. У першій частині розглядаються закони рівноваги рідин – гідростатика, у другий – закони руху рідин (основи гідродинаміки).

Для розпізнавання явищ і встановлення причин їх виникнення широко застосовуються спрощені методи рішення задач, що також дуже корисно для інженерної практики.

Газодинаміка — розділ механіки, який вивчає закони руху газоподібного середовища і її взаємодії з рухомими в ній твердими тілами. Частіше зустрічається під назвою аеродинаміка, але включає в себе не тільки аеродинаміку, але і власне газову динаміку. Остання історично виникла як подальший розвиток і узагальнення аеродинаміки, і саме тому часто говорять про єдиної науці - аерогазодинаміки. Як частина фізики, аерогазодинаміка тісно пов'язана з термодинамікою і акустикою.

На відміну від класичної аеродинаміки, газова динаміка має справу з такими завданнями, в яких стисливість газу, яка стає істотним фактором, що впливає на його поведінку. В першу чергу, це - завдання про рух газових потоків зі швидкостями, близькими або вищими за швидкість звуку в газі, що призводить до появи значних перепадів тиску і ударних хвиль. Виникнення газової динаміки відноситься до середини і другої половини XIX століття і пов'язано з основоположними роботами Х. Допплера, Г. Рімана, Е. Маха, У. Дж. Ранкина і П.-А. Гюгоньо. Бурхливий розвиток даний розділ механіки переживає в XX столітті; серед багатьох імен учених, що внесли значний вклад в розвиток газової динаміки, слід назвати С. А. Чаплигіна, Дж. Тейлора, Л. І. Седова, Я. Б. Зельдовича, М. Е. Дейча.