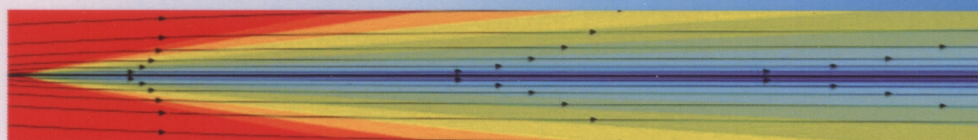
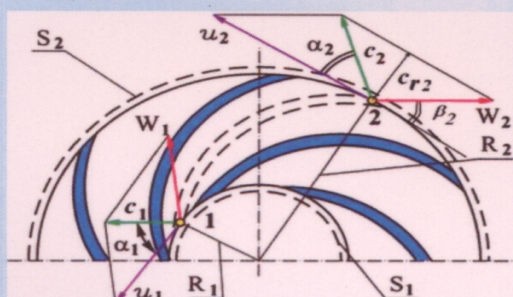


Е. І. Альтман, І. Л. Бошкова

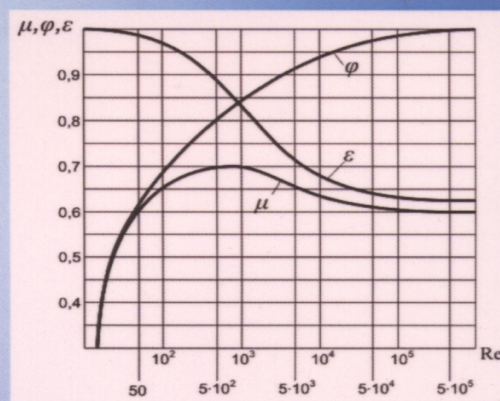


ГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Навчальний посібник



$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_{cp1}^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_{cp2}^2}{2g} + h_w$$



$$\frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}P + F + \nu \nabla^2 \bar{V}$$

$$Xdx + Ydy + ZdZ = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} dx + \frac{\partial P}{\partial y} dy + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right)$$

532 (075)
А 58

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

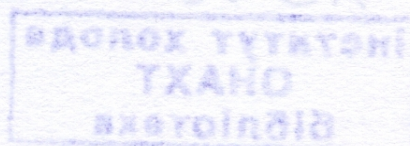
Одеська національна академія харчових технологій

Альтман Е. І., Бошкова І. Л.

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Навчальний посібник

Одеса
2019



УДК 621.221-62/075.5

Г 46

*Рекомендовано вченою радою
Одеської національної академії харчових технологій
від 07.05.2019 (протокол № 10)*

Рецензенти:

Дем'янчук Б. О. – д. т. н., проф., зав. кафедри технічного забезпечення Військової академії (м. Одеса);

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

Артеменко С. В. – д. т. н., проф., зав. кафедри комп'ютерної інженерії Одеської національної академії харчових технологій.

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА: навчальний посібник / Альтман Е. І.,
Г 46 Бошкова І. Л. – Одеса: Бондаренко М. О., 2019. – 188 с., ілл.

ISBN 978-617-7613-75-5

Представлені методичні матеріали, в яких викладені загальні теоретичні відомості, необхідні для вивчення дисципліни «Гідрогазодинаміка», а також варіанти завдань, вихідні дані до них, схеми, питання для самоперевірки. Навчальний посібник складається з одинадцяти 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 подoba, елементи теорії гідродинамічного пограничного шару, газодинаміка.

Навчальний посібник розроблений для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.221-62/075.5

ISBN 978-617-7613-75-5

© Альтман Е. І., 2019

© Бошкова І. Л., 2019

x540273

ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
бібліотека

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
ВСТУП	8
1 Властивості рідин і газів	13
1.1 Визначення рідини	13
1.2 Фізичні властивості рідини і газів	15
1.3 Абстрактні моделі рідини та газів	27
1.4 Сили, що діють у рідині (газі)	28
1.5 Питання для самоконтролю	31
1.6 Задачі	31
2 ГІДРОСТАТИКА	33
2.1 Основні поняття та визначення. Прилади для вимірювання тиску	33
2.2 Основне рівняння гідростатики. Епюри гідростатичного тиску	37
2.3 Закон Паскаля	38
2.4 Поняття про вільну поверхню, п'єзометричну висоту та п'єзометричну площину	39
2.5 Поняття про площину порівняння, гідростатичний і п'єзометричний напір	41
2.6 Диференціальне рівняння рівноваги рідини (рівняння Ейлера)	43
2.7 Рівновага рідини і газу в полі сил тяжіння	45
2.7.1 Рівновага рідини в полі сил тяжіння	45
2.7.2 Рівновага газів у полі сил тяжіння	46
2.8 Відносний спокій рідини	47
2.9 Сила гідростатичного тиску на плоскі та криволінійні поверхні	50
2.9.1 Сила гідростатичного тиску на плоску поверхню	50
2.9.2 Сила гідростатичного тиску на криволінійні поверхні	52
2.10 Закон Архімеда	54
2.11 Питання для самоконтролю	56
2.12 Задачі	57

3	ДИНАМІКА І КІНЕМАТИКА РІДИНИ	59
3.1	Класифікація рухів	59
3.2	Поняття про струминний рух рідини	60
3.3	Основні теореми кінематики	62
3.4	Рівняння нерозривності (суцільності)	63
3.5	Режими плину в'язкої рідини	65
3.6	Кінематичні розходження між двома режимами плину	68
3.7	Контрольні питання	70
3.8	Задачі	71
3.4	РІВНЯННЯ РУХУ РІДИНИ	72
4.1	Диференціальні рівняння руху ідеальної рідини	72
4.2	Інтегрування рівнянь Ейлера	74
4.3	Диференціальні рівняння в'язкої рідини. Рівняння Нав'є-Стокса	76
4.4	Рівняння Бернуллі для елементарного струмка ідеальної нестисливої рідини	77
4.5	Геометричний і енергетичний зміст рівняння Бернуллі. Діаграма Бернуллі для елементарного струмка ідеальної рідини	78
4.6	Рівняння Бернуллі для елементарного струмка в'язкої рідини	81
4.7	Рівняння Бернуллі для потоку ідеальної і реальної рідини	82
4.8	Використання рівняння Бернуллі для вирішення технічних задач	84
4.9	Питання для самоконтролю	88
4.10	Задачі	88
5	РУХ РІДИНИ В ТРУБАХ. ГІДРАВЛІЧНІ ОПОРИ	90
5.1	Загальні рівняння для визначення втрат напору	90
5.2	Ламінарний рух в'язкої рідини в трубах	91
5.2.1	Розподіл швидкості по перетину. Формула Стокса	91
5.2.2	Витрата рідини	93
5.2.3	Втрати напору на тертя. Формула Гагена - Пуазейля	94
5.3	Турбулентний рух рідини в трубах	95
5.3.1	Загальні зведення. Рівняння Рейнольдса	95

5.3.2	Розподіл швидкості при турбулентному руху	98
5.3.3	Втрати напору при турбулентному русі рідини. Поняття про гідравлічні гладкі і шорсткуваті труби	101
5.4	Місцеві гідравлічні опори	105
5.5	Питання для самоконтролю	108
5.6	Задачі	109
6	РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВODІВ	110
6.1	Розрахунок простого трубопроводу	110
6.2	Розрахунок складного трубопроводу	116
6.2.1	Послідовне з'єднання трубопроводів	116
6.2.2	Рівнобіжне з'єднання трубопроводів	117
6.3	Гідравлічний удар у трубах	119
6.5	Кавітація	124
6.5	Питання для самоконтролю	126
6.6	Задачі	127
7	ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ І НАСАДКИ	128
7.1	Витікання рідини через отвір при постійному напорі	129
7.2	Витікання рідини через затоплений отвір	132
7.3	Витікання рідини через насадки	133
7.4	Витікання рідини при перемінному напорі	137
7.5	Питання для самоконтролю	139
7.6	Задачі	140
8	СИЛОВА ВЗАЄМОДІЯ ПОТОКУ РІДИНИ І ТВЕРДОГО ТІЛА	141
8.1	Активна взаємодія між струменем і перешкодою	141
8.2	Реактивна взаємодія між струменем рідини і твердим тілом	143
8.3	Питання для самоконтролю	144
8.4	Задачі	145
9	ГІДРОДИНАМІЧНА ПОДОБА	146
9.1	Умови подоби	147
9.2	Критерії гідродинамічної подоби	148

9.3	Питання для самоконтролю	150
9.4	Задачі	150
10	ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПОГРАНИЧНОГО ШАРУ	152
10.1	Основні поняття	152
10.2	Рівняння гідродинамічного пограничного шару	154
10.3	Характеристики пограничного шару	156
10.4	Відрив гідродинамічного пограничного шару	158
10.5	Струминні течії	159
10.6	Питання для самоконтролю	162
10.7	Задачі	163
11	ГАЗОДИНАМІКА	164
11.1	Основні рівняння газодинаміки. Параметри гальмування	164
11.2	Параметри гальмування газового потоку. Гранична швидкість руху газу	166
11.3	Критичні параметри. Число Маха. Коефіцієнт швидкості	168
11.4	Прямий стрибок ущільнення	170
11.5	Газодинамічні функції	174
11.6	Одномірні газові потоки. Закон звертання впливу	176
11.7	Рух газу в соплах і дифузорах	181
11.8	Питання для самоконтролю	184
11.8	Задачі	185
	Рекомендована література	186

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник до курсу «Гідрогазодинаміка» призначений для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів за спеціальністю спеціальності 144 Теплоенергетика та 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Необхідність вивчення гідрогазодинаміки студентами даних спеціальностей пов'язана з тим, що рідини і гази є основними робочими середовищами практично на всіх етапах енергетичних процесів, в тому числі і при отриманні низьких температур: як паливо і продукти його горіння, в енергоперетворюючих пристроях (турбінах, реактивних двигунах, двигунах внутрішнього згорання, парових двигунах, енергетичних установках і т.п.), як основний енергоносіє в системах транспорту тепла і холоду, як основний елемент навколишнього природного середовища (вода і повітря).

Матеріал, викладений в посібнику, дасть можливість студентам при самостійній роботі вникнути в матеріал курсу, а також більш глибоко освоїти лекційний матеріал. Посібник складається з 11 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 приплин рідини в трубах; місцеві опори; турбулентність і її основні характеристики; рівняння Нав'є - Стокса і Рейнольдса; надзвукові течії; скачки ущільнень; особливості двокомпонентних і двофазних течій; теплової стрибок і стрибки ущільнення.

ВСТУП

Об'єкти, досліджувані наукою гідрогазодинаміка, ми зустрічаємо на кожному 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 приходится вивчати повітряні і морські течії, приливні і вітрові

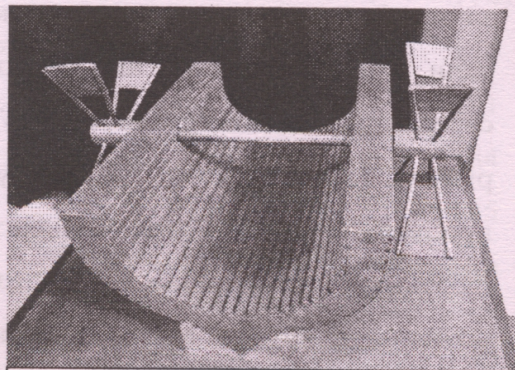


хвилі, рух нафти і газу в тисячокілометрових трубах, плин крові в мікроскопічних кровоносних судинах.

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.

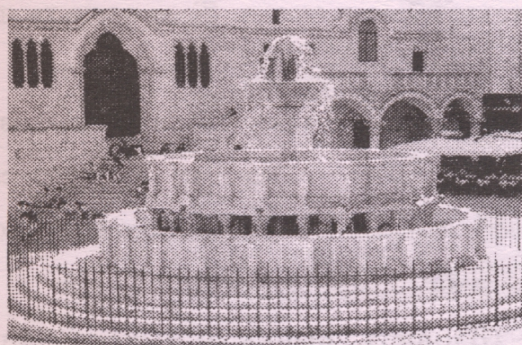
Аналогічне пояснення дав Леонардо да Вінчі і походженню піднімальної сили, що підтримує птаха в польоті, вважаючи, що повітря, стискаючись під крилом, тим самим створює опору для крила.



Колесна лодка Леонардо да Вінчі

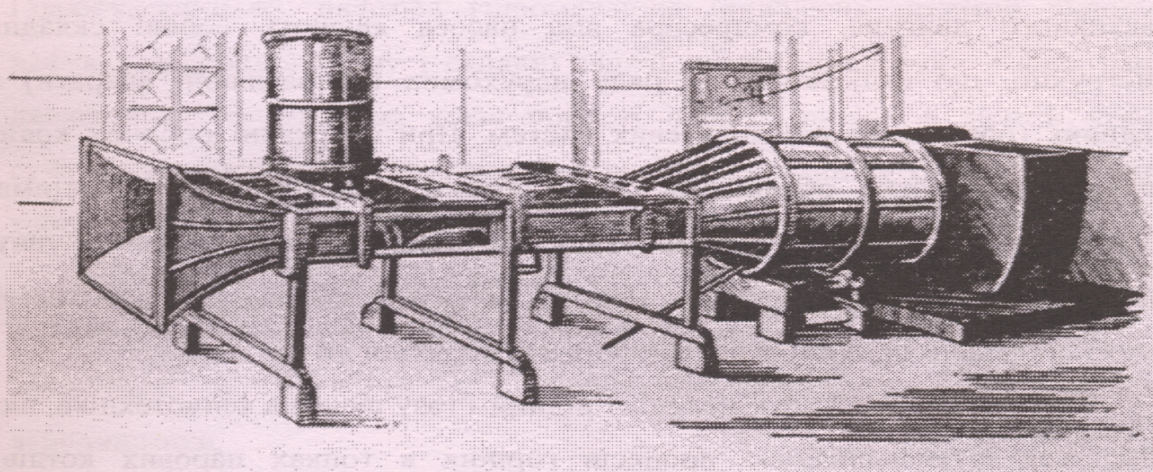
Будівництво каналів, гребель, шлюзів, фонтанів, подальший розвиток суднобудування і мореплавання в XVII – XVIII вв. служило серйозним стимулом для розвитку гідромеханіки. Саме в цей час з'явилися

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 нев'язкої 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.

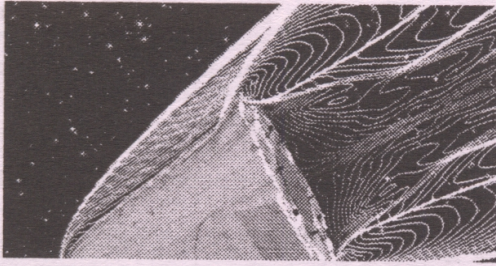


Експериментальна аеродинаміка Н. Е. Жуковського

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 сублимацією 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 корабелебудівництво, 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 гідротурбіни, 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 (вивчаючи 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.

Предмет вивчення даної дисципліни містить дві складові: гідравліку та газодинаміку.

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 половині 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.



Альтман Елла Іллівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв Одеської національної академії харчових технологій. Більше 40 років займається науково-дослідною та викладацькою роботою в області гідромеханіки однофазних і двофазних потоків, математичним моделюванням термогідродинамічних процесів і систем охолодження. Тема дисертації: «Колекторні системи терморегулювання електронної апаратури на основі холодильних машин та двофазних контурів». Опублікувала понад 60 наукових робіт, в тому числі 5 навчальних посібників.



Бошкова Ірина Леонідівна, доктор технічних наук, професор кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв Одеської національної академії харчових технологій. Досвід наукової роботи в області дослідження теплових та гідродинамічних процесів складає понад 40 років, викладацької – понад 20 років. Тема кандидатської дисертації – «Термоакустичні явища при кипінні рідини в парогенеруючих каналах РЕА» (1995), докторської дисертації – «Інтенсифікація процесів теплопереносу в рослинних матеріалах при дії мікрохвильового електромагнітного поля» (2015). За період наукової діяльності опубліковано понад 140 статей та отримано 9 патентів, є співавтором 3 монографій та 5 навчальних посібників.

