

Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка

Колектив авторів: **О. М. Яхно, О. В. Узунов, О. Ф. Луговський,
В. А. Ковальов, А. В. Мовчанюк, І. В. Коц,
О. П. Губарев**

За ред. О. М. Яхна

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
Вінницький національний технічний університет**

Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка

За ред. О. М. Яхна

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів

**Вінниця
ВНТУ
2017**

УДК532.5-533.6; 62-552.2, 525; 681.5; 62-82:658; 621.372
ББК 30.123:32.966

П75

Автори: **О. М. Яхно, О. В. Узунов, О. Ф. Луговський, В. А. Ковальов, А. В. Мовчанюк, І. В. Коц, О. П. Губарев**

Рекомендовано до видання Міністерством освіти і науки України
(Лист № 1/11-1135 від 29 січня 2014 р.)

Рецензенти:

- В. Д. Акіншин***, доктор фізико-математичних наук, професор (головний науковий співробітник Академії пожежної безпеки МНС України)
С. А. Бичков, доктор технічних наук, професор (головний інженер ДП «Антонов»)
С. І. Криль, доктор технічних наук, професор (завідувач відділом Інституту Гідромеханіки НАН України)
З. Я. Лур'є, доктор технічних наук, професор (професор кафедри гідравлічних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»)

П75 **Прикладна** гідроаеромеханіка і механотроніка : підручник / О. М. Яхно, О. В. Узунов, О. Ф. Луговський та ін. ; за ред. О. М. Яхна. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 711 с.

ISBN 978-966-641-687-5

У підручнику проаналізовані основні закони механіки і гідроаеромеханіки. Показано принцип дії та використання нових ультразвукових кавітаційних пристроїв, розглянуто принципи побудови, моделювання і проектування електронно-механічних систем та устаткування, наведені дані стосовно сенсорних засобів контролю і комп'ютерного управління систем механотроніки, розглянуті приклади розв'язання практичних задач. Підручник рекомендується для поглибленого вивчення студентами різних форм навчання, магістрантами та аспірантами напрямків підготовки, чий фах орієнтований на створення і використання автоматизованих виробничих систем та інтелектуальної техніки в складних експлуатаційних та виробничих процесах.

УДК 532.5-533.6; 62-552.2, 525; 681.5; 62-82:658; 621.372
ББК 30.123:32.966

ISBN 978-966-641-687-5

© Заг. редакція, Яхно О. М., 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	11
ВСТУП	13
ЧАСТИНА I ТЕХНІЧНА ГІДРОДИНАМІКА	16
РОЗДІЛ 1 РОБОЧІ РІДИНИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ	16
1.1 В'язкість робочих рідин	17
1.2 Поверхневий натяг і поверхнева енергія	23
1.3 Густина робочої рідини	25
Література для самостійного вивчення розділу 1	29
РОЗДІЛ 2 ЯВИЩЕ ПЕРЕНОСУ В ГІДРОМЕХАНІЦІ	30
2.1 Перенос кількості руху	31
2.2 Перенос енергії, загальні рівняння енергії	34
2.3 Дисипація енергії в рідині	35
Література для самостійного вивчення розділу 2	38
РОЗДІЛ 3 ЛАМІНАРНИЙ РУХ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ	40
3.1 Течія Куетта	40
3.2 Рух рідини у циліндричному каналі	41
3.3 Рух рідини в зазорі між коаксіальними циліндрами	42
3.4 Ламінарний нестабілізований рух в'язкої рідини	44
Література для самостійного вивчення розділу 3	48
РОЗДІЛ 4 ТУРБУЛЕНТНИЙ РУХ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ	49
4.1 Нестабілізований турбулентний рух	51
4.2 Перехід від ламінарного руху рідини до турбулентного	52
Література для самостійного вивчення розділу 4	53
РОЗДІЛ 5 ГІДРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПОДІБНІСТЬ РУХУ В'ЯЗКИХ РІДИН	54
5.1 Одержання гідродинамічних критеріїв подібності на основі π -теореми	56
5.2 Подібність електромагнітних явищ у гідродинаміці	59
5.3 Особливості руху рідини у магнітному полі	62
Література для самостійного вивчення розділу 5	68
РОЗДІЛ 6 ВЗАЄМОДІЯ ПОТОКУ РІДИНИ З ТВЕРДИМИ ТІЛАМИ	70
6.1 Загальна характеристика взаємодії	70
6.2 Характерні особливості взаємодії потоку з твердим тілом	71

6.2.1 Відрив потоку від поверхні аеродинамічного профілю	72
6.2.2 Взаємодія потоку з твердими тілами з різною геометрією	77
6.2.3 Відрив потоку в каналах	81
6.3 Гідравлічні струмені	84
6.3.1 Занурені струмені	85
6.3.2 Незанурені струмені низького тиску	87
6.3.3 Взаємодія струменів з поверхнями	90
6.4 Гідравлічні струмені в системах гідропневмоавтоматики	90
6.5 Газові струмені	97
6.6 Гідравлічні струмені високого тиску	103
6.7 Взаємодія струменів з твердою поверхнею	105
6.7.1 Визначення лобового опору пластини струменю	107
6.8 Рідинні плівки	108
Література для самостійного вивчення розділу 6	113

РОЗДІЛ 7 ПАРАДОКСИ ГІДРОМЕХАНІКИ

7.1 Парадокс оборотності	115
7.2 Парадокс Даламбера і ефект Магнуса	115
7.3 Парадокс рівнянь Нав'є – Стокса	116
7.4 Парадокс неаналітичності	116
7.5 Парадокс турбулентності	117
7.6 Парадокс примежевого шару	117
7.7 Парадокси Ейфеля і Дюбуа	117
7.8 Парадокс Стокса	118
7.9 Ковзання рідини	118
7.10 Парадокс бульбашки	118
Література для самостійного вивчення розділу 7	119
Література до частини I	119

ЧАСТИНА II ВСТУП ДО МЕХАНОТРОНІКИ

РОЗДІЛ 1 МЕХАНІКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

1.1 Задачі і об'єкти механотроніки	122
1.2 Склад і будова систем	128
1.3 Виконавчі пристрої систем мехатроніки	133
1.4 Задачі і технічні можливості сучасної електроніки	148
1.4.1 Сенсори – засоби збирання і передачі інформації	150
1.4.2 Апаратне забезпечення мехатронних систем	153
1.5 Особливості моделювання і проектування об'єктів механотроніки	155
1.6 Особливості механіки в задачах керування	165
1.7 Питання для самоперевірки	171
Література до розділу 1	172

РОЗДІЛ 2 ЗАКОНИ МЕХАНІКИ В СИСТЕМАХ МЕХАНОТРОНІКИ	176
2.1 Досягнення і основоположники гідромеханіки	176
2.2 Закони механіки	176
2.2.1 Явища і види переносу в механотронних системах	176
2.2.2 Сили, що діють на матеріальне тіло	180
2.2.3 Закони Ньютона.....	182
2.2.4 Закон збереження маси	184
2.2.5 Закон збереження імпульсу	184
2.2.6 Енергія і закон збереження енергії	186
2.2.7 Накопичення та дисипація енергії.....	188
2.2.8 Теорема про зміну кількості руху.....	190
2.2.9 Реологічні закони	191
2.3 Закони гідромеханіки	195
2.3.1 Основні закони рідини, що знаходиться у стані спокою	195
2.3.2 Рух в'язкої рідини	195
2.3.3 Закон Д. Бернуллі	197
2.3.4 Режими руху рідини.....	199
2.3.5 Основні закони ламінарного руху рідини.....	200
2.3.6 Основні закони турбулентного руху рідини	203
2.3.7 Закони гідравлічного тертя	204
2.3.8 Місцеві втрати енергії.....	207
2.4 Закони газової і магнітної динаміки, що використовуються у механотроніці	207
2.4.1 Закони газової динаміки	207
2.4.2 Закони магнітної гідродинаміки	210
2.5 Питання для самоперевірки	214
Література до розділу 2	215

РОЗДІЛ 3 УЛЬТРАЗВУКОВА КАВІТАЦІЯ В МЕХАТРОННИХ СИСТЕМАХ.....	216
3.1 Застосування ультразвукової кавітації в технологічних процесах.....	216
3.1.1 Природа та особливості ультразвукової кавітації.....	217
3.1.2 Технологічні процеси із використанням ультразвукових коливань великої інтенсивності	225
3.1.3 Ультразвукова технологія отримання дрібнодисперсного аерозолю	227
3.1.4 Ультразвукова кавітаційна технологія вилучення пектину з рослинної сировини	232
3.1.5 Ультразвукова кавітаційна технологія знезараження води	238
3.2 Мехатронні системи та обладнання для реалізації ультразвукових кавітаційних технологій	241
3.2.1 Обладнання для ультразвукового розпилення рідин.....	241
3.2.1.1 Особливості ультразвукового розпилення рідин	241
3.2.1.2 Фізична модель процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі.....	253

3.2.1.3 Системи постачання рідини та регулювання продуктивності ультразвукових диспергаторів	257
3.2.1.4 Особливості побудови багатоточкових мехатронних систем ультразвукового розпилення	260
3.2.2 Приклади мехатронних систем із застосуванням ультразвукових диспергаторів	267
3.2.2.1 Ультразвукові диспергатори в системах підготовки паливно-повітряної суміші для двигунів внутрішнього згоряння	267
3.2.2.2 Автоматична система ультразвукового розпилення рідини в парогенераторі потужністю 1 МВт	272
3.2.2.3 Мехатронні системи штучного мікроклімату в медицині та сільському господарстві	273
3.3 Обладнання для ультразвукової кавітаційної обробки рідин та очищення поверхонь	277
3.3.1 Особливості проектування та використання відкритих кавітаційних ванн з плоскими поверхнями	277
3.3.2 Методики проектування та особливості застосування циліндричних кавітаційних камер	288
3.3.3 Приклади застосування ультразвукових кавітаційних камер у мехатронних системах	295
3.3.3.1 Ультразвукова кавітація в технологічному процесі ферментного гідролізу відходів деревини та сільського господарства	295
3.3.3.2 Ультразвукова кавітаційна обробка пластової води в технологічному процесі видобування нафти	298
3.3.3.3 Апаратні засоби для ультразвукового кавітаційного очищення деталей	299
3.4 Запитання для самоконтролю	300
Література до розділу 3	302
РОЗДІЛ 4 ОСНОВИ СЕНСОРНОЇ ТЕХНІКИ	314
4.1 Безконтактні сенсори	315
4.2 Ультразвукові сенсори	321
4.3 Сенсори з інфрачервоним випромінюванням	324
4.4 Тепловізори	325
4.5 Сенсори температури	327
4.6 Анемометричні сенсори	329
4.7 Сенсори положення – позиціонери	331
4.8 Сенсори тиску	333
4.9 Сенсори дальності (наближення)	335
4.10 Сенсори рівня	338
4.11 Сенсор кута повороту	341
4.12 Тахометричні сенсори	343
4.13 Перспективи розвитку сенсорної бази систем мехатроніки	345
Література до розділу 4	351

РОЗДІЛ 5 МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ	353
5.1 Моделювання об'єктів механотроніки	354
5.1.1 Моделі: застосування, поняття і типи	354
5.1.2 Моделювання в мехатроніці	358
5.1.3 Приклад розв'язання задачі моделювання	361
5.1.4 Особливості застосування циклічно-модульного підходу до задачі моделювання	371
5.1.5 Приклад моделювання гідромеханічного перетворювача за допомогою циклічно-модульного підходу	376
5.1.6 Загальні зауваження	381
5.2 Проектування об'єктів мехатроніки	382
5.2.1 Будова об'єкту і підходи до проектування	382
5.2.2 Циклічно-модульний підхід для побудови об'єктів мехатроніки	390
5.2.3 Оцінювання ефективності застосування циклічно-модульного підходу	398
5.2.4 Зміст етапів проектування об'єкта	403
5.2.5 Проектування запобіжного клапана	446
5.3 Питання для самоперевірки	454
Література до розділу 5	455
РОЗДІЛ 6 СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ І ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ СИСТЕМ	460
6.1 Особливості будови систем	460
6.1.1 Передумови структурної будови систем	460
6.1.2 Будівельний склад механотронних систем	462
6.1.3 Системний елемент об'єктів механотроніки	464
6.1.4 Функції модульної станції	466
6.1.5 Зміст виробництва об'єднує модульні станції в систему	468
6.1.6 Зворотний зв'язок в модульній системі	471
6.1.7 Перехід від міркування до формальної логіки	475
6.1.8 Впорядкування умовних позначень і логічних виразів	480
6.2 Структура системи: підходи, методи і моделі	483
6.2.1 Як вибрати кращий підхід або модель для Вашої задачі	483
6.2.2 Таблиці станів і переходів (кінцевий автомат)	488
6.2.3 Часові і крокові діаграми або циклограми	500
6.2.4 Причинно-наслідкова модель	506
6.2.5 Мережі Петрі	517
6.2.6 Функціональний план і комунікаційні мережі (мережі зв'язку)	529
6.3 Приклади і поради	535
6.3.1 Поради загального плану	535
6.3.2 Приклад (завдання на модернізацію системи)	537
6.3.3 Станція №1 (використання циклограми)	540
6.3.4 Станція №2 (використання функціонального плану)	547

6.3.5 Станція №3 (використання використання причинно-наслідкової моделі).....	557
6.3.6 Побудова структури одного модуля.....	566
6.3.7 Поради та рекомендації.....	573
6.4 Питання для самоперевірки.....	575
Література до розділу 6.....	577

РОЗДІЛ 7 АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ СИСТЕМ МЕХАТРОНІКИ.....	584
7.1 Методи та засоби обробки сигналів сенсорів.....	585
7.1.1 Аналого-цифровий та цифро-аналоговий перетворювачі сигналів.....	585
7.1.2 Компаратори.....	587
7.1.3 Мультиплектори.....	588
7.1.4 Вільно програмовані контролери.....	590
7.2 Апаратне забезпечення систем мехатроніки на базі мікропроцесорів.....	595
7.2.1 Кодери та декодери.....	595
7.2.2 Енкодери.....	598
7.2.3 Сенсорні панелі.....	600
7.2.4 Панельні робочі станції.....	604
7.2.5 Навігаційні системи.....	606
7.2.6 Розподілені системи керування.....	608
7.2.7 Виробничі мережі систем керування.....	610
7.2.8 Модулі розпізнавання зображень.....	612
7.2.9 Мобільні лабораторії.....	615
7.3 Основи управління електроприводом.....	618
7.3.1 Загальні відомості про керований електропривод.....	618
7.3.2 Елементна база для побудови систем керування електроприводом.....	624
7.3.3 Принципи побудови функціональних вузлів систем керування електроприводом.....	627
7.4 Мови програмування керуючих модулів.....	633
7.5 Складання алгоритмів програм керування для електро-гідро-пнеumo-механічних систем дискретної дії.....	643
7.5.1 Про організацію керування в системі.....	643
7.5.2 Про механічні алгоритми функціонування.....	649
7.5.3 Перехід від алгоритмів функціонування до алгоритмів керування.....	655
7.5.4 Готуємо інструмент для побудови алгоритму.....	670
7.5.5 Приклад: складаємо алгоритми програми.....	681
7.6 Питання для самоперевірки.....	702
Література та інформаційні посилання до розділу 7.....	704

ПЕРЕДМОВА

Підручник «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка» пропонується студентам та аспірантам, які навчаються за новою спеціальністю «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка». В напрямку «Прикладна механіка», згідно з новою номенклатурою спеціальностей, з'явилась спеціальність «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка». Метою подібної орієнтації фахівців-механіків є підготовка бакалаврів і магістрів з напрямку, який об'єднує гідроаеромеханіку і основи механотроніки, як синтез комп'ютерної техніки, електроніки і гідропневмоавтоматики. Таким чином, навчаючись даній спеціальності, студенти повинні оволодіти глибокими знаннями в галузі сенсорної техніки, сучасної електроніки, моделювання електронно-механічних систем, процесами, що супроводжують механотронні технології, і, як основу, вміти орієнтуватись і використовувати при розв'язанні прикладних задач основні закони механіки рідини та газу.

В механотронних машинах здійснюється перенос і перетворення енергії та інформації за допомогою елементів механіки, електроніки, електротехніки, гідроаеромеханіки, які утворюють замкнену систему. За їх допомогою енергія перетворюється в корисну роботу, а інформація – в ефективні рішення. Запорукою створення механотронних об'єктів різноманітного призначення є скоординована взаємодія (перетікання) енергетичних та інформаційних потоків. Підручник розраховано на студентів, які мають базову підготовку з таких дисциплін, як теоретична механіка, опір матеріалів, гідроаеромеханіка, електротехніка, гідропневмоавтоматика, основи моделювання та проектування гідроприводу та пневмоприводу, дискретні системи автоматичного керування.

Враховуючи це і побудована структура запропонованого підручника, який складається з двох частин: перша частина – «Технічна гідродинаміка», друга – «Вступ до механотроніки».

Автори не ставили за мету досить повно розкрити зміст цих двох частин підручника. У першій частині, як і в другій, наведені лише основні найважливіші питання і закони механіки, які мають прикладне значення в механотроніці.

Так, перша частина книги знайомить з деякими розділами механіки рідини і газу, які необхідно знати для подальшого вивчення курсу: це питання про властивості рідини і газів, основні рівняння, що описують рух рідини, струменеві потоки, деякі питання магнітної гідродинаміки. Знання цих питань дають можливість перейти до розгляду другої частини книги.

Поєднанню різних за принципом дії технічних пристроїв у системи, що цілеспрямовано розв'язують практичні задачі та виробничі питання, присвячена друга частина. З однієї сторони, розглядаються властивості елементів систем, з іншої – закономірності об'єднання цих елементів у скоординовані на енергетичному та інформаційному рівнях об'єкти. Ці питання охоплюють вивчення принципів дії виконавчих пристроїв, сенсорів і засобів контролю та керування, особливостей моделювання й проектування різнорідних за складом та виконуваними функціями механіко-електронних систем.

При складанні підручника були використані численні публікації наукових і навчальних шкіл, довідкові матеріали фірм-виробників, досвід побудови дидактичних матеріалів, відомі як з літературних джерел, так і з Інтернету. Посилання на джерела інформації згруповані по розділах книги і відповідають тематиці кожного розділу.

Хоча питання про первинність механіки, електроніки чи інформатики в даних системах вирішується на користь їх чергування, в книзі англomовний термін мехатроніка (mechatronic) використовується нарівні з комбінацією механотроніка. Автори сподіваються, що така термінологічна невизначеність не ускладнить сприйняття матеріалу, а лише зверне увагу тих читачів, спеціальність яких далека від механіки, на гідромеханічний аспект систем і процесів, що в них відбуваються.

Редагування підручника виконано О. М. Яхном, який написав частину I та розділ 2 частини II у співавторстві з І. В. Коцом. Перший розділ частини II складено всіма авторами. Третій розділ II частини належить О. Ф. Луговському, за винятком підрозділу 3.3, підготовленого у співавторстві з А. В. Мовчанюком. Четвертий розділ та підрозділи 7.1 і 7.2 другої частини належать В. А. Ковальову, підрозділ 7.3 написано А. В. Мовчанюком. П'ятий розділ другої частини написаний О. В. Узуновим. Шостий розділ II частини та підрозділ 7.4 належать О. П. Губареву.

Автори висловлюють вдячність канд. техн. наук доценту Ганпанцуровій Оксані, доценту Гришку Ігорю, аспірантам Ляшок Аліні, Муращенко Альоні та Колісник Олені, магістру Назаровій Ользі, інженерам Ніколайчук Ірині та Тимошенко Людмилі за допомогу, яка надана ними при підготовці і оформленні матеріалу та при розробленні прикладів розв'язання задач.

Особливу подяку автори висловлюють рецензентам В. Д. Акіншину, С. А. Бичкову, С. І. Крилю, З. Я. Лур'є за корисні зауваження і конструктивні пропозиції, які дозволили наблизити теоретичні та наукові питання гідромеханіки до задач практичного спрямування, що стосуються як різноманітних процесів та об'єктів механотроніки, так і різних етапів їх життєвого циклу.

ВСТУП

Короткі історичні характеристики розвитку технічної гідравліки.

Великий внесок у формування найбільш важливих законів механіки зробили такі вчені:

- Арістотель (384-322 р.р. до н. е.) – вчення про рух. Наукові роботи «Фізика», «Про небо», «Про походження і знищення», «Метафізика»;
- Архімед (287-212 р.р. до н. е.) – встановив закони важеля, довів низку теорем з механіки, виконав наукові роботи: «Книга опор», «Про башти», «Про рівновагу плоских фігур»;
- Герон Олександрійський – запропонував трактати «Механіка», «Механічні проблеми», «Пневматика», «Про автомати» та ін.;
- Абу Алі Ібн-Сіна (980-1037 р.р.) – написав «Книгу знань», здійснив розвиток понять про рух;
- Абул Ізза Ісмаїл ал-Джазери (12-13 сторіччя) – відомий як автор «Книги про пізнання інженерної механіки»;
- Абу Райхан Біруні (973-1050 р.р.) – автор фундаментальних праць з математики, астрономії та ін. Заклав основи зважування, які надалі розвинув Омар Хайям в трактаті «Ваги мудрості або про абсолютні водяні ваги»;
- Леонардо да Вінчі (1452-1519 р.р.) – математик, механік, фізик, найбільш відомі його роботи «Про рух і вимірювання води», «Трактат про живопис» та ін. Автор відомого виразу «Механіка – рай математичних наук, бо з її допомогою досягають математичного плоду»;
- Микола Коперник (1473-1543 р.р.) – виконав фундаментальні дослідження Сонячної системи, автор твору «Про рух небесних сфер»;
- Йоганн Кеплер (1571-1630 р.р.) – відкрив три закони руху планет (закони Кеплера);
- Галілео Галілей (1564-1642 р.р.) – один із засновників точного пізнання, сформулював закон падіння тіл, закони коливання маятника;
- Рене Декарт (1596-1650 р.р.) – захищав положення про матеріальність і безкрайність, про матерію і рух, автор книги «Початок філософії», «Діоптрика»;
- Крістіан Гюйгенс (1629-1695 р.р.) – створив хвильову теорію світла, ввів поняття відцентрових сил і моменту інерції, досліджував рух математичного і фізичного маятників, автор твору «Маятниковий годинник»;
- Ісаак Ньютон (1643-1727 р.р.) – автор праці «Математичні початки натуральної філософії», в якій сформулював основні закони класичної

механіки (три закони Ньютона), розробив інтегральне і диференціальне числення;

– Готфрід Вільгельм Лейбніц (1646-1716 р.р.) – разом з Ньютоном розробив інтегральне і диференціальне числення;

– Леонард Ейлер (1707-1783 р.р.) – автор робіт з небесної механіки, математики, оптики, балістики, гідравліки, автор близько 850 наукових робіт, зокрема, трактатів «Механіка», «Морська наука або трактат про будівництво кораблів і керування ними»;

– Жан Лерон Д'Аламбер (1717-1783 р.р.) – сформулював «принцип Д'Аламбера», автор «Трактату про динаміку»;

– Жозеф Луї Лагранж (1736-1813 р.р.) – заклав основи аналітичної механіки;

– Сімеон Дені Пуассон (1781-1840 р.р.) – створив відомі роботи з теоретичної та небесної механіки, теорії пружності, математичної фізики, автор книги «Курс механіки», яка складається з таких частин, як статика, динаміка, гідростатика і гідродинаміка;

– Вільям Роуан Гамільтон (1805-1865 р.р.) – автор напряму, пов'язаного з варіаційними принципами механіки;

– Михайло Васильович Остроградський (1801-1861 р.р.) – засновник аналітичної механіки в Росії; сфера досліджень – теорія пружності, гідродинаміка, балістика. Опубліковані праці «Загальні міркування відносного моменту сил», «Про принцип віртуальних швидкостей і про силу інерції» та ін.;

– Генріх Герц (1857-1894 р.р.) – автор роботи «Принципи механіки, викладені в новому зв'язку»;

– Альберт Ейнштейн (1879-1955 р.р.) – автор теорії відносності, розробив теорію броунівського руху, автор роботи «Автобіографія», в якій викладено основні характеристики ньютонівської механіки;

– Іван Васильович Мещерський (1859-1935 р.р.) – основоположник механіки тіл змінної маси, автор роботи «Динаміка точки змінної маси»;

– Костянтин Едуардович Ціолковський (1857-1935 р.р.) – основоположник сучасного ракетобудування, автор робіт «Тиск рідини на рівномірну площу, яка рухається», «Вільний простір» та ін.;

– Олексій Миколайович Крилов (1863-1945 р.р.) – основоположник теорії корабля, займався проблемами гіроскопічних компасів. Автор роботи «Новий метод розрахунку елементів підводної частини корабля»;

– Микола Єгорович Жуковський (1847-1921 р.р.) – основоположник сучасної гідродинаміки і аеродинаміки, автор робіт «Кінематика рідинного тіла», «Про гідравлічний удар у водопровідних трубах», «Вихрова теорія повітряного гвинта» та ін.;

– Сергій Олексійович Чаплигін (1869-1942 р.р.) – автор робіт у сфері аеро- і гідродинаміки, основоположник сучасної газової динаміки, автор робіт «Про газові потоки», «Про деякі випадки руху твердого тіла в рідині».

Основний внесок у формулювання найбільш важливих законів гідромеханіки належить таким ученим, як:

– Арістотель (348-322 р.р. до н. е.), Архімед (287-212 р.р. до н. е.), які заснували тлумачення про рівновагу тіл, що плавають;

– Леонардо да Вінчі (1452-1519 р.р.) – вперше презентував наукові основи гідростатики;

– Симон Стевін (1548-1620 р.р.) – автор роботи «Початок гідравліки»; Галілео Галілей (1564-1642 р.р.) – виконав роботи в галузі гідростатики і гідравліки;

– Блез Паскаль (1623-1662 р.р.) – розвинув поняття про тиск і сили, які діють на рідину;

– Торріччелі (1608-1647 р.р.) – навів теоретичні погляди на розрахунок швидкості витікання рідини крізь отвори;

– Ісаак Ньютон (1642-1727 р.р.) – сформулював поняття про сили тертя в рідині (закон Ньютона);

– Леонард Ейлер (1707-1783 р.р.) – рівняння руху ідеальної рідини;

– Даніель Бернуллі (1700-1783 р.р.) – рівняння руху ідеальної рідини;

– Клод Луї Марі Анрі Нав'є (1785-1836 р.р.), Джордж Габріель Стокс (1819-1903 р.р.) – сформулювали основні рівняння руху в'язкої рідини;

– Герман Людвіг Фердинанд Гельмгольц (1821-1894 р.р.), Готхільф Генріх Людвіг Хаген (1797-1884 р.р.), Жан Луї Марі Пуазейль (1799-1869 р.р.) – встановили основні закони руху в'язкої рідини в трубах;

– Осборн Рейнольдс (1876-1883 р.р.) – обґрунтував режими руху рідини, експериментально встановив критерій переходу ламінарної течії в циліндричних трубах у турбулентну;

– Лагранж Жозеф Луї (1736-1813 р.р.), Д'Аламбер Жан Лерон (1717-1783 р.р.), Уільям Томсон (лорд Кельвін) (1824-1907 р.р.), Горацій Лемб (1849-1934 р.р.), Людвіг Прандтль (1875-1935 р.р.), Теодор Карман (1881-1963 р.р.) – істотно розвинули теоретичні погляди на рух рідини;

– Анрі Дарсі (1824-1907 р.р.), Юліус Вейсбах (1806-1871 р.р.), Борис Олександрович Бахметьєв (1880-1951 р.р.), Микола Миколайович Павлівський (1884-1937 р.р.), Жозеф Валентен Буссінеск (1842-1929 р.р.) – розробка основних положень гідравліки;

– Костянтин Едуардович Ціолковський (1857-1935 р.р.), Микола Єгорович Жуковський (1847-1921 р.р.), Сергій Олексійович Чаплигін (1869-1942 р.р.) – зробили істотний внесок у галузі аеродинаміки і космонавтики.

ЧАСТИНА I ТЕХНІЧНА ГІДРОМЕХАНІКА

РОЗДІЛ 1 РОБОЧІ РІДИНИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Як відомо, існує три стани речовини: твердий, рідкий та газо- або пароподібний. В гідродинаміці та гідромеханіці рідинне середовище – це такий стан, при якому речовина може безперервно деформуватися під дією дотичних (тангенціальних) напруг незалежно від їхньої величини. Тобто, рідина – це таке середовище, що легко деформується та має властивість текучості, на відміну від твердого тіла, яке деформується на величину, пропорційну прикладеній нарузі (закон Гука), та після цього залишається у стані статичної рівноваги.

В той же час, рідина, незалежно від прикладеного зусилля, буде продовжувати деформуватися і після припинення дії на неї. Тому рідину можна визначати як середовище, для якого, якщо розглядати її в спокійному стані та виділити елементарну частинку у вигляді тетраедра, а зовні сили, що діють на частинку, спрямовані під прямим кутом до обмежувальних поверхонь.

Прикладом рідини може служити вода, нафтопродукти, мастила, бензин, дизельне паливо, різного роду суспензії, емульсії і таке інше. Рідини, що використовуються в системах гідроприводу різних машин та апаратів, називають робочими. Робочі рідини повинні відповідати цілому ряду вимог, серед яких: передача енергії та імпульсу відбувається з мінімальним можливими витратами; існування відведення теплової енергії (тепла) від ділянок тертя; існування високих антифрикційних властивостей, висока стабільність (хімічна та фізична) і таке інше. Властивості робочих рідин можна об'єднати у три великі групи: фізико-хімічні, експлуатаційні та екологічні.

Основні параметри фізико-хімічних властивостей: густина, в'язкість, поверхневий натяг, теплопровідність, температура згоряння, кислотне число (для рідин на базі нафтопродуктів), температуропровідність, температура застигання, стисливість.

Екологічні властивості: протипожежна безпека, противибухова безпека, стабільність при перевезенні, стабільність при зберіганні, вплив на людину (токсичність), вплив на навколишнє середовище.

Експлуатаційні властивості: антифрикційність, зносостійкість, протишорсткі та низькотемпературні властивості, хімічна стабільність, піноутворення, забрудненість.

Найважливішою функцією робочих рідин у гідравлічних системах (зокрема, в системах гідроприводу) є функція переносу енергії, тепла та

інших параметрів. Процес перетворення енергії в системі, наприклад, насос – гідромотор, може бути подано як перетворення механічної енергії робочого елемента насоса у гідравлічну енергію робочої рідини, яка через відповідну гідросистему передається гідромотору, що перетворює гідравлічну енергію рідини в механічну. У даному процесі робоча рідина характеризується низкою важливих параметрів, серед яких динамічна і кінематична в'язкості μ і ν ($H \cdot c / m^2$ і m^2 / c), густина ρ (kg / m^3), коефіцієнт стиснення β (m^2 / H), поверхневий натяг σ (H / m) та ін.

1.1 В'язкість робочих рідин

В'язкість – одна з найважливіших характеристик робочих рідин. Вона характеризується двома коефіцієнтами: μ – коефіцієнт динамічної в'язкості з розмірністю $ML^{-1}T^{-1}$ (наприклад: $H \cdot c / m^2 = Pa \cdot c = Пуаз$) та коефіцієнт кінематичної в'язкості – відношення коефіцієнта динамічної в'язкості до густини, з розмірністю L^2T^{-1} (наприклад, $m^2 / c = cm$).

Іноді для опису властивостей рідини використовуються поняття текучості φ , яке є величиною, оберненою до коефіцієнта динамічної в'язкості, тобто $\varphi = \mu^{-1}$.

З фізико-хімічної точки зору поняття в'язкості досить складне, пов'язане з молекулярною структурою середовища і параметрами, що його характеризують (будова молекул, міжмолекулярні зв'язки і таке інше). Як відомо [9], існує декілька теорій, що дозволяють визначити в'язкість як функцію молекулярних параметрів рідини. Наприклад, на основі молекулярної теорії рідини в'язкість може бути визначена із залежності:

$$\mu = 0,48 \cdot \frac{r_1}{\nu} \cdot [m\varphi_a(r_1)]^{0,5} \cdot \exp[-\beta\varphi(r_1)]. \quad (1.1)$$

Відповідно до теорії абсолютних швидкостей і різних дифузійних теорій А. Бонді запропонована залежність:

$$\mu = \frac{V_f^{1/3}}{V_1} \cdot (2\pi mkT)^{0,5} \cdot \exp(\beta\xi_A), \quad (1.2)$$

де V_f – флуктуаційний об'єм на одну молекулу; V_1 – молекулярний об'єм рідини; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; $\varphi(r_1)$ – потенціальна енергія взаємодії пари молекул.

Існує постулат, згідно з яким в'язкість має вигляд:

$$[\mu] = K \cdot M^\alpha, \quad (1.3)$$

де K – стала, яка характеризує дану рідину; M – молекулярна маса; α – стала, яка залежить від природних властивостей рідини.

На основі існуючих теорій в'язкості одержані вирази для визначення залежності в'язкості від температури, тиску та ін. Найбільш типовою серед таких є залежність, запропонована Ейлером:

$$\mu = \text{const} \frac{e^E}{RT}, \quad (1.4)$$

де E – енергія активації для в'язкої течії; R – газова стала.

У відповідності з узагальненим законом Ньютона динамічна в'язкість μ є коефіцієнтом пропорційності між тангенціальною напругою (позначено τ) і швидкістю деформації (позначено $\dot{\gamma}$), тобто:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (1.5)$$

Робочі рідини, які описуються узагальненим законом Ньютона (формула 1.5), прийнято називати ньютонівськими.

До ньютонівського закону про в'язкість входить величина $\dot{\gamma}$, яка означає швидкість кутової деформації. Це можна проілюструвати на прикладі (рис. 1.1) [2, 9].

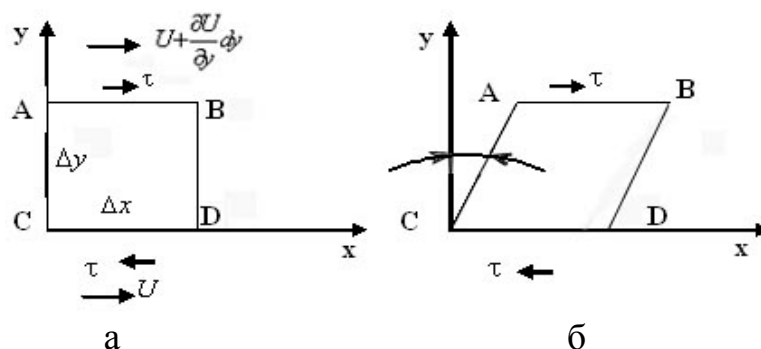


Рисунок 1.1 – Кутове зміщення (до пояснення формули 1.5)

Дійсно, зсув відбувається за рахунок того, що швидкість $U + \frac{\partial U}{\partial y} dy$ руху поверхні АВ квадрата площею $\Delta x \Delta y$ більша за швидкість U руху поверхні

CD. В цьому випадку квадрат ABCD (рис. 1.1, а) деформується з часом у паралелограм (рис. 1.1, б). Таким чином, швидкість зсуву АВ відносно CD буде дорівнювати $\frac{du}{dy}\Delta y$, а швидкість кутової деформації буде, відповідно,

$$\left(\frac{du}{dy}\right)\frac{\Delta y}{\Delta y} = \frac{du}{dy}.$$

Для твердого тіла має місце:

$$\tau_{xy} = G \cdot \frac{d\varepsilon}{dy}, \quad (1.6)$$

де τ_{xy} – тангенціальні напруги, $\frac{d\varepsilon}{dy}$ – кутова деформація, а G – модуль пружності зсуву.

Як вже зазначалося раніше, динамічна в'язкість (іноді її називають молекулярною) залежить від температури та тиску. Залежність від тиску може бути меншою (значно меншою), ніж залежність від температури.

Ваттерман довів, що залежність від температури може мати вигляд логарифмічного закону, а саме:

$$\log \frac{\mu}{\mu_{\infty}} = \frac{A}{T^{\chi}}, \quad (1.7)$$

де μ_{∞} – в'язкість при $T^{-\chi} = 0$, T – температура в градусах К, χ і A – параметри, що характеризують властивості робочої рідини.

Залежність в'язкості від тиску p при його не дуже великих значеннях можна отримати на основі формули Баруса:

$$\log \frac{\mu}{\mu_0} = f(T) \cdot p, \quad (1.8)$$

де μ_0 – в'язкість при атмосферному тиску.

Більш узагальненим виразом можна вважати формулу, одержану Ролансом, Флюгтером і Ваттерманом:

$$\log \mu = \frac{A_0}{T^{\chi}} + C \cdot \frac{p^{\zeta}}{T^{\chi}} + Dp^{\zeta} + B_0, \quad (1.9)$$

де A_0, C, D, B_0 – деякі сталі, а χ, ζ – параметри, що характеризують особливості даної рідини.

З формули (1.9) видно, що $\mu = f(T, p)$ описує поверхню гіперболічного параболоїда.

Якщо поведінка будь-якої рідини не може бути описана за законом Ньютона (1.5), то така рідина належить до неньютонівських. Неньютонівські рідини можуть бути поділені на три великі групи:

- рідини, у яких градієнт швидкості $\dot{\gamma}$ є для кожної точки функцією лише напруженням зсуву τ в ній;
- рідини, для яких залежність між градієнтом швидкості і напруженням зсуву визначається ще й часом дії напруги;
- рідини, які одночасно мають властивості як твердого тіла, так і рідини, а також здатні проявляти властивості пружності щодо форми після зняття напруження τ .

В залежності від групи, до якої належить рідина, її реологічна поведінка може бути описана, відповідно, рівнянням реологічного стану.

Найбільш широке застосування в гідравлічних системах мають робочі рідини, що їх відносять до першої групи. Вони, в залежності від своєї реологічної поведінки, можуть бути описані відповідними рівняннями.

I. Для псевдопластичних і дилатантних рідин можуть бути використані закон Елліса або Освальда де Вілля. Згідно із законом Елліса динамічна в'язкість дорівнює:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_0}{\chi_0} \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{m-1}}, \quad (1.10)$$

де m, χ_0, μ_0 – параметри.

Більш широке використання має реологічний закон Освальда де Вілля:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n, \text{ або } \mu = K(\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (1.11)$$

де K – консистентна стала, n – реологічний індекс течії.

Причому, якщо $n < 1$, то закон описує поведінку псевдопластичної рідини; при $n = 1$ рівняння (1.11) перетворюється на закон Ньютона (1.5); при $n > 1$ рівняння (1.11) характеризує дилатантну рідину.

До першої групи належать і так звані бінгамівські рідини:

$$\tau = \tau_0 + \mu_\sigma(\dot{\gamma}), \text{ або } \mu_\sigma = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}}, \quad (1.12)$$

де μ_σ – бінгамівська в'язкість, τ_0 – величина напруги, при якій: якщо $\tau > \tau_0$ – починається течія рідини, а якщо $\tau < \tau_0$ – рідина поводить себе як тверде тіло.

Формула (1.12) є зручною при описі поведінки дисперсних систем. Крім того, показано, що багато робочих рідин типу дисперсій з полімерними домішками добре описуються законом Кессона:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + (\mu_0 \dot{\gamma})^{0,5}, \quad (1.13)$$

або більш узагальненим законом З. П. Шульмана:

$$\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + (\mu_0 \dot{\gamma})^{1/m}, \quad (1.14)$$

де n і m – реологічні параметри.

II. Для рідини, для якої в'язкість залежить від часу дії напруги, маємо:

$$\tau = f(\dot{\gamma}, t). \quad (1.15)$$

Залежно від того, зменшується або збільшується величина в'язкості з часом при $\dot{\gamma} = const$, робочі рідини називають, відповідно, тиксотропними і реопектичними. Тиксотропні рідини, консистенція яких залежить від часу дії напруги та існування швидкості зсуву, часто вважають за наслідок руйнування (дисипації) структури рідини. Паралельно з всезростаючою деструкцією відбувається формування структури завдяки росту числа створених вільних зв'язків (сили Ван дер Ваальса). Водночас відбувається прирівнювання швидкостей деструкції і структуроутворення.

До реологічних рідин відносять такі рідини, для яких характерне поступове структуроутворення при зсуві.

III. Для в'язкопружних рідин залежність між діючими напругами і викликаними ними деформаціями має більш складний вигляд. Під дією напруг, окрім миттєвої пружності, яка властива таким рідинам, може мати місце запізнення пружності і течії, що обумовлене виникненням зворотних в часі залишкових деформацій. Найбільш простою реологічною моделлю таких рідин може бути модель Максвелла:

$$\tau + t_0 \cdot \frac{d\tau}{dt} = \mu \dot{\gamma}, \quad (1.16)$$

де t_0 – параметр розмірності часу з назвою “час релаксації” та визначений за формулою:

$$t_0 = \frac{\mu}{E}, \quad (1.17)$$

де E – модуль зсуву, що дорівнює відношенню інтенсивності тангенціальних напруг до інтенсивності деформації зсуву.

При швидких механічних навантаженнях, коли $t < t_0$, в'язкопружна рідина поводить себе як ідеальне пружне тверде тіло. Якщо $t > t_0$, то спостерігається течія, яка перебиває пружну деформацію, і дане середовище може розглядатися як дійсно реальна рідина.

Нарешті, як приклад, в таблиці 1.1 наведено величини в'язкості та їх залежність від температури для деяких робочих рідин.

Таблиця 1.1 – Порівняльні дані властивостей робочих рідин

Масило	Густина, кг/м ³	В'язкість, мм ² /с при температурі, °С					Темпера- тура, °С		Кислота концентр ація, мг на 1г рідини
		-50	-30	20	50	100	Застигання	Загоряння	
АМГ-10	850	1250	180	20- 23	10	4,5- 5,0	-70	92	0,05
МГЕ- 10А	855	1500	220	20- 23	10	6,0	-70	94	0,2-0,3
ВМГ 3	805	4000	-	-	10	-	-	135	-
Веретенне АУ	850- 866	4500	2300	49	12- 14	3,7	-45	163	0,07
Трансфор- маторне	-	-	-	30	19,6	3,0	-45	-	-
МГ-30	-	-	-	-	30	-	-35	190	-
Ж-12	-	-	-	-	10- 14	-	-30	166	0,05
Індустрія льне И-30А	-	-	-	-	28- 23	-	-15	180	0,20

Слід зазначити, що в таблиці наведена лише незначна кількість робочих рідин, які можуть бути використані у гідроприводі. Залежно від умов роботи гідроприводу робочі рідини можна ще розділити на три основні групи, кожна з яких відрізняється тим, при яких тисках “працює” та чи інша рідина. Якщо тиск у гідроприводі не перевищує 15 МПа, то в цьому випадку потрібно використовувати малов'язкі рідини. При тиску до 25 МПа (друга група) використовуються рідини із середньою в'язкістю. Нарешті, до третьої групи належать в'язкі рідини, які працюють при тиску

більше, ніж 25 МПа. В роботах [1, 6, 9] наведені приклади робочих рідин перелічених трьох груп (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Характеристики робочих рідин гідроприводу з розподілом по групах

Параметри робочих рідин	I група			II група			III група		
	МГЕ 4А	ЛЗ-МГ-2	АМГ-2	МГЕ 10А	ВМГЗ	АУ	МГ 20	МГ 30	ИС 45
Густина при $t = 20^\circ \text{C}$ $\rho \text{ кг/м}^3$	-	840	850	-	865	886-896	885	885	-
В'язкість $\nu, \text{сСт}$	30	3,6	4,0	10	10	12-14	17-23	27-33	38-52
	-40	-	-	-	1900	-	-	-	-
	-50	200	220	1250	-	-	-	-	-

1.2 Поверхневий натяг і поверхнева енергія

Поверхневий натяг є однією з властивостей, що характеризує рідину. Він характеризується коефіцієнтом $\sigma \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right]$. Поверхневий натяг можна спостерігати на межі між рідиною і газом, він визначається як сила, що діє на одиницю довжини контуру поверхні рідини, і направлений таким чином, щоб скоротити цю поверхню до мінімуму при заданих об'ємах фаз. Сила поверхневого натягу завжди спрямована по дотичній до поверхні рідини і пропорційна довжині тієї ділянки контуру, на яку вона діє. В зв'язку з цим коефіцієнт поверхневого натягу можна визначити за такими залежностями:

– використовуючи поняття роботи A , яку треба виконати, щоб поверхня S змінилась (стала більшою):

$$\sigma = \frac{A}{S}; \quad (1.18)$$

– використовуючи поняття сили F , що віднесена до одиниці довжини контуру l розглядуваної поверхні:

Навчальне видання

Олег Михайлович Яхно
Олександр Васильович Узунов
Олександр Федорович Луговський
Василь Анатолійович Ковальов
Андрій Валерійович Мовчанюк
Іван Васильович Коц
Олександр Павлович Губарев

Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка

Підручник

Редактор В.О. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено І. В. Коцом

Підписано до друку 10.04.2017 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Друк різнографічний.
Ум. друк. арк. 41,12. Наклад 300 (1-й запуск 1-100) пр.
Зам. № 2017-052.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в інформаційному редакційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.