

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Одеський державний аграрний університет
Вінницький торгово-економічний інститут

Журавель Д. П., Паламарчук І. П., Уманський С. М., Паламарчук В. І.

ГІДРАВЛІКА, ГІДРО- ТА ПНЕВМОПРИВОДИ

**За редакцією доктора технічних наук,
професора Д. П. Журавля**

Підручник для здобувачів вищої освіти

Київ
2021

УДК 621.22 (075)

Ж 83

Рекомендовано

*Вченою радою Таврійського державного агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного як підручник для здобувачів вищої освіти
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
закладів вищої освіти III-IV рівня акредитації
(Протокол № 9 від 29.06.2021 р.)*

Рецензенти:

Штефан Є. В., доктор технічних наук, професор, в. о. завідувача кафедри репрографії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баль-Прилипка Л. В., доктор технічних наук, професор, декан факультету харчових технологій та управління якістю продукції АПК, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Литвиненко О. А., доктор технічних наук, професор, професор кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв, Національний університет харчових технологій

Журавель Д. П.

Ж 83 Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: Підручник для здобувачів вищої освіти / Д. П. Журавель, І. П. Паламарчук, С. М. Уманський, В. І. Паламарчук; за ред. Д. П. Журавля. – Київ: ЦП «Компринт», 2021. – 449 с., іл.

ISBN 978-617-8049-15-7

У структуру підручника включені основи гідростатики та гідродинаміки, закономірності зміни властивостей рідких технологічних мас, основні складові гідропневмоприводів та обладнання, що використовуються у технічних системах; основи проектування гідромагістралей, сучасні розрахункові методики структурних елементів гідросистем, що призначені для підготовки здобувачів вищої освіти при вивченні дисципліни «Гідравліка, гідро- та пневмоприводи» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Підручник може бути використаний здобувачами вищої освіти за спеціальностями 208 «Агроінженерія», 181 «Харчові технології» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» при опануванні споріднених із вище зазначеною дисциплін, корисним науковим співробітникам, аспірантам і здобувачам наукових ступенів зі вказаних спеціальностей при розробці та проектуванні гідротехнічних та технологічних систем.

ISBN 978-617-8049-15-7

УДК621.22 (075)

© Д. П. Журавель, І. П. Паламарчук,
С. М. Уманський, В. І. Паламарчук
© ТДАТУ, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	11
РОЗДІЛ I. РІДИНИ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ	14
1.1. Основні положення гідравліки.....	14
1.1.1. Короткий історичний огляд розвитку гідравліки як науки	14
1.1.2. Основні поняття гідравліки.....	18
1.1.3. Методи досліджень у гідравліці	21
1.2. Основні властивості рідин.....	22
1.2.1. Основні визначення.....	22
1.3. Основні фізико-хімічні властивості та показники якості рідин.....	24
1.3.1. Показники якості води для системи водопостачання з поверхневих джерел.....	24
1.3.1.1. Фізичні показники	24
1.3.1.2. Хімічні показники	26
1.3.1.3. Бактеріологічні показники	26
1.3.1.4. Біологічні показники.....	26
1.3.2. Екологічна безпека природних підземних вод.....	27
1.3.3. Нормування та вимоги до якості питної води у системі водопостачання.....	29
1.4. Основні фізичні властивості рідин	31
1.4.1. Густина	31
1.4.3. Стисливість рідини	33
1.4.4. Температурне розширення рідини	35
1.4.5. Кипіння.....	36
1.4.6. В'язкість	36
1.4.7. Закон рідинного тертя – закон Ньютона.....	38
1.4.8. Капілярність рідин	41
1.5. Неоднорідні системи із рідинною складовою у переробних і харчових виробництвах.....	42
1.5.1. Класифікація рідких середовищ	42
1.5.2. Неньютонівські рідини	44
1.5.3. Рідкі неоднорідні системи	48

1.5.4. Газорідинні неоднорідні системи	50
Запитання для самоконтролю	51
РОЗДІЛ 2. ГІДРОСТАТИКА	53
2.1. Сили, які діють на рідину	53
2.1.1. Масові сили	53
2.1.2. Поверхневі сили	54
2.2. Гідростатичний тиск та його властивості	56
2.2.1. Основні поняття та різновиди тиску	56
2.2.2. Гідростатичний тиск	57
2.2.3. Властивості гідростатичного тиску	59
2.3. Основне рівняння гідростатики	62
2.3.1. Складання основного рівняння гідростатики	62
2.3.2. Фізичне значення основного рівняння гідростатики	65
2.3.3. Геометрична інтерпретація основного рівняння гідростатики	66
2.3.4. Наслідки основного рівняння гідростатики	69
2.4. Сила гідростатичного тиску	70
2.4.1. Центр тиску	70
2.4.2. Сила гідростатичного тиску при його дії на плоскі поверхні	70
2.4.3. Сила гідростатичного тиску при його дії на криволінійні поверхні	74
2.4.4. Епюри гідростатичного тиску	76
2.4.5. Прилади для вимірювання тиску	78
2.5. Основні закономірності рівноваги рідин	81
2.5.1. Відносна рівновага рідини	81
2.5.2. Поверхні однакового тиску	84
2.5.3. Рівновага рідин у сполучених посудинах	85
2.5.4. Закон Паскаля	87
2.5.5. Прості гідравлічні машини	88
2.6. Основи теорії плавання тіл	90
Запитання для самоконтролю	93
РОЗДІЛ 3. ГІДРОДИНАМІКА	95
3.1. Основні елементи та параметри руху рідини	95

3.1.1. Предмет дослідження гідродинаміки.....	95
3.1.2. Основні методи досліджень	96
3.1.3. Лінія току рідини.....	97
3.1.4. Струминкова модель руху рідини	98
3.1.5. Види руху рідини	100
3.2. Гідравлічні характеристики потоку рідини.....	102
3.2.1. Поняття потоку рідини	102
3.2.2. Основні геометричні параметри систем водопостачання.....	103
3.2.3. Рівняння нерозривності встановленого руху рідини у руслі.....	107
3.2.4. Рівняння нерозривності для елементарної струминки потоку рідини ..	109
3.2.5. Основне рівняння рівномірного руху рідин	112
3.3. Рівняння Бернуллі: основне рівняння гідродинаміки	113
3.3.1. Рівняння Бернуллі для струминки ідеальної рідини	113
3.3.2. Складання рівняння бернуллі методом ейлера для ідеальної та реальної рідини.....	116
3.3.3. Енергетичне тлумачення рівняння Бернуллі.....	120
3.3.4. Геометрична інтерпретація рівняння Бернуллі.....	124
3.4. Режими руху рідини.....	127
3.4.1. Гідравлічні опори	127
3.4.1.1. Основні різновиди гідравлічних опорів.....	127
3.4.1.2. Втрати напору в місцевих опорах	128
3.4.1.3. Втрати напору в опорах по довжині.....	130
3.4.2. Експериментальне обґрунтування режиму руху рідини.....	137
3.4.3. Характеристика ламінарного режиму руху	140
3.4.4. Характеристика турбулентного режиму руху.....	142
3.4.5. Коефіцієнт гідравлічного тертя	145
3.4.6. Коефіцієнт опору системи.....	148
Запитання для самоконтролю	154
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ГІДРОМАГІСТРАЛЕЙ...	156
4.1. Основи розрахунку трубопроводів.....	156
4.1.1. Класифікація трубопроводів та основні задачі проектування.....	156

4.1.2. Розрахунок трубопроводів послідовного та паралельного з'єднання...	157
4.1.2.1. Прості трубопроводи сталого перетину	157
4.1.2.2. Послідовне з'єднання трубопроводів	160
4.1.2.3. Паралельне з'єднання трубопроводів.....	162
4.2. Розрахунок гідравлічних опорів	164
4.2.1. Розрахунок місцевих опорів «раптове розширення»	165
4.2.2. Розрахунок місцевих опорів «раптове звуження потоку»	166
4.2.3. Розрахунок місцевих опорів «поступове розширення потоку»	167
4.2.4. Розрахунок місцевих опорів «поступове звуження потоку»	168
4.2.5. Розрахунок місцевих опорів «раптовий поворот потоку»	169
4.2.5. Розрахунок місцевих опорів «повільний поворот потоку»	170
4.3. Витікання рідин із отворів і насадок	170
4.3.1. Стискування струменя.....	171
4.3.2. Витікання через малий отвір у тонкій стінці.....	173
4.3.3. Витікання через насадки.....	174
4.4. Проектування систем водопостачання підприємств	177
4.4.1. Класифікація систем водопостачання.....	177
4.4.2. Системи очищення води.....	178
4.4.3. Визначення розрахункових витрат води.....	180
4.4.4. Схеми систем водопостачання підприємств	183
4.4.5. Елементи систем водопостачання	185
4.4.5.1. Водозабірні вузли.....	185
4.4.5.2. Водопровідні насосні станції	195
4.4.5.3. Напірно-регулюючі споруди.....	198
Запитання для самоконтролю	201
РОЗДІЛ 5. ГІДРОПНЕВМОПРИВОДИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН	204
5.1. Загальна характеристика гідравлічних приводів	204
5.1.1. Структура гідроприводу технологічної машини	204
5.1.2. Рідини, що використовуються у гідроприводах	207
5.1.3. Основи взаємодії у рідких технологічних масах	209
5.1.4. Переваги та недоліки гідроприводів	211

5.2. Класифікація та аналіз основних складових гідроприводів	213
5.2.1. Оцінка загальних характеристик гідроприводів	213
5.2.2. Структурні схеми гідроприводів	216
5.2.3. Загальна будова гідроприводів	223
5.3. Основи розрахунку та проектування гідроприводів	225
5.3.1. Визначення втрат напору насосних установок гідроприводів	225
5.3.2. Розрахунок основних параметрів насосів гідросистем	228
5.3.2.1. Основні характеристики насосів	228
5.3.2.2. Поршневі насоси	231
5.3.2.3. Роторні радіально-поршневі та аксіально-поршневі насоси	234
5.4. Моделювання гідродинамічних процесів	239
5.4.1. Гідромеханічна подібність.....	239
5.4.2. Реологічні моделі рідких технологічних мас.....	241
5.4.3. П-теорема та її застосування.....	244
Запитання самоконтролю	245
РОЗДІЛ 6. РУШІЙНІ ОРГАНИ ГІДРОТЕХНІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ	
ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН.....	249
6.1. Характеристика структурних складових	249
6.1.2. Основні параметри виконавчих пристроїв	250
6.1.3. Особливості застосування гідромоторів та силових гідроциліндрів.....	253
6.2. Будова та принципи роботи виконавчих пристроїв гідросистем.....	254
6.2.1. Шестеренні або зубчасті гідромотори	254
6.2.2. Поршневі гідромотори.....	256
6.2.3. Гідроциліндри одnobічної дії.....	257
6.2.4. Гідроциліндри двобічної дії	258
6.2.5. Поворотні гідроциліндри.....	259
6.2.6. Мембранні гідроциліндри	260
6.2.7. Сильфонні гідроциліндри.....	261
6.3. Пристрої керування параметрами гідросистеми.....	262
6.3.1. Гідравлічні розподільники	262
6.3.1.1. Класифікація розподільних пристроїв та їх характеристики	263

6.3.1.2. Основні параметри	263
6.3.1.3. Золотникові розподільні пристрої	264
6.3.1.4. Кранові розподільники	268
6.3.1.5. Клапанні розподільники	270
6.3.2. Гідропідсилювачі	270
6.3.2.1. Схеми реалізації гідравлічного підсилювача зовнішньої дії	270
6.3.2.2. Класифікація гідропідсилювачів	274
6.3.2.3. Гідропідсилювач золотникового типу	274
6.3.2.4. Гідропідсилювач із соплом та заслінкою	276
6.3.2.5. Гідропідсилювач зі струменевою трубкою	277
6.3.2.6. Двокаскадні підсилювачі	278
6.4. Допоміжні пристрої гідросистем	281
6.4.1. Гідробаки і теплообмінники	281
6.4.2. Фільтри	284
6.4.2.1. поняття та класифікація пристроїв для фільтрування	284
6.4.2.2. Конструкції фільтрів	285
6.4.2.3. Установка фільтрів у гідросистему	291
6.4.3. Ущільнюючі пристрої	292
6.4.3.1. Ущільнення нерухомих з'єднань	293
6.4.3.2. Ущільнення рухомих з'єднань	294
6.4.4. Гідравлічні акумулятори	299
6.4.5. Гідрозамки	301
6.4.6. Гідравлічні реле тиску і часу	305
6.5. Пневмоприводи	309
6.5.1. Загальні визначення і принцип дії пневмоприводів	309
6.5.2. Властивості газу й рівняння, що описують ці властивості	311
6.5.3. Енергетична оцінка руху газу в елементах пневмоприводів	317
6.5.4. Пневматичні виконавчі механізми	321
6.5.5. Пневматичні агрегати і пристрої	330
6.5.6. Регулювання швидкості пневмодвигунів і схеми управління	341
Запитання самоконтролю	343

РОЗДІЛ 7. НАСОСИ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ГІДРОСИСТЕМАХ.....	346
7.1. Характеристика основних різновидів насосів гідросистем.....	346
7.1.1. Загальні відомості про насоси систем тепловодопостачання.....	346
7.1.2. Основні терміни і визначення насосів	347
7.1.3. Основні енергетичні параметри насосів	348
7.1.4. Галузь використання і умови вибору насосів	352
7.1.5. Класифікація насосів систем тепловодопостачання.....	354
7.2. Оцінка конструкцій та регулювання насосів.....	365
7.2.1. Основне рівняння лопатевих (відцентрових) насосів	365
7.2.2. Подібність відцентрових (лопатевих) насосів	369
7.2.3. Робочі характеристики відцентрових насосів.....	372
7.2.4. Робота насоса з трубопроводом.....	374
7.2.5. Регулювання подачі відцентрових насосів.....	376
7.2.6. Сумісна (паралельна і послідовна) робота насосів.....	378
7.2.7. Висота усмоктування відцентрових насосів	381
7.2.8. Робочі характеристики вісьових насосів	383
7.2.9. Робочі характеристики вихрових насосів.....	386
7.2.10. Пластинчасті, шестеренні та гвинтові насоси.....	388
Запитання самоконтролю	394
РОЗДІЛ 8. ГІДРОДИНАМІЧНІ ЕФЕКТИ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ	
.....	396
8.1. Кавітаційні ефекти у процесах переробних і харчових виробництв...	396
8.1.1. Поняття кавітації.....	396
8.1.2. Пороговий тиск при кавітації.....	397
8.1.3. Поріг кавітації.....	400
8.1.4. Пульсаційна зона при кавітації.....	409
8.1.5. Явище кавітації у гідронасосах.....	416
8.2. Гідрокорозійний та гідроерозійний вплив на технологічне обладнання переробних і харчових виробництв.....	417
8.2.1. Характеристика хімічної активності рідких технологічних середовищ харчової та переробної промисловості	417

8.2.1.1. Середовища бурякоцукрових виробництв	417
8.2.1.2. Середовища олієжирових підприємств.....	418
8.2.1.3. Середовища м'ясопереробних підприємств.....	419
8.2.1.4. Середовища молокопереробних виробництв.....	420
8.2.1.5. Середовища хлібопекарських заводів.....	421
8.2.1.6. Середовища крохмале-патокових виробництв	422
8.2.2. Дослідження дії рідких технологічних середовищ на параметри надійності обладнання галузі	423
8.2.2.1. Обладнання цукробурякових заводів.....	423
8.2.2.2. Зношування устаткування олійних виробництв	426
8.2.2.3. Обладнання м'ясопереробних підприємств	426
8.2.2.4.Обладнання молокопереробних заводів	427
8.2.3. Фізико-ерозійна дія рідких технологічних середовищ галузі	430
8.2.3.1. Ерозійне і гідроабразивне зношування.....	430
8.2.3.2. Кавітаційно-ерозійне зношування технологічного обладнання	433
8.3. Характеристика негативних гідродинамічних ефектів у гідромагістралях	438
8.3.1. Гідравлічний удар	438
8.3.2. Гідравлічний стрибок.....	440
Запитання для самоконтролю	442
Список рекомендованої літератури.....	445

ПЕРЕДМОВА

Одним із шляхів удосконалення технологічних машин, механізованих та автоматизованих ліній, що відносяться до галузевого машинобудування є проектування та створення високопотужних, малогабаритних та багатофункціональних приводів, які забезпечують високі вимоги до точності, надійності, витривалості у процесі експлуатації відповідних машин. Для вирішення таких задач є достатньо ефективні, які мають широкий попит використання саме гідравлічні технологічні системи.

Проектування, виготовлення та експлуатація таких систем вимагають глибоких знань в області гідростатики, гідродинаміки, реології, гідродинамічних процесів переробних і харчових виробництв. Даний підручник спрямований допомогти студентам засвоїти основи роботи гідравлічних систем та приводів машин, вивчити особливості та можливості їх проектування, застосування, технічного розвитку при створенні автоматизованого технологічного обладнання багатофункціонального призначення.

Дія гідравлічного технологічного оснащення засновано на використанні законів рівноваги та руху рідин, які стали результатом праці багатьох видатних вчених, серед яких можна відзначити Архімеда, Леонардо да Вінчі, Блеза Паскаля, Даніїла Бернуллі, Михайла Ломоносова, Леонарда Ейлера, Осборна Рейнольдса, Миколу Петрова, Миколу Жуковського та інших.

Науку, що вивчає закони руху рідин та задачі їх на практиці, відносять до прикладних дисциплін та називають, як правило, гідравлікою. Проте по мірі збільшення та ускладнення поставлених задач виникають нові дисципліни, зокрема, механіка рідких середовищ, гідромеханіка, гідростатика та гідродинаміка рідких технологічних мас у межах певних виробництв, різних науково-технічних областей реалізації. На теперішній час опубліковано багато навчальних підручників та посібників, серед яких можна назвати наступні видання: «Основы гидравлики» (автор Ізбаш С. В.), «Гидравлические следящие приводы для автоматизации станков (Лещенко В. А.), «Гидравлический привод металлорежущих станков» (Ермаков В. В.), «Гидравлика и гидравлические машины» (Угинчус А. А.), «Основы гидро- и пневмоприводов» (Чупраков Ю. І.),

«Машиностроительная гидравлика» (Башта Т. М.), «Лекции по анализу нелинейных гидропневматических систем и аппаратов» (Трифонов О. Н.), «Основы гидроавтоматики» (Темный В. П.), «Гидропривод и гидропневмоавтоматика» (Башта Т. М.), «Расчет пневмоприводов» (Герц Е. В., Крейнин Г. В.), «Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем» (Попов Д. Н.), «Машиностроительный гидропривод» (под редакцией Прокофьева В.Н.), «Основы гидравлики и гидропривод» (Столбов Л. С.), «Приводы автоматизированного оборудования» (Трифонов О. Н. та інші), «Курсовое и дипломное проектирование по гидроприводу самоходных машин» (Каверзин С. В.), «Гидравлика, гидравлические машины и гидроприводы ракетных двигателей» (Орлов Ю. М.). Серед багатьох вчених, що займалися проблемами використання гідравліки для вирішення складних технічних задач автоматизації машин та гідросистем, можна назвати й таких авторів книг, як Абрамов Е. І., Бирюков Б. Н., Брон Л.С., Гаминін Н. С., Кондаков Л. А., Коробочкін Б. Л., Некрасов Б.Б., Руднєв С. С., Тартаковський Ж. Е.

Гідросистеми та гідроприводи технологічних машин завдяки таким своїм унікальним особливостям, як висока енергоємність, здатність розвивати значні потужності при малих габаритах та масах виконавчих органів; простота регулювання, висока довговічність та працездатність, знайшли широке застосування у найрізноманітніших галузях, зокрема, агропромислового комплексу, транспорту, переробної та харчової промисловості, що втілюються у конструкції верстатів, промислових роботів та маніпуляторів, пресах, автоматичних лініях, технологічному оснащенні.

Широта використання гідравлічних систем вимагає від конструкторів, виробників та обслуговуючого персоналу високого рівня знань основ гідравліки, навичок у вирішенні задач їх впровадження для комплексної механізації та автоматизації сучасних технологічних ліній; навчання основам створення гідроприводів та систем гідроавтоматики, а також отримання інформації в області монтажу, регулювання та експлуатації таких систем.

У книзі автори намагалися викласти як основи гідростатики та гідродинаміки, структурні складові гідросистем, так і засоби сучасного

використання гідравлічних приводів та апаратури у технологічному обладнанні переробних і харчових виробництв; методику розрахунку, проектування гідромашин та гідромагістралей; обґрунтування та вибору параметрів гідротехнічного оснащення у межах програми навчальної дисципліни.

Навчальний підручник написано у доступній для читання формі, логічно і послідовно. Він складається з 8 розділів, які органічно поєднані між собою. У перших трьох розділах подані визначення рідини, основні її властивості, поняття гідростатичного тиску та основне рівняння гідростатики, розібрані поняття про п'єзометричну висоту і вакуум, наведені прилади для вимірювання тиску. Далі наведено визначення основних понять про рух рідини, розібрано структуру рівняння нерозривності потоку та рівняння Бернуллі, розглянуто режими руху рідини, визначені втрати напору по довжині труби та в місцевих опорах. У наступному розділі розглянуто принцип дії гідроприводу і призначення основних його елементів, розібрано принципові схеми гідроприводів. Далі представлено основні поняття стосовно рушійних механізмів гідросистем, їх основні різновиди, особливості конструкції та основи розрахунку основних параметрів, моделювання рідких технологічних мас та неоднорідних систем у харчових та переробних виробництвах. У двох останніх розділах наведено класифікацію об'ємних насосів, розглянуто будову основних об'ємних і динамічних насосів та їх основні параметри; показано основні елементи гідродвигунів: гідроциліндри, гідромотори, поворотні гідродвигуни та гідроапаратура: гідророзподільники, гідроклапани, гідро дроселі тощо.

Навчальний підручник «Гідростатика та гідродинаміка харчових виробництв» призначений для підготовки студентів, які навчаються за напрямом підготовки 181«Харчові технології». Метою навчального підручника «Гідростатика та гідродинаміка харчових виробництв» є допомога студентам опанувати необхідний обсяг знань із зазначеної дисципліни, скоротити час для самостійної підготовки, для чого в ньому у стислій формі викладено основні поняття та визначення, основні конструкції гідравлічних машин, схеми гідроприводів та гідроапаратури.

РОЗДІЛ I. РІДИНИ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ГІДРАВЛІКИ

1.1.1 Короткий історичний огляд розвитку гідравліки як науки

Особливий інтерес людина виявила до рідин на самій ранній стадії свого розвитку. Вода й повітря (інакше рідина й газ) були віднесені до основних стихій природи вже первісною людиною. Для фізіологічних потреб на добу потрібно 2,5 л. Із врахуванням витрат води на господарські, побутові, виробничі потреби в цілому на земній кулі на одного мешканця на рік припадає більш як 1000 м³ прісної води. Проте ресурси прісної води на земній кулі далеко неоднакові і більш як 500 млн. чоловік страждають від захворювань, спричинених дефіцитом або низькою якістю питної води. Запаси води на земній кулі становлять 1386 млн. км³, з них прісних тільки 2,5 %, включаючи важкодоступні льодові покриви в Антарктиді та Арктиці. Лише 30 % прісних вод залягає в поверхневих шарах земної кори [1-4,15,45].

Гідравліка – одна з найдавніших наук, розвиток якої можна умовно поділити на декілька етапів. *На першому етапі* становлення гідравліки – від найдавніших часів до 250 р. до н. е. – людство накопичувало знання про практичне використання води як найпоширенішої рідини в природі. За 7 тис років до н. е. вже були відомі пристрої для підймання води, зрошувальні системи. Стародавні греки і римляни мали добрі судна, системи водопостачання для своїх міст тощо. За 4 тис. років до нашої ери в Стародавньому Єгипті і за 1 тис. років до н. е. в Сирії та Китаї будувалися греблі і млини на ріках, зрошувальні системи.

Другий етап пов'язаний з іменем Архімеда, який написав трактат “Про плаваючі тіла” (250 р. до н.е.). Однак надалі протягом декількох сторіч у розвитку людства настала епоха загального застою, коли розвиток знань і практичного досвіду перебували на досить низькому рівні. У наступну за цим епоху відродження почався бурхливий розвиток людських знань, науки, нагромадження практичного досвіду. Нарівні з розвитком інших наук почала розвиватися й наука про вивчення взаємодії рідких тіл. У XV ст. з'являються нові праці з гідравліки, що належали Леонардо да Вінчі, зокрема, в області плавання

тіл, руху рідин по трубах і каналах, які побачивши світ лише через 400 років, вони не були своєчасно використані. В 1585 р. голландський вчений Сімон Стевін опублікував трактат “Начала гідростатики”, а Галілео Галілей в 1612 р. – трактат “Про тіла, що знаходяться у воді, і про ті, що в ній рухаються”. Значний внесок у розвиток гідравліки зробили і учні Галілео Галілея. У роботах Галілео Галілея (1564 – 1642 р.р.) були сформульовані основні принципи рівноваги й руху рідини; роботи Еванджеліста Торрічеллі (1608 – 1647 р.р.) були присвячені розв’язанню задач та виведенню закону витікання рідини з отворів (1643 р.), а Блез Паскаль (1623 – 1662 р.р.) досліджував питання з передачі тиску в рідині (1650 р.). Основні й узагальнюючі роботи в області механіки фізичних тіл, у тому числі й рідких, належать геніальному англійському фізику Ісааку Ньютону (1642 – 1727 р.р.), який уперше сформулював основні закони механіки, закон всесвітнього тяжіння й закон про внутрішнє тертя в рідинах при їхньому русі [1, 6].

Розвитку гідромеханіки (гідравліки) як самостійної науки в значній мірі сприяли праці російських учених Даніеля Бернуллі (1700 – 1782 р.р.), Леонарда Ейлера (1707 – 1783 р.р.), М.В. Ломоносова (1711 – 1765 р.р.). Роботи цих великих російських учених забезпечили справжній прорив в області вивчення рідких тіл: ними вперше були опубліковані диференційні рівняння рівноваги й руху рідини Ейлера, закон збереження енергії Ломоносова, рівняння запасу питомої енергії в ідеальній рідині Бернуллі. У 1738 р. Д. Бернуллі вивів своє знамените рівняння, яке є застосуванням закону збереження енергії до рухомої рідини, відкритого М.В. Ломоносовим. Леонард Ейлер розробив теоретичні основи гідромеханіки, запропонував її головні рівняння. Цим був покладений початок третього етапу розвитку гідравліки.

Розвитку гідравліки як прикладної науки й зближенню методів вивчення теоретичних і практичних питань, що використовуються гідравлікою й гідромеханікою, сприяли роботи французьких учених Дарсі, Буссіне та ін., а також роботи М. Е. Жуковського. Завдяки роботам цих учених, а також більш пізнім роботам Шезі, Вейсбаха, Прандля, Петрова, Шухова вдалося об’єднати теоретичні дослідження гідромеханіки із практичними та експериментальними

роботами, виконаними в області гідравліки. Роботи Базена, Пуазейля, Рейнольдса, Фруда, Стокса та ін. розвили вчення про динаміку реальної (в'язкої рідини). Даний період розвитку інженерної гідравліки можна умовно віднести до *четвертого етапу*.

П'ятий етап відзначається поглибленим вивченням фізичних властивостей рідин такими вченими, як Ж. Пуазейль, Г. Хаген, Д.І. Менделєєв, О. Рейнольдс, що започаткувало розвиток прикладної гідромеханіки, розробленням основ теорій подібності. Так, у 1823 р., А. Нав'є, а в 1845 р. Г. Стокс склали рівняння руху в'язкої рідини; Г. Гельмгольц у 1858 р. встановив основні властивості вихрового руху рідин. Диференціальне рівняння Нав'є-Стокса дозволило описати рух реальної рідини як функцію параметрів цієї рідини в залежності від зовнішніх умов. Подальші роботи в області теоретичної й прикладної гідромеханіки були спрямовані на розвиток методів розв'язання практичних завдань, розвиток нових методів дослідження, нових напрямків: теорія фільтрації, газо- і аеродинаміка та інших.

На початку ХХ ст. виникла гідроаеродинаміка, яка базувалась на працях професора М.Є. Жуковського, академіка С.О. Чаплигіна, Людвіга Прандтля, Теодора Кармана, Отто Тіт'єнса. Гідроаеродинаміка, що визначала бурхливий розвиток авіації, значно вплинула і на розвиток гідравліки. *На шостому етапі* були розроблені теорія гідравлічного удару, теорія гребного гвинта суден, заснована російська школа теорії фільтрації, з'явилися гідродинамічна теорія мащення, теорія нерівномірного руху рідин у відкритих руслах (Б. О. Бахметьєв, М. М. Павловський).

Засновником сучасного, *сьомого етапу* розвитку гідравліки вважається академік М.М. Павловський, який розвинув теорію фільтрації, дав метод електрогідродинамічних аналогій (ЕГДА), розв'язав ряд інших питань гідравліки. Значний вклад у розвиток гідравліки в цей період внесли вчені Й. І. Агроскін, О. Н. Ахутін, М. Т. Башта, М. А. Великанов, М. М. Гришин, Ю. М. Даденков, Є. О. Замарін, І. О. Кібель, М. Є. Кочин, М. В. Кирпичов, Л. С. Лейбензон, А. І. Некрасов, Г. А. Нікітін, П. Я Полубаринова-Кочина, Г. Ф. Проскура, Г. Й. Сухомел, А. О. Угінчус, С. О. Христіанович, М. Д. Чертоусов, Р.

Р. Чургаєв. та багато інших учених.

Значний внесок у розвиток гідравліки також був зроблений вченими та інженерами України. Так, ще в 1111 р. на р. Дніпро був побудований наплавний міст, що було безпосередньою реалізацією законів гідравліки на практиці. Яскравим прикладом практичної реалізації законів гідравліки є Дніпровський гідроенергетичний комплекс, який складається з п'яти великих гідроелектростанцій та понад 150 малих гідроелектростанцій, які побудовані в Україні. Безумовно, теоретичною базою для цих гідротехнічних споруд були закони гідравліки, застосування яких тепер здійснюється українськими вченими та інженерами-гідротехніками, в процесі їх експлуатації [2].

Таким чином, можна відзначити, що гідравліка – наука про закони руху та рівноваги рідини і способи використання цих законів для розв'язання інженерних задач. В аспекті переробних і харчових виробництв дана загально-технічна дисципліна нерозривно пов'язана з розвитком цілого ряду галузей господарчої та виробничої діяльності: гідромеліорації, гідроенергетики, гідромашинобудування, водопостачання і каналізації досліджуваних підприємств. Тобто гідравліка являє собою теоретичну дисципліну, що вивчає питання, пов'язані з механічним рухом рідини в різних природних і техногенних умовах. Оскільки рідина (і газ) розглядаються як безперервні й неподільні фізичні тіла, то гідравліку часто розглядають як один з розділів механіки так званих суцільних середовищ, до яких прийнято відносити й особливе фізичне тіло – рідину. Із цієї причини гідравліку часто називають механікою рідини або гідромеханікою. **Предметом** досліджень гідравліки є основні закони рівноваги й руху рідин і газів. Як у класичній механіці в гідравліці можна виділити загальноприйняті складові частини: гідростатику, що вивчає закони рівноваги рідини; кінематику, що описує основні елементи рідини, що рухається, і гідродинаміку, що вивчає основні закони руху рідини, що й розкриває причини її руху.

Гідравліку можна назвати базовою теоретичною дисципліною для широкого кола прикладних наук, за допомогою яких досліджуються процеси, що супроводжують роботу гідравлічних машин і гідроприводів. За допомогою

основних рівнянь гідравліки й розроблених нею методів дослідження, вирішуються важливі практичні завдання, пов'язані із транспортуванням рідин і газів по трубопроводах, а також із транспортуванням твердих тіл по трубах та інших руслах. Гідравліка також вирішує найважливіші практичні завдання, пов'язані з рівновагою твердих тіл у рідинах і газах, тобто вивчає питання плавання тіл. Широке використання в практичній діяльності людини різноманітних гідравлічних машин і механізмів ставлять гідравліку в число найважливіших дисциплін, що забезпечують науково-технічний прогрес. Великий практичний інтерес до вивчення механіки рідини викликаний об'єктивними факторами. По-перше, наявність у природі значних запасів рідин, які легко доступні людині. По-друге, рідкі тіла мають багато корисних властивостей, що роблять їх зручними робочими агентами в практичній діяльності людини. Немаловажним слід вважати й той фактор, що більшість життєво важливих хімічних реакцій обміну протікають у рідкій фазі (найчастіше у водяних розчинах).

1.1.2. Основні поняття гідравліки

Щоб представити й правильно зрозуміти характер поведінки рідини у різних технологічних умовах необхідно звернутися до деяких уявлень класичної фізики про рідину як фізичне тіло. Не ставлячи перед собою ціль детального й всебічного опису рідких тіл, що докладно розглядається в класичному курсі фізики, нагадаємо лише деякі положення, які можуть бути необхідними при вивченні гідравліки як самостійної дисципліни.

Так, згідно з молекулярно-кінетичною теорією будови речовини всі фізичні тіла в природі (незалежно від їхніх розмірів) перебувають у постійній взаємодії між собою. Ступінь (інтенсивність) взаємодії залежить від мас цих тіл і від відстані між тілами. Кількісною мірою взаємодії тіл є сила, яка пропорційна масі тіл і завжди буде убувати при збільшенні відстані між тілами. У залежності від розмірів тіл (елементарні частки, атоми й молекули, макротіла) характер взаємодії буде різним. Згідно класичним уявленням фізики можна виділити чотири види взаємодії тіл. Кожний вид взаємодії обумовлений наявністю свого

переносника взаємодії. Два види взаємодії ставляться до типу далекодіючих і повсякденно спостерігаються людиною: гравітаційне й електромагнітне. При електромагнітній взаємодії відбувається процес випромінювання й поглинання фотонів. Саме цей процес створює електромагнітні сили, під дією яких протікають практично всі процеси в природі, які ми спостерігаємо. Характерною рисою цієї (електромагнітної) взаємодії є те, що її прояв залежить від багатьох зовнішніх умов, котрі призводять до різних спостережуваних результатів. Так маючи одну й ту саму природу взаємодії (електромагнітну) ми вивчаємо, на перший погляд, зовсім різні фізичні процеси: рух рідини, тертя, пружність, передачу тепла, рух зарядів в електричному полі та ін. І, як наслідок, диференційні рівняння, що описують ці процеси, однакові.

Згідно з молекулярно-кінетичною теорією будови речовини молекули перебувають у рівновазі й, як матеріальні об'єкти постійно взаємодіють один з одним. Таку рівновагу не можна вважати абсолютною, тому що молекули перебувають у стані хаотичного руху (коливання) навколо центру своєї рівноваги. Відстань між молекулами речовини буде залежати від величин сил діючих на молекули. Незалежно від природи діючих сил їх можна згрупувати на сили притягання й сили відштовхування.

Умова рівноваги цих сил визначає оптимальні відстані між молекулами. Однак, у зв'язку з тим, що така рівновага між діючими силами є динамічною рівновагою, молекули перебувають у постійному коливальному русі відносно одна від одної, при цьому на них діє деяка рівнодіюча сила породжена силами притягання й відштовхування. Тому особливості стану речовини будуть залежати від співвідношення між кінетичною енергією коливального руху молекул речовини й енергією взаємодії між молекулами речовини. Так при більших масах молекул енергія взаємодії між молекулами багаторазово перевищує кінетичну енергію коливального руху речовини, внаслідок чого молекули речовини займають стійке положення відносно одна до одної, забезпечуючи тим самим сталість форми й розмірів макротіла. Такі речовини, як відомо, належать до категорії твердих тіл. Протилежними особливостями характеризуються речовини, що складаються із "легких" молекул (молекул, що

володіють малою масою). Такі речовини мають кінетичну енергію коливального руху молекул речовини перевищуючої багаторазово енергію взаємодії між молекулами, з яких речовина складається. З цієї причини молекули такої речовини мають дуже слабкий зв'язок між собою й легко переміщуються в просторі на будь-які відстані. Така властивість речовини має назву дифузії (летючості). Речовини, що володіють цією властивістю, належать до категорії газів. У тих випадках, коли енергія взаємодії має той же порядок, що й величина кінетичної енергії коливального руху молекул, останні мають властивість відносної рухливості, але, при цьому, зберігають цілісність самого макротіла. Таке тіло має здатність легко деформуватися при мінімальних дотичних напруженнях, тобто таке тіло має текучість. Насправді коливальний процес серед молекул рідких тіл досить складний, і з метою простого опису даного процесу можна зобразити спрощену картину взаємодії молекул рідини. Так на відміну від молекул у твердих тілах, при коливальному процесі в рідині центри взаємодії молекул можуть зміщуватися в просторі на стільки, на скільки це допускають відстані між молекулами. Зсув центру рівноваги сил у просторі називається релаксацією. Час, за який відбувається такий зсув, називається часом релаксації t_p . При цьому зсув центру рівноваги здійснюється не поступово, а стрибком. Таким чином, час релаксації характеризує тривалість "осілого життя" молекул рідини. Якщо на рідину буде діяти деяка сила F , то при збігу лінії дії цієї сили з напрямком стрибка, рідина почне переміщуватися. При цьому необхідно виконання додаткової умови: тривалість дії сили повинна бути більше тривалості часу релаксації t_p , бо якщо ні, то рідина не встигне почати свій рух, і буде випробовувати пружний стиск подібно твердому тілу. Тоді процес руху рідини буде характеризувати властивість текучості, яка характерна тільки рідким тілам. Тіла з такими властивостями належать до категорії рідких тіл.

При цьому слід зазначити, що чітких і твердих границь між твердими, рідкими й газоподібними тілами немає. Є більша група тіл, яка займає проміжне положення між твердими тілами й рідинами й між рідинами й газами. Взагалі говорити про стан речовини можна тільки при цілком певних зовнішніх умовах. У якості стандартних умов прийняті умови при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ й

атмосферному тиску. Стандартні (нормальні) умови цілком співвідносяться з поняттям сприятливих зовнішніх умов для існування людини. Поняття про стан речовини необхідно доповнити. Так при збільшенні кінетичної енергії молекул речовини (нагрівання речовини) тверді тіла можуть перейти в рідкий стан (плавлення твердого тіла) і тверді тіла придбають при цьому деякі властивості рідин. Подібно цьому збільшення кінетичної енергії молекул рідкої речовини може привести рідину в газоподібний стан (пароутворення) і при цьому рідина буде мати властивості відповідні до газів. Аналогічним способом можна перетворити розплавлене тверде тіло в пару, якщо більшою мірою збільшити кінетичну енергію коливального руху молекул спочатку твердої речовини. Зменшення кінетичної енергії молекул (охолодження речовини) призведе процес у зворотному напрямку. Газ може бути перетворений у рідкий, а, потім і у твердий стан.

1.1.3. Методи досліджень у гідравліці

При розв'язанні практичних питань гідравліка оперує всіма відомими методами досліджень: методом аналізу нескінченно малих величин, методом середніх величин, методом аналізу розмірностей, методом аналогій, експериментальним методом.

Метод аналізу нескінченно малих величин - найбільш зручний із усіх методів для кількісного опису процесів рівноваги рідин і газів. Цей метод найбільш ефективний у тих випадках, коли необхідно розглядати рух об'єктів на атомно-молекулярному рівні, тобто в тих випадках, коли для виведення рівнянь руху доводиться розглядати рідину (або газ) з молекулярно-кінетичної теорії будови речовини. Основний недолік методу - досить високий рівень абстракції, що вимагає від читача великих знань в області теоретичної фізики й розуміння користуватися різними методами математичного аналізу, включаючи векторний аналіз.

Метод середніх величин - є більш доступним методом, оскільки його основні положення базуються на простих (близьких до повсякденних) уявленнях про будову речовини. При цьому виведення основних рівнянь у більшості

випадків не вимагають знань молекулярно-кінетичної теорії, а результати, отримані при дослідженнях цим методом, не суперечать "здоровому глузду" і видаються обґрунтованими. Недолік цього методу досліджень пов'язаний з необхідністю мати деякі апріорні уявлення про предмет досліджень.

Метод аналізу розмірностей може розглядатися в якості одного з додаткових методів досліджень і припускає всебічне знання досліджуваних фізичних процесів.

Метод аналогій - використовується в тих випадках, коли є в наявності детально вивчені процеси, що належать до того ж типу взаємодії речовини, що й досліджуваний процес.

Експериментальний метод є основним методом вивчення, якщо інші методи за будь-якими причинами не можуть бути застосовані. Цей метод також часто використовується як критерій для підтвердження правильності результатів отриманих іншими методами [6].

В остаточному підсумку, метод вивчення руху рідини, а також рівень вивчення (макро- або мікро-) вибирається з умов практичної постановки завдань і співвідношення характерних розмірів. Основним мірилом для цих характерних розмірів може бути довжина вільного пробігу молекул. Так для вивчення руху рідини на макро- рівні необхідно, щоб характерні розміри: L (деяка довжина) і d (ширина) стосовно довжини вільного пробігу молекул λ , перебували у відповідності:

$$L \gg \lambda, \text{ та } d < \lambda$$

1.2. ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН

1.2.1. Основні визначення

Вивчення реальних рідин і газів пов'язане зі значними труднощами, тому що фізичні властивості реальних рідин залежать від їхнього складу, від різних компонентів, які можуть утворювати з рідиною різні суміші як гомогенні (розчини) так і гетерогенні (емульсії, суспензії та ін.). Із цієї причини для виведення основних рівнянь руху рідини доводиться користуватися деякими абстрактними моделями рідин і газів, які наділяються властивостями

невластивими природним рідинам і газам.

Ідеальна рідина – модель природної рідини, що характеризується ізотропністю всіх фізичних властивостей і, крім того, характеризується абсолютною нестисливістю, абсолютною текучістю (відсутність сил внутрішнього тертя), відсутністю процесів теплопровідності й теплопереносу.

Реальна рідина – модель природної рідини, що характеризується ізотропністю всіх фізичних властивостей, але на відміну від ідеальної моделі, має внутрішнє тертя при русі.

Ідеальний газ – модель, що характеризується ізотропністю всіх фізичних властивостей і абсолютною стисливістю.

Реальний газ – модель, при якій на стисливість газу при умовах близьких до нормальних умов суттєво впливають сили взаємодії між молекулами.

При вивченні руху рідин і газів теоретична гідравліка (гідромеханіка) широко користується уявленням про рідину як про суцільне середовище. Таке допущення цілком виправдане, якщо врахувати, що розміри простору займаного рідиною, у багато разів перевершують міжмолекулярні відстані (виключенням можна вважати лише розріджений газ). При вивченні руху рідин і газів останні часто розглядаються як рідини із деякими особливими властивостями. У зв'язку із цим прийнято розрізняти дві категорії рідин: краплинні рідини (практично нестисливі тіла, або саме рідини) і стисливі рідини (гази).

Рідина – фізичне тіло, що володіє властивістю текучості, в силу чого рідина не має власної форми й приймає форму посудини, в яку вона потрапляє.

Рідини діляться на два види: краплинні й газоподібні. *Краплинні рідини* характеризуються більшим опором стиску (майже нестисливі), що становить практично повний опір силам стикання; малим опором розтягувальним і дотичним зусиллям, які обумовлені незначністю дії сил зчеплення і сил тертя між частинами рідини. До краплинних рідин відносять воду, нафту і нафтопродукти, бензин, керосин, ртуть, спирт і таке інше. *Газоподібні рідини* характеризуються великою силою стискання і не оказують опір ні дотичним зусиллям ні зусиллям які направлені на розтягування, крім того вони мають малу в'язкість. До газоподібних рідин належать усі гази. Останні здатні до досить значного

зменшення свого об'єму під дією тиску й до необмеженого розширення при відсутності тиску. На відміну від газів (стисливі рідини) краплинні рідини утворюють вільну поверхню.

При виконанні гідравлічних розрахунків у першому наближенні вважають, що рідина нестислива, не розширюється під дією зовнішніх факторів, відсутні сили внутрішнього тертя. Однак, в уточнених розрахунках гідросистем, гідро- та паропроводів, проектуванні котельних установок і конструюванні турбін і вентиляторів ураховуються реальні фізико-механічні властивості застосовуваних рідин - густина, в'язкість, стисливість, теплопровідність та інші.

1.3. ОСНОВНІ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ РІДИН

1.3.1. Показники якості води для системи водопостачання з поверхневих джерел

Якість води природних джерел залежить від наявності різних мікроорганізмів, речовин неорганічного та органічного походження, які характеризуються фізичними, хімічними, бактеріологічними і біологічними показниками [3].

1.3.1.1. Фізичні показники

Фізичні показники включають каламутність (або вміст завислих речовин), кольоровість, температуру, запах, присмак. Вода з поверхневих джерел може мати кольоровість від 0 ... 10 до 150 ... 300 град платино – кобальтової шкали (ПКШ), каламутність від 5 ... 10 мг / л до 1500 мг / л і більше, запах і присмак до 5 балів, температуру в межах 0 ... 25 °С. води поверхневих джерел вважають малокаламутними при каламутності до 50 мг / л, середньої каламутності – 50 ... 250 мг / л, каламутні 250 ... 1500 мг / л, високої каламутності – понад 1500 мг / л; малокольорові – кольоровість до 35 град., середньої кольоровості – 35 ... 120 град., високої кольоровості – понад 1290 град. Температура підземної води знаходиться в межах 7 ... 15 0С, а каламутності, кольоровості, присмаку, запаху вона практично немає, тому її використання є суттєвим резервом для систем водопостачання.

Основні вимоги до якості води в системі централізованого господарсько – питного водопостачання наведено в таблиці 1 1.

Таблиця 1.1 Основні вимоги стандарту до якості води

№ п № п/ п	Показник	ГОСТ 2874 - 82	Сан П і Н України	Сан П і Н Росії	Вимоги ЄС	Рекомендації ВООЗ
1 1.	Мутність, мг / л НЕМ	≤ 1,5 (≤ 2,0)	≤ 0,5 (≤ 1,5)	≤ 2,6	≤ 4,0	-
.2.	Колір, градус	≤ 20 (≤ 35)	≤ 20 (≤ 35)	≤ 20	≤ 20	≤ 15
33.	Смак, присмак, бал, ПР	≤ 2	≤ 2	≤ 2	-	-
44.	Показник рН	6 ... 9	6,5 ... 8,5	6,0 ... 9,0	6,5 ... 8,5	7,0 ... 9,2
5.	Лужність, мг екв. / л	-	0,5 ... 6,5	-	0,5	-
66.	Жорсткість, мг екв. / л	≤ 7 (≤ 10)	1,5 ... 7,0	≤ 7,0	≤ 1,2	0,2 ... 2,0
77.	Окисленність (пермагентна), мг О ₂ / л	-	≤ 4,0	≤ 5,0	≤ 5,0	≤ 3
88.	Сухий залишок, мг / л	≤ 1000 (≤ 1500)	100 ...1000	≤ 1000	≤ 1500	≤ 1000
99.	Хлориди, мг / л	≤ 350	≤ 250	≤ 350	≤ 250	≤ 250
110.	Сульфати, мг / л	≤ 500	≤ 250	≤ 500	≤ 250	≤ 250
111.	Залізо, мг / л	≤ 0,3 (≤ 1,0)	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,2	≤ 0,3
112.	Марганець, мг / л	0,1 (≤ 0,5)	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,05	≤ 0,05
113.	Фтор, мг / л	0,7 ... 1,5	0,7 ... 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5
114.	Остаточний алюміній	≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,2
1	Остаточний хлор, мг / л					

115.	- вільний	0,3 ... 0,5	0,3 ... 0,5	-	-	-
116.	- зв'язаний	0,8 ... 1,2	0,8 ... 1,2	-	-	-
17.	Нітрати, мг / л	≤ 45	≤ 45	≤ 45	≤ 50	≤ 50
118.	Тригалометани, мг / л	-	≤ 0,1	-	-	≤ 0,1

1.3.1.2. Хімічні показники

Хімічні показники визначаються наявністю загальної кількості розчинених речовин. Найбільш характерними показниками є активна реакція або показник рН = 6,5 ... 8,0, жорсткість (2 ... 8 мг. екв. / л для поверхневих вод, а для підземних – 14 і більше), сухий залишок (при визначенні вище 1000 мг / л вода є мінералізованою), вміст заліза (до 1 ... 2 мг / л у поверхневих та 1 ... 10 і більше в підземних), радіоактивність природних вод - не більше $3 \cdot 10^{-11}$ З кі / л тощо.

1.3.1.3. Бактеріологічні показники

Бактеріологічні показники характеризуються загальною кількістю бактерій, що містяться у 1 мл води, і кішкової палички, яка міститься в 1 л води (колі - індекс). Ці показники можуть бути близькими до нуля для підземних вод і десятки – сотні та більше – для поверхневих.

1.3.1.4. Біологічні показники

Біологічні показники здебільшого характерні для поверхневих вод і залежать від вмісту рослинних або тваринних організмів. Вони можуть перебувати у стані зависі (планктон) або бути причепленими до дна (бентос). Кількість їх оцінюється штуками в одному мілілітрі води і коливається від нуля до 1000 і більше.

Вода для господарсько – питних потреб централізованого господарсько – питного водопостачання повинна відповідати Державного стандарту України № 383 – 96 „Вода питна”: каламутність – менше 1,5 мг / л; кольоровість – менше 20 град. ПКШ; запах і присмак – менше 2 балів; колі – індекс – менше 3; загальна

кількість бактерій – менше 100; загальна жорсткість – менше 7 мг. екв. / л; рН – 6,5 ... 8,5; сухий залишок – менше 1000 мг / л; вміст заліза – менше 0,3 мг / л; фтору – 500 мг / л; хлоридів – менше 350 мг / л.

1.3.2. Екологічна безпека природних підземних вод

Встановлення правових норм охорони водних об'єктів від засмічення, забруднення і виснаження, а також запобігання шкідливій дії вод – одне з головних завдань водного законодавства. Потреба таких норм зумовлена розвитком промисловості, сільського господарства та будівництва міст. Вони спричиняють різке зростання потреб використання води, призводять до істотного зростання стічних і дренажних вод, забруднених різними речовинами.

В основах водного законодавства всі води потребують охорони від забруднення і виснаження, які можуть завдати шкоди здоров'ю населення, та зумовити зменшення рибних запасів, погіршення умов водопостачання та інші небажані наслідки через зміну фізичних, хімічних і біологічних властивостей води, погіршення її здатності до природного самоочищення, порушення гідрологічного й гідрогеологічного режиму. Крім суворого обмеження використання водних об'єктів для скидання стічних вод встановлюються також інші обмеження. Повністю забороняється скидання у водні об'єкти виробничих і побутових відходів та покидьків. Не допускається забруднення й засмічення поверхні водозаборів та льодового покриву водойм відходами та викидами, зливання яких може призвести до погіршення якості поверхневих і підземних вод.

Для підтримання сприятливого водного режиму річок, озер, водосховищ, підземних вод та інших водних об'єктів, для запобігання водній ерозії ґрунтів і замулюванню водойм, для зменшення втрат та різкого коливання річкового і підземного стоку водним законодавством передбачається встановлення водоохоронних зон лісів, обов'язкове проведення лісомеліоративних, протиерозійних, гідротехнічних та інших заходів. Головним заходом проти виснаження водних ресурсів є здійснення раціонального режиму експлуатації водогосподарських систем і споруд. Результатом нераціонального використання

людиною поверхневих і підземних вод, недооцінки законів природи або нехтування ними є водна ерозія ґрунтів, яроутворення, заболочування й засолювання земель, періодичне затоплення і підтоплення населених пунктів тощо.

Водне законодавство країни передбачає обов'язки підприємств, організацій і установ здійснювати заходи щодо запобігання та ліквідації: повеней, затоплень і підтоплень; руйнування берегів, захисних дамб та інших споруд; заболочування і засолювання ґрунтів; ерозії ґрунтів, утворювання ярів, зсувів, селевих потоків та інших шкідливих явищ. Для боротьби зі шкідливою дією вод передбачаються захисні лісонасадження з метою запобігання ерозії ґрунтів, зсувам і селевим потокам; застосування протиерозійної агротехніки, водоохоронне лісорозведення та інші сільськогосподарські меліоративні роботи.

Охорона природи, раціональне використання природних, у тому числі й водних, ресурсів – одне з найважливіших загальнодержавних завдань нашої країни. На сучасному етапі можна виділити три основних напрями екологічної політики – профілактичні заходи, усунення минулих помилок і збереження в недоторканності особливо цінних природних об'єктів.

Перший напрям пов'язаний із запобіганням виникненню шкідливої антропогенної дії на природу. Він поширюється на всю сферу господарської діяльності. *Другий напрям* спрямований на виправлення допущених екологічних помилок і недоліків, на усунення негативної дії на природу. Раніше багато підприємств будувалися без достатніх технічних заходів, що призначалися для охорони природи. *Третім напрямом* екологічної політики передбачається створення і розвиток заповідників, заказників, національних парків, пам'яток природи. Всі ці три напрями екологічної політики разом сприяють гарантованому успіху раціонального використання й охорони водних ресурсів.

Відповідно до водного законодавства державний контроль за використанням і охороною вод має забезпечити отримання всіма міністерствами, відомствами, підприємствами установами, організаціями і громадянами прийнятого порядку користування водами, виконання обов'язків з охорони вод від забруднення, засмічення та виснаження, запобігання їх шкідливому впливу,

а також дотримання правил обліку використання вод та інших, встановлених водним законодавством країни. Державний контроль за використанням та охороною вод здійснюють ради народних депутатів, їх виконавчі та розпорядчі органи, а також спеціальні уповноважені державні органи.

1.3.3. Нормування та вимоги до якості питної води у системі водопостачання

Якість води оцінюють за її складом та властивостями, після чого визначається її придатність до тих чи інших цілей. Особливо жорсткі вимоги пред'являють до води, яка використовується для господарсько - питних потреб споживачів виробничих, житлових і громадських будинків. Ця вода повинна відповідати вимогам Держстандарту України ДСТ 2874 – 96 “Вода питна”.

Нормування концентрації тих чи інших речовин обумовлене необхідністю забезпечення сприятливих органолептичних властивостей питної води, нешкідливості її хімічного складу і безпеки води в санітарному відношенні. Невідповідність хоча б одного з цих нормативів вимогам стандарту дає підставу для визнання непридатності води для питних цілей.

Наприклад, залізо у воді навіть у великих концентраціях не проявляє токсичну дію на організм людини, але надає воді жовто-коричневого кольору, погіршує її смак, викликає розвиток залізобактерій та відкладення осаду в трубопроводі, якщо його концентрація перевищує 0,3 мг/л. Лімітуючою ознакою шкідливості для сполук заліза є органолептична характеристика. Те ж стосується марганцю.

Навпаки, такі хімічні речовини, як сполуки стронцію, нітрати, не змінюючи органолептичні властивості води, виявляються токсичними для людини. Наприклад, стронцій в концентраціях більше 7 мг/л пригнічує активність багатьох ферментів. В той же час гіркий присмак у воді з'являється лише при концентраціях стронцію більше 12 мг/л. Для таких сполук лімітуючою ознакою шкідливості є санітарно – токсикологічна складова.

Питна вода є продукцією водопроводів, внаслідок того, що вона є „питною”, до неї висуваються високі вимоги по відношенні що до її впливу на

здоров'я людини.

Перший у світі стандарт на питну воду з'явився в 1925 році в США на той час більш розвинутій промисловій країні світу. Першим у Європі в 1937 р. став тимчасовий Державний стандарт (ГОСТ) на питну воду СРСР (другий у світі). Перший постійний стандарт СРСР було прийнято в 1945 р.

Потім стандарт (ГОСТ) передивлялися в 1954, 1973 і в 1982 рр. Зараз на території нашої країни діє Державний стандарт „Вода питна” (ГОСТ 2874 – 82). Одночасно на території України вводиться в дію Державний стандарт України № 383 – 96 „Вода питна”. Гігієнічні вимоги до якості води в системах централізованого господарсько - питного водопостачання” (строк введення з 2005 р.)

В 1958 р. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). Прийняла Перший Міжнародний стандарт на питну воду (Guidelines for drinkingwater quality). В 1973 і 1993 рр. Стандарт було переглянуто. Причинами перегляду стандартів полягали у наступному:

- освоєнню нових районів, використання для водопроводів нових джерел води з новими властивостями, різними включеннями;
- використання при очищенні води нових реагентів (з розвитком хімічного виробництва), остаточний вміст яких повинен бути обмежено;
- науково – технічний прогрес, внаслідок якого створені умови для нових хімічних з'єднань, які потрапляють до води, як від промислових підприємств так і сільського господарства.

Стандарт поділяє показники якості води на три категорії:

- 1) бактеріологічні (щодо запобігання інфекційних захворювань);
- 2) токсикологічні (які мають негативний вплив на стан здоров'я людини);
- 3) органолептичні (що погіршують зовнішній вид, смак, запах води, впливаючи на органи чуйності людини).

Більшість горизонтів підземних вод містять воду питної якості. Але зустрічаються випадки, коли вода не відповідає вимогам Держстандарту України ДСТ 383 – 96 „Вода питна”. В таких випадках в системах постачання води передбачаються споруди для поліпшення їх якості.

Водопостачання в сільському господарстві здійснюється із джерел підземних вод та відкритих водоймищ. В процесі кругообігу вода забруднюється різними домішками – піском, глиною, мулом, колоїдними речовинами, солями, газовою фазою, а також відходами господарсько – побутового призначення та промислових підприємств. При цьому до води попадають патогенні (хвороботворні) мікроби та мікроорганізми, які можуть стати джерелами багатьох захворювань.

Питна вода повинна бути нешкідливою для організму людини та тварин, мати хороші смакові та питні якості взагалі бути придатною для господарсько – побутових потреб.

Воду, яка не відповідає вимогам стандарту, необхідно обробляти належним чином. Обробка води складається з двох процесів покращення її фізичних та хімічних властивостей – показників освітлення, знебарвлення, пом'якшення, вилучення заліза та очищення від патогенних мікроорганізмів – знезараження.

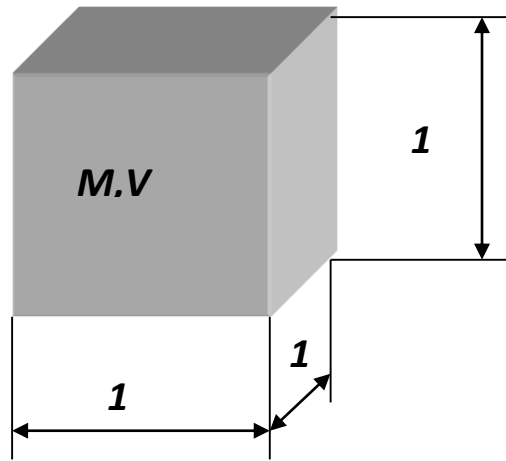
Воду необхідно знезаражувати в усіх випадках, коли її забирають для технологічних та господарсько-побутових потреб з відкритих джерел (водоймищ) та неглибоких підземних джерел (верховодка).

1.4. ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН

1.4.1. Густина

Густина рідини являє собою масу одиниці об'єму, і для нескінченно малого об'єму рідини масою dM може бути визначена за формулою:

$$\rho = \frac{dM}{dV}$$



Для однорідних рідин можна вважати, що $\rho = \frac{M}{V}$, $[\text{кг}/\text{м}^3]$, $[\text{кг}/\text{дм}^3]$, $[\text{кг}/\text{л}]$, $[\text{г}/\text{см}^3]$

де M – маса рідини, V – об’єм рідини.

Густина рідини залежить від температури й тиску. Всі рідини, окрім води, характеризуються зменшенням густини зі зростанням температури. В цьому проявляється одна з аномальних властивостей води.

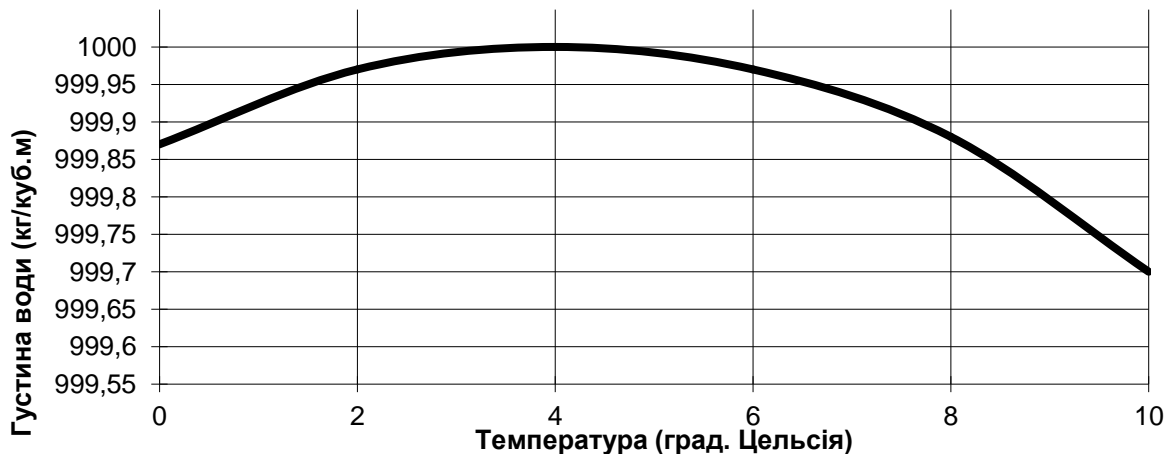


Рисунок 1.1. Залежність густини води від температури

Температура, при якій густина води максимальна, зі збільшенням тиску зменшується. Так, при тиску 14 МПа вода має максимальну густину при 0,6 °С (рис.1.1). Густина води має максимум при $t = 4^{\circ}\text{C}$ і зменшується при будь-яких інших.

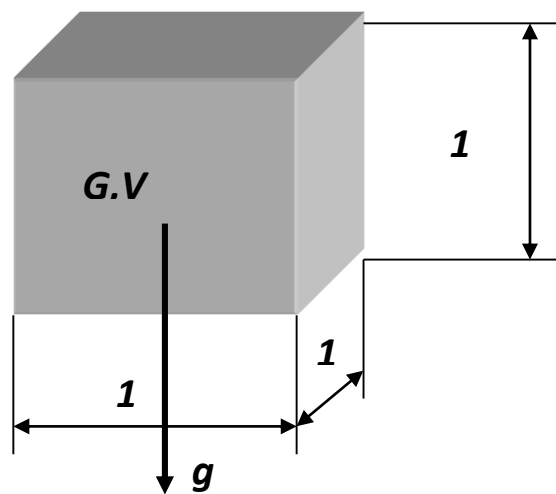
Густина прісної води дорівнює $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, солоної морської води - $1020 \div 1030 \text{ кг}/\text{м}^3$, нафти і нафтопродуктів – $650 \div 900 \text{ кг}/\text{м}^3$, ртуті – $13596 \text{ кг}/\text{м}^3$.

При зміні тиску густина рідин змінюється незначно. У більшості випадків густину рідини у розрахунках можна приймати сталою. Однак зустрічаються випадки, коли зміною густини зневажати неможливо, так як це може привести до значних помилок.

1.4.2. Питома вага

Питома вагою рідини γ - називається вага одиниці її об'єму. Ця величина виражається формулою для нескінченно малого об'єму рідини dV з вагою dG :

$$\gamma = \frac{dG}{dV} = \frac{gdM}{dV}.$$



Для однорідних рідин можна вважати, що $\gamma = \frac{G}{V} = \frac{Mg}{V}$, $[Н/м^3], [Н/дм^3], [Н/л], [Н/см^3], 1Н=1кг \cdot м/с^2$; G – вага рідини.

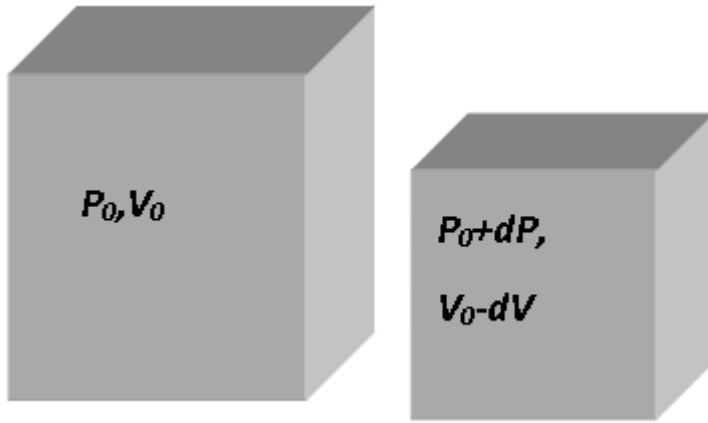
Питома вага рідини й густина пов'язані співвідношенням: $\gamma = \rho g$,

де g – прискорення вільного падіння: значення g змінюється від $9,831 м/с^2$ на полюсах до $9,781 м/с^2$ на екваторі.

1.4.3. Стисливість рідини

Стисливість рідини це властивість рідин змінювати свій об'єм при зміні тиску. Стисливість характеризується *коефіцієнтом об'ємного стиску* (стисливості) β_p , який представляє собою відносну зміну об'єму рідини V при

зміні тиску P на одиницю: $\beta_p = -\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dp} \cdot Па^{-1}$ $1Па=1Н/м^2$



Знак мінус у формулі вказує, що при підвищенні тиску об'єм рідини зменшується.

Перепишемо визначення β_P у вигляді
$$\beta_P = -\frac{dV}{V_0} \frac{1}{dp}.$$

Величина, зворотна до коефіцієнту стисливості β_P , позначається

$$E_p = \frac{1}{\beta_P}, [Па], [МПа], [кгс/см^2]$$
 і називається об'ємним модулем пружності рідини.

Тоді попередня формула набуває вигляду

$$E_p = \rho \frac{dP}{d\rho}.$$

Цей вираз має назву закону Гука для рідини.

Модуль пружності E_p залежить від температури й тиску (рис.1.2).

Тому розрізняють два модулі пружності: адіабатний та ізотермічний. Перший має місце у швидко протікаючих процесах без теплообміну. Процеси, що протікають у більшості гідросистем, відбуваються з теплообміном, тому частіше використовується ізотермічний модуль пружності.

Приклад форми залежностей E_p від P і t_p наведений на графіках. Все це говорить про те, що рідини не зовсім точно відображають закон Гука.



Рисунок 1.2. Залежність модуля пружності E_p від температури й тиску

Стосовно прикладів значень модулів пружності мінеральні оливи, що використовуються в технологічних машинах з гідравлічним приводом, при $t^0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ мають об'ємні модулі пружності $1,35 \cdot 10^3 \div 1,75 \cdot 10^3$ МПа, бензин і керосин – приблизно $1,3 \cdot 10^3$ МПа, гліцерин - $4,4 \cdot 10^3$ МПа, ртуть – у середньому $3,2 \cdot 10^3$ МПа.

При експлуатації гідравлічних систем відбуваються випадки, коли внаслідок дії того, або іншого збудження в рідині може значно мінятися тиск. В таких випадках зневаження стисливістю призводить до суттєвих помилок.

1.4.4. Температурне розширення рідини

Температурне розширення рідини полягає в тому, що вона може змінювати свій об'єм при зміні температури. Ця властивість характеризується **температурним коефіцієнтом об'ємного розширення**, який представляє собою відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на одиницю (на 1°C) при сталому тиску:

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}.$$

По аналогії з властивістю стисливості рідини можна записати

$$V = V_0(1 + \beta_t dt) \text{ або через густину } \rho = \frac{\rho}{1 + \beta_t dt}.$$

Зміна об'єму при зміні температури відбувається внаслідок зміни густини. Для більшості рідин коефіцієнт β_t з підвищенням тиску зменшується. Коефіцієнт β_t зі зменшенням густини нафтопродуктів від 920 до 700 кг/м^3 підвищується від $0,0006$ до $0,0008$; для робочих рідин гідросистем β_t звичайно приймають незалежними від температури. Для цих рідин підвищення тиску від атмосферного до 60 МПа приводить до зростання β_t майже на $10 - 20$ %. При цьому, чим вища температура робочої рідини, тим більше підвищується β_t . Для

води з підвищенням тиску при температурі до 50°C β зростає, а при температурі понад 50°C зменшується.

1.4.5. Кипіння

Кипіння – здатність рідини переходити в газоподібний стан. Інакше ця властивість рідин має назву *випаровування*.

Рідину можна довести до кипіння підвищуючи температуру до значень більших за температуру кипіння при даному тиску, або зниженням тиску до значень, менших ніж тиск насичених парів $p_{\text{нт}}$ рідини при даній температурі. Утворення бульбашок при пониженні тиску до тиску насичених парів, називається *холодним кипінням*.

Рідина, з якої видаляється розчинений в ній газ, називається *дегазованою*. У такій рідині кипіння не виникає і при температурі, більшій ніж температура кипіння при даному тиску.

1.4.6. В'язкість

В'язкість – властивість рідини чинити опір відносному зрушенню її шарів. В'язкість виявляється в тому, що при відносному переміщенні шарів рідини на поверхнях їх зіткнення виникають сили опору зрушенню, які називаються *силами внутрішнього тертя*, або *силами в'язкості*. Якщо розглянути те, як розподіляються швидкості різних шарів рідини по перетину потоку, то можна легко відмітити, що чим далі від стінок потоку, тим швидкість руху часток більша. У стінок потоку швидкість руху рідини дорівнює нулю. Ілюстрацією цього є рисунок 1.3, на якому представлена так звана струминна модель потоку рідини, де: u - швидкість шару рідини, dy - відстань між сусідніми шарами рідини.

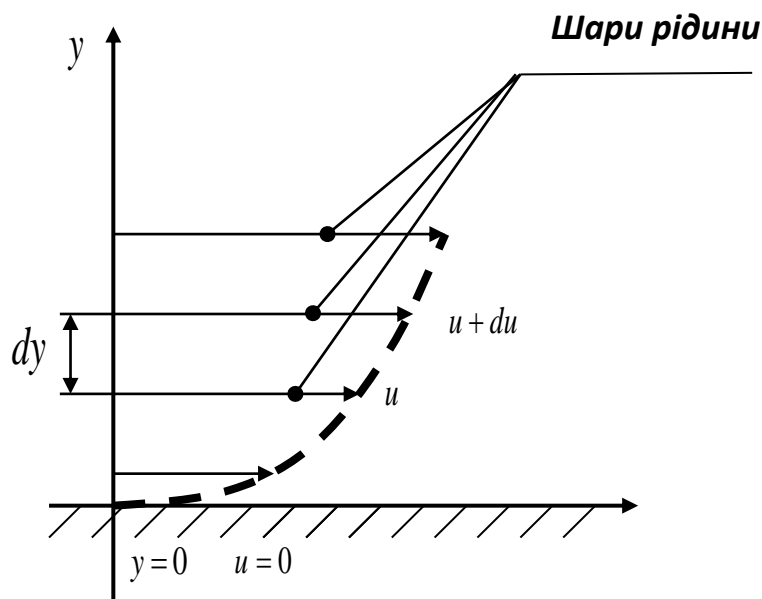
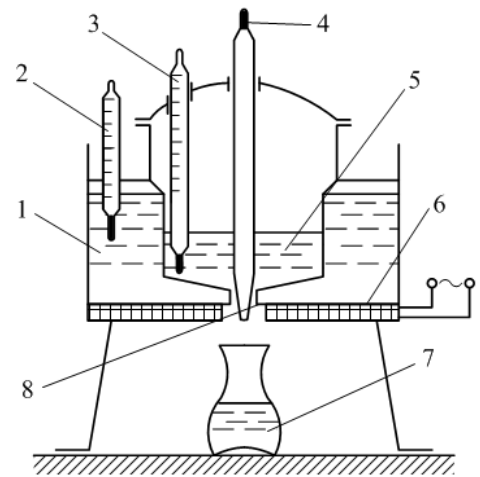
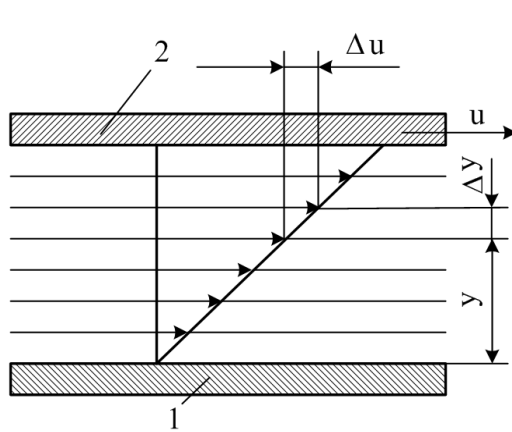


Рисунок 1.3. Закономірності руху шару рідини

Повільно рухомий шар рідини «гальмує» сусідній шар рідини, рухомий швидше, і навпаки, шар, рухомий з більшою швидкістю, захоплює (тягне) за собою шар, рухомий з меншою швидкістю. Сили внутрішнього тертя з'являються унаслідок наявності міжмолекулярних зв'язків між рухомими шарами.

Вимірюють в'язкість рідини віскозиметрами. Працюють вони за таким принципом (рис. 1.4): у посудину 5 заливають 200 мл досліджуваної рідини, а потім за допомогою електропідігрівання підвищують її температуру до 20 °С. Термометри 2 і 3 призначені для контролю за температурою водяної бані 1 і досліджуваної рідини. Піднявши запірну голку 4, вимірюють час витікання рідини через калібрований отвір 8 у посудину 7. Частка від ділення часу витікання досліджуваної рідини T_p на час витікання такої ж кількості дистильованої води T_v температурою 20 °С характеризує її в'язкість у градусах Енглера:

$$^{\circ}E = T_p / T_v \quad (1.5)$$



а)б)

Рисунок 1.4. Етюра швидкостей в рідині між нерухомою 1 і рухомою 2 пластинами(а) та віскозиметр Енглера для визначення в'язкості рідин(б)

Перерахунок в'язкості вираженої в градусах Енглера в кінематичну, здійснюється за формулою:

$$\nu = (0,0731^0 E - 0,0631/^0 E)10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (1.6)$$

У таблиці 1 наведена кінематична в'язкість деяких рідин, які широко застосовуються.

Таблиця 1.2. Кінематична в'язкість рідин, ν

Рідина	t, °C	ν , Ст	Рідина	t, °C	ν , Ст
Гліцерин			Бензин	15	0,006
безводний	20	11,89	Газ	18	0,025
Вода	15	0,0152	Нафта	18	0,25...1,4
Мазут	18	20,0	Патока	15	420
Масло	50	0,10	Спирт	18	0,00155
АМГ-10	15	0,0011	етиловий		
Ртуть					

1.4.7. Закон рідинного тертя – закон Ньютона

Вперше наявність внутрішнього тертя в рідині була відзначена І.Ньютоном ще у 1687 р. в гіпотезі про те, що сила внутрішнього тертя між шарами рідини

залежить від властивостей рідини і пропорційна площі поверхні дотику шарів (площі тертя), відносній швидкості руху і не залежить від зовнішнього тиску. Достовірність гіпотези доведена І. Ньютоном у його праці “Тертя в машині і вплив змащувальної рідини”.

При виведенні залежності для сили внутрішнього тертя Ньютоном була використана схема, що представлена на рис.1.5. Якщо у рівномірно рухомому потоці рідини розглянути два сусідніх шари з ординатами y_1 і y_2 , розташованих на відстані dy один від одного, і швидкість першого з них позначити u_1 , а швидкість другого u_2 , то різниця між ними складе du . Тоді можна записати

$$\lim_{y_1 \rightarrow y_2} \frac{u_2 - u_1}{y_2 - y_1} = \frac{du}{dy}.$$

Ця величина називається градієнтом швидкості по перетині потоку або поперечним градієнтом швидкості. Він показує, як міняються швидкості шарів рідини по перетині потоку.

Якщо між сусідніми шарами рідини виділити деяку площу S , то згідно з гіпотезою Ньютона

$$T = \mu S \frac{du}{dy},$$

де T – сили в'язкого тертя; S – площа тертя; μ – коефіцієнт в'язкого тертя; S – площа поверхні контактуючих шарів рідини; du/dy – градієнт швидкості по нормалі до напрямку руху; du – швидкість зсуву одного шару відносно другого; dy – відстань між осями двох суміжних шарів.

З даного рівняння випливає, що сила внутрішнього тертя $T = 0$ при $du = dy = 0$. Таким чином, можна зробити висновок, що в'язкість виявляється лише під час руху рідини. Розділивши представлене рівняння на площу S , дістанемо напруження тертя τ

Величина μ у цьому рівнянні є *динамічним коефіцієнтом в'язкості*, який дорівнює

$$\mu = \frac{T}{S} \frac{1}{\frac{du}{dy}} \quad \text{або} \quad \mu = \tau \frac{1}{\frac{du}{dy}}, \quad [H \cdot c / m^2], \quad [кГс \cdot c / m^2], \quad [Пз] \{Пуазейль\},$$

$$1Пз = 0,1Н \cdot c / m^2$$

де τ – дотична напруга в рідині (залежить від роду рідини). Фізичне значення коефіцієнта в'язкого тертя - число, рівне силі тертя, що розвивається на одиничній поверхні при одиничному градієнті швидкості. На практиці частіше використовується кінематичний коефіцієнт в'язкості, названий так тому, що в його розмірності відсутнє позначення сили. Цим коефіцієнтом є відношення динамічного коефіцієнта в'язкості рідини до її густини $\nu = \frac{\mu}{\rho}$. Очевидно, що

$$\tau = T / S = \pm \mu \Delta u / \Delta y = \pm \mu du / dy$$

З останньої формули $\mu = \tau dy / du$, звідки випливає, що розмірність μ в системі СІ є (Па·с). Десяту частку цієї одиниці (0,1 Па·с) називають **пуазом** (П) на честь професора Ж. Пуазейля. Для більшості рідин динамічна в'язкість μ практично не залежить від тиску і градієнта швидкості, але на неї помітно впливає температура.

Розділимо динамічну в'язкість на густину рідини і одержимо **кінематичну в'язкість** $\nu = \mu / \rho$, $[m^2/c]$, $[cm^2/c]$, $[Ст]$ {стокс}, $[cСт]$ {сантискс}, $1Ст = 100cСт$ {1Ст = 1 см²/с}

Величину $1 \cdot 10^{-4} m^2/c$ називають стоксом (1 Ст = 1 см²/с) на честь англійського вченого Г.Стокса.

Кінематична в'язкість води (см²/с) при атмосферному тиску може бути знайдена за формулою Ж. Пуазейля:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,337t + 0,00022t^2},$$

де t – температура, °С.

Як видно з цієї формули, із зростанням температури в'язкість води зменшується.

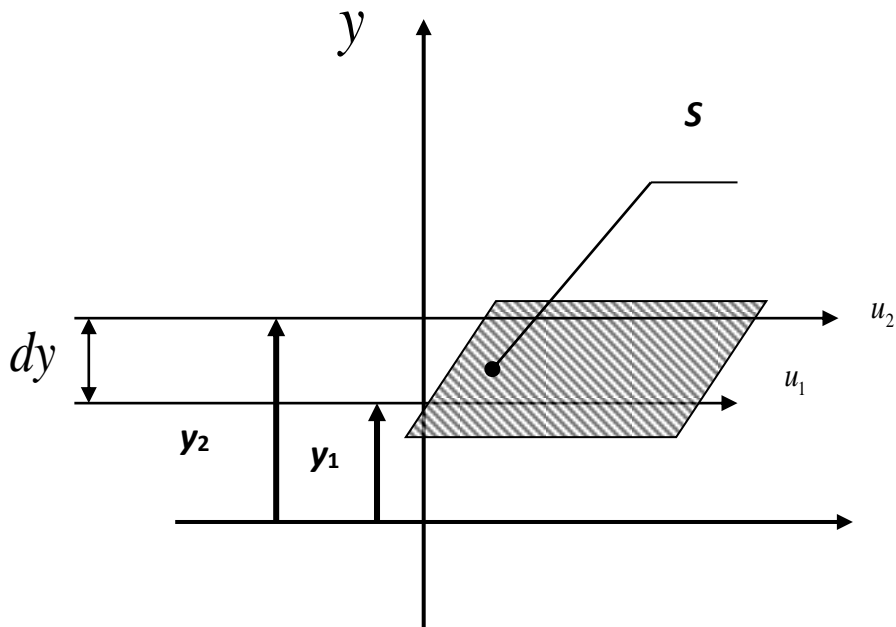


Рисунок 1.5. Схема доведення залежності для сили внутрішнього тертя

Таким чином, в'язкість рідини виявляється лише при русі рідини та не впливає на рідини, що заходяться у стані спокою. В'язке тертя в рідинах підкоряється закону тертя, що є принципово відмінний від закону тертя твердих тіл, оскільки залежить від площі тертя і швидкості руху рідини.

1.4.8. Капілярність рідин

Капілярність – здатність рідин підніматися або опускатися в трубках малого діаметра (капілярах). Обумовлене це явище силою поверхневого натягу рідини, внаслідок чого в капілярах поверхня рідини приймає скривлену форму (меніск). Рідина, яка змочує стінки капіляра (наприклад, вода зі склом), має увігнутий меніск і вода по такому капіляру піднімається (внаслідок того, що сила взаємодії між частками рідини і стінками капіляра більша ніж між частками усередині рідини). Рідина, яка не змочує стінки капіляра (наприклад, ртуть зі склом) має випуклий меніск і ртуть по такому капіляру не піднімається (внаслідок того, що сила взаємодії між частками і стінками капіляра менша ніж між частками у середні рідини). Висота підняття чи опускання рідини в капілярах визначається за формулою:

$$h_{\text{кат}} = \frac{4\sigma \cdot \cos\theta}{\rho g d}, \quad (1.12)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу (при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і контакт із повітрям, дорівнює: для води - 0,081; для бензину – 0,021; для ртуті - 0,541; для мастил 0,035...0,038); θ - кут між дотичною до вільної поверхні, (поверхні меніска) в точці перетину меніска з стінкою і самою стінкою капіляра (для води і скла $\theta = 0^{\circ}$, для ртуті і скла $\theta = 50^{\circ}$); d – діаметр капіляра, м. При температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в трубці діаметром d висота капілярного підняття води складає $30/d$; спирту $11,5/d$, а ртуті – $10,15/d$, мм.

За законами капілярності рухаються ґрунтові води, міжшарові води в водоносних шарах.

1.5. НЕОДНОРІДНІ СИСТЕМИ ІЗ РІДИННОЮ СКЛАДОВОЮ У ПЕРЕРОБНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВАХ

1.5.1. Класифікація рідких середовищ

Рідина – один з основних агрегатних станів речовини нарівні з газом та твердим тілом. Від газу рідина відрізняється тим, що зберігає свій об'єм, а від твердого тіла тим, що не зберігає форми. Фізичне тіло, якому притаманні:

- плинність, на відміну від твердого тіла;
- достатньо мала зміна об'єму (при зміні тиску й температури), на відміну від газу.

Збереження об'єму, густина, показник заломлення, теплота плавлення, в'язкість – властивості, які зближують рідини з твердими тілами, а незбереження форми – з газами. Для рідин характерний ближній порядок розташування молекул (відносна впорядкованість у розташуванні молекул найближчого оточення довільної молекули, подібна до порядку в кристалічних тілах, але на відстані кількох атомних діаметрів ця впорядкованість порушується). Взаємодія між молекулами рідини здійснюється Ван дер Ваальсовими і водневими зв'язками. Рідини, крім розсолів та зріджених металів, погані провідники електричного струму.

Плинність рідин пов'язана з періодичним «перестрибуванням» їхніх молекул з одного рівноважного положення в інше. Більшу частину часу окрема молекула рідини перебуває в тимчасовій асоціації з сусідніми молекулами

(ближня впорядкованість), де вона здійснює теплові коливання. Інколи рідиною в широкому розумінні слова називають і газ, при цьому рідину у вузькому змісті слова, яка задовольняє попереднім двом умовам, називають *крапельною рідиною*. У газів і крапельних рідин плинність проявляється вже при мінімальних напруженнях, тоді як у пластичних твердих тіл – лише при великих напруженнях, що перевищують границю текучості.

Форма, яку приймає рідина, визначається формою ємності, в якій вона перебуває. Частинки рідини (зазвичай молекули або групи молекул) можуть вільно переміщуватися по всьому її об'єму, але сила взаємного притягання не дозволяє частинкам залишати цей об'єм. Об'єм рідини залежить від температури і тиску і є постійним за даних умов.

Якщо об'єм рідини менший за об'єм ємності, в якій вона міститься, то можна спостерігати поверхню рідини. Поверхня має якості еластичної мембрани з поверхневим натягом, що дозволяє формуватися краплям та бульбашкам. Ще одним наслідком дії поверхневого натягу є капілярність. Зазвичай рідини не піддаються стисканню, наприклад, щоб помітно стиснути воду, необхідний тиск порядку гігапаскаля.

Рідини в гравітаційному полі створюють тиск, як на стінки і дно ємності, так і на будь-які тіла всередині самої рідини. Цей тиск за законом Паскаля діє у всіх напрямках і зростає з глибиною.

Структура та фізичні властивості рідини залежать від хімічної індивідуальності складових їх частинок та від характеру і величини взаємодії між ними. Можна виділити кілька груп рідин в порядку зростання складності.

- Атомарні рідини або рідини з атомів або сферичних молекул, які пов'язані центральними міжмолекулярними силами (силами Ван дер Ваальса). До цього типу рідин належать, наприклад, рідкий аргон та рідкий метан.

- Рідини з двоатомних молекул, які складаються з однакових атомів (рідкий водень, рідкий азот). Такі молекули мають квадрупольний момент.

- Рідкі неперехідні метали (натрій, ртуть), в яких зв'язок між частинками (іонами) має металічний характер.

- Рідини, що складаються з полярних молекул, пов'язаних дипольною взаємодією (рідкий бромистий водень).
- Асоційовані рідини, або рідини з водневими зв'язками (вода, гліцерин).
- Рідини, що складаються з великих молекул, для яких найважливішими є внутрішні ступені вільності.

1.5.2. Неньютонівські рідини

Неньютонівська рідина – модель рідини, що є суцільним рідким тілом, для якого дотичні напруження внутрішнього тертя, спричиненого відносним проковзуванням (зсувом) шарів рідини описуються нелінійною залежністю від градієнта швидкості у напрямі, перпендикулярному до напрямку проковзування. На відміну від ньютонівських рідин, коли динамічний коефіцієнт в'язкості є константою при заданій температурі і тиску, особливість неньютонівських рідин полягає у залежності параметра в'язкості від градієнту швидкості.

Для неньютонівських рідин важливі всі умови вимірювання: швидкість деформації, навантаження, тип і форма і т.п. Тому для порівняння неньютоновських рідин необхідно забезпечити однакові умови, отже при зміні одної складової можна отримати зовсім іншу картину. В'язкість, яка вимірюється для неньютоновських рідин називається "удаваною в'язкістю".

Неньютонівські рідини змінюють свою густину і в'язкість при впливі на них фізичною силою, причому не тільки механічним впливом, але й навіть звуковими хвилями. Якщо впливати механічно на звичайну рідину, то чим більший буде вплив на неї, тим більше буде зсув між площинами рідини, іншими словами чим сильніше впливати на рідину, тим швидше вона буде текти і міняти свою форму. Якщо впливати на неньютонівську рідину механічними зусиллями, ми отримаємо зовсім інший ефект, рідина почне приймати властивості твердих тіл і вести себе як тверде тіло, зв'язок між молекулами рідини буде посилюватися зі збільшенням сили впливу на неї, у разі чого ми зіткнемося з фізичним утрудненням зрушити шари таких рідин.

Якщо до в'язкопластичної рідини прикладати напругу зсуву, меншу за величиною, ніж порогове значення, то така рідина буде залишатися в спокої. Як тільки напруга зсуву перевищить межу, в'язкопластик почне текти, як звичайна

ньютонівська рідина. Інакше кажучи, привести в рух в'язкопластичні рідини можна, лише подолавши її максимальне напруження. Така поведінка в'язкопластиків пояснюється тим, що в рідині, що знаходиться в спокої, утворюється жорстка просторова структура, що надає опір будь-якій напрузі, меншій, ніж порогова. До в'язкопластичних рідин можна віднести бурові розчини, стічні бруду, олійні фарби, зубну пасту - тобто те, що схоже на пасту, головним чином суспензії [2, 3].

Неньютонівські рідини у залежності від характеру течії та виду функціонального зв'язку швидкості деформації та швидкості зсуву підрозділяють на три основних категорії:

- в'язкі середовища, у яких швидкість зсуву залежить від прикладання напруження зсуву (різні типи нафтопродуктів, консистентні мастила, будівельні розчини та інші дисперсні системи типу суспензій);

- середовища, реологічні характеристики яких залежать від часу (в таких рідинах швидкість зсуву визначає не лише величина дотичного напруження, але й тривалість дії);

- в'язко-пружні рідини, які мають властивості як рідини, так і твердого тіла та частково виявляють пружне відновлення форми після зняття напруження. Залежність дотичних напружень неньютонівської рідини описується емпіричною залежністю:

$$\tau = \eta \left(\frac{du}{dx} \right)^n$$

де τ – дотичне напруження внутрішнього тертя в рідині, [Па];

$\frac{du}{dx}$ – градієнт швидкості у напрямі, перпендикулярному до напрямку зсуву, [с⁻¹];

η – коефіцієнт пропорційності, [Па·с].

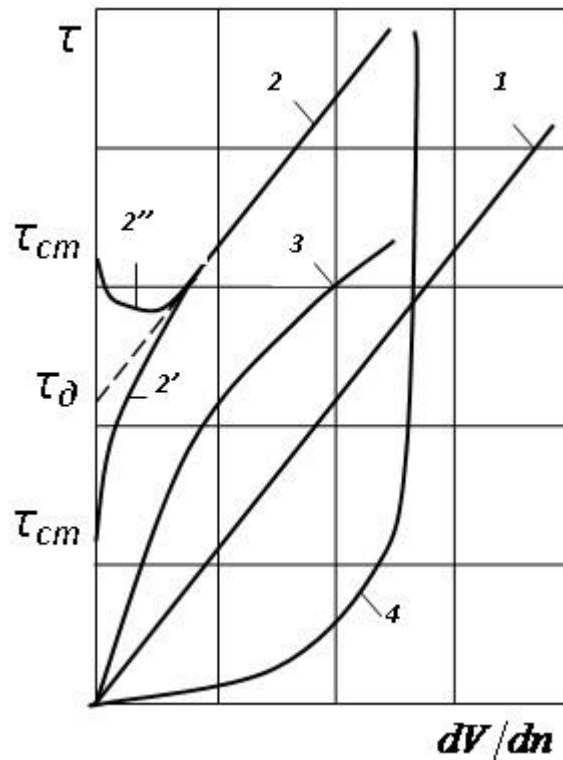


Рисунок 1.6. Залежність дотичного напруження зсуву τ від градієнта швидкості рідин dV/dn і колоїдних систем:

1 – ньютонівська рідина; 2 – в'язкопластичні системи; 2' – в'язкопластична система з пластичними властивостями; 2'' – в'язкопластична система з пружними властивостями; 3 – псевдопластична система; 4 – дилатансійна система.

Класифікація рідин робиться за значенням показника n та часовою залежністю в'язких характеристик:

- **Ньютонівська рідина** – лінійний закон ($n = 1$): $\tau = \eta \frac{du}{dy}$;

- **Степенева рідина** – нелінійна, закон степеневий ($n \neq 1$): $\tau = \eta \left(\frac{du}{dy}\right)^n$;

Псевдопластик – $n < 1$, при малих швидкостях в'язкість значна, далі зменшується (фарби, емульсії, деякі суспензії);

Дилатантна рідина – $n > 1$, в'язкість зростає із збільшенням швидкості (глиняні суспензії, солодкі суміші, гідрозоль кукурудзяного крохмалю, системи пісок/вода);

- **Пластична рідина (бінгамівський пластик)** – модель Бінгама схожа до моделі сухого тертя. В статичних умовах ведуть себе як тверді матеріали, але при силовому впливі починають текти. Мінімальне зусилля, що необхідно прикласти до системи, щоб вона почала текти називається напруженням зсуву (τ_0):

$$\tau = \begin{cases} \tau_0 + \eta \frac{du}{dx}, & \frac{du}{dx} > 0 \\ -\tau_0 + \eta \frac{du}{dx}, & \frac{du}{dx} < 0 \end{cases}$$

Дилатантний ефект спостерігається в тих матеріалах, у яких щільно розташовані частинки перемішані з рідиною, що заповнює простір між частинками. При низьких швидкостях зсуву шарів матеріалу один щодо одного рідина діє як мастило, і дилатантний матеріал здатний легко перетікати. При високих швидкостях рідина не встигає заповнювати вільні простори, що утворюються між рухомими частинками, і тому тертя між частинками сильно зростає, що призводить до збільшення в'язкості.

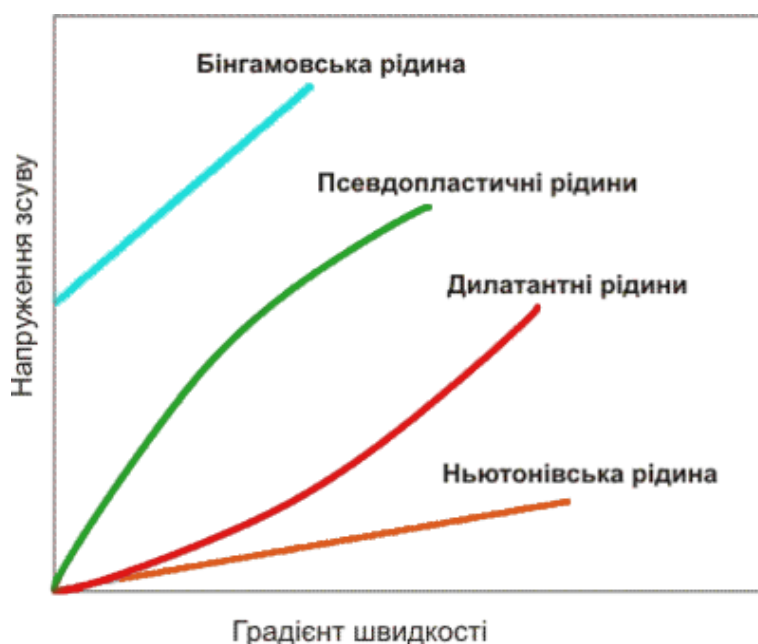


Рисунок 1.7. Класифікація неньютонівських рідин

Приклади бінгамовської рідини: шлами; бурові розчини; масляні фарби; стічні води; різні емульсії; маргарин; шоколадні суміші; рідкі мила.

Приклади псевдопластичних рідин: розчини каучуку; розчини мастила; розчини полімерів; фармацевтичні розчини; томатні концентрати; цукрові розчини; абрикосове пюре; хлібопекарське тісто; майонез; крохмальні суспензії; мила, тощо.

Приклади дилатантних рідин: висококонцентровані водні суспензії порошків двоокису титану, заліза, слюди; системи пісок/вода; гідрозоль крохмалю; солодкі суміші; водні розчини гуміарабіку; згущене молоко, деякі розчини кукурудзяної муки, цукру, крохмалю та ін.

В'язкість деяких рідин, при сталих умовах навколишнього середовища і швидкості зсуву, змінюється з часом. Якщо в'язкість рідини з часом зменшується, то рідину називають *тиксотропною*, а якщо, навпаки, збільшується, то – *реопексною*. Обидві поведінки можуть спостерігатися як разом з описаними вище типами плинну рідин, так і при певних градієнтах швидкостей. Часовий інтервал може сильно змінюватись для різних речовин: деякі матеріали досягають сталого значення в'язкості за декілька секунд, інші – за декілька діб. Реопексні матеріали зустрічаються досить рідко, на відміну від тиксотропних, до яких відносяться мастила, друкарські чорнила, фарби.

1.5.3. Рідкі неоднорідні системи

Рідкі неоднорідні системи поділяють на три класи: суспензії, емульсії і піни.

Суспензії – системи, що складаються з рідкого дисперсійного середовища і завислих у ньому твердих частинок.

Емульсії – системи, в яких рідке дисперсійне середовище і завислі в ньому частинки однієї чи кількох інших рідин.

Піни – системи, що складаються з рідкого дисперсійного середовища і завислих у ньому частинок газу.

З усіх трьох класів рідких неоднорідних систем у техніці найчастіше зустрічаються суспензії. За ступенем подрібненості твердої дисперсної фази умовно розрізняють:

- грубі суспензії, в яких розмір завислих частинок більший за 100 мк.;
- тонкі суспензії з частинками твердої фази від 100 до 0,5 мк;
- каламуті, в яких розмір завислих частинок не перевищує 100 мкм; в каламутях завислі частинки інтенсивно рухаються (броунівський рух) і не осідають під дією сили тяжіння;

- колоїдальні розчини – з частинками у межах від 100 мкм до величини молекул.

Важливою характеристикою суспензій є їх концентрація. Підвищення вмісту твердої речовини збільшує в'язкість суспензій і при певній концентрації в'язкість може бути настільки значною, що суспензія втрачає властивості текучості і практично перестає бути рідиною. З достатньою для розрахунків точністю в'язкість суспензій можна визначити за емпіричною формулою А.І. Бачинського:

$$\mu = \mu_0(1 + 4,5\varphi),$$

де μ_0 – в'язкість чистої рідини, яка є дисперсійним середовищем;
 φ – вміст твердої фази в суспензії, який виражають відношенням об'єму твердої фази до загального об'єму всієї суспензії.

Характерні особливості мають і емульсії. Вони мало стійкі і при певних розмірах завислих частинок швидко розшаровуються. Емульсії істотно відрізняються від суспензій здатністю перетворення фаз. При підвищенні концентрації дисперсної фази, коли з'являється можливість безпосереднього стикання окремих краплинок, останні зливаються в одну загальну систему, в якій завислими частинками будуть вже частинки первісного дисперсійного середовища. Таким чином, підвищення концентрації емульсії призводить до обміну фаз: дисперсійне середовище перетворюється в дисперсійну фазу, а дисперсійна фаза – в дисперсійне середовище.

В'язкість емульсій, так само як і суспензій, змінюється залежно від концентрації, причому максимальна в'язкість відповідатиме такій концентрації, при якій відбувається перетворення фаз.

У промисловості у процесі обробки різних продуктів і матеріалів утворюються найрізноманітніші неоднорідні системи: дробіння вугілля перед спалюванням його в топках парових котлів, дробіння цукру-рафінаду на рафінадних заводах, тобто подрібнення зерна на борошномельних спиртових та пивоварних заводах утворюється вугільний, цукровий, борошняний пил. Пил утворюється також під час просіювання різних сипких матеріалів: руди, вугілля, зерна, борошна, цукрового піску та інших продуктів. Процеси висушування і

транспортування сипких матеріалів здебільшого супроводжується пилоутворенням.

У теплових процесах прикладом утворення гетерогенної системи є туман, що виникає при конденсації водяної пари внаслідок охолодження повітря. Такі системи утворюються під час випарювання цукрових розчинів, барди, молока, а також в перегонних апаратах спиртових заводів.

У виробничій практиці неоднорідні системи часто доводиться розділяти на їх складові частини. Метод для розподілу вибирають залежно від характеру складових частин системи і стану фаз. При цьому треба також враховувати фізико-хімічні властивості середовища: в'язкість, густину, розмір частинок та їх щільність тощо. Часто для розділення неоднорідних систем можна застосувати кілька різних методів. Наприклад, газ від пилу можна очистити фільтруванням крізь тканину або у відцентрованих і електричних осаджувачах. Частіше у практиці для розподілу неоднорідних систем застосовують такі методи: осідання, або відстоювання; фільтрування.

Осідання, або відстоювання в свою чергу можна здійснити у полях: а) гравітаційному; б) відцентровому; в) електричному.

Фільтрування здійснюють звичайно у полях: а) гравітаційному; б) відцентровому; в) поверхневих сил.

1.5.4. Газорідинні неоднорідні системи

Аерозолі – дисперсні системи, що складаються з дрібних твердих або рідких частинок (дисперсна фаза) та дисперсійного газового середовища (наприклад, повітря) де зависли ці частинки. Аерозолі присутні в атмосфері шахт, кар'єрів, копалень, збагачувальних фабрик, брикетних фабрик, на ряді підприємств хімічної промисловості, коксохімії тощо. За характером утворення розрізняють диспергаційні і конденсаційні аерозолі.

Диспергаційні аерозолі виникають під час розбризкування рідин, дроблення і подрібнення твердих речовин, особливо тонкого подрібнення в струминних млинах, переходу до завислого стану порошків, руйнування

вугільного і породного масивів (бурінняшпурів і свердловин, підривні роботи, при роботі гірничих комбайнів, екскаваторів і ін.).

Конденсаційні аерозолі утворюються під час конденсації пари. Швидкість осідання частинок аерозолів дуже мала. Частинки аерозолів мають розміри від найбільших молекул (від 1 нм) до 100 мкм, їхній вміст в 1 см³ повітря – від декількох одиниць до декількох тисяч. Аерозолі поділяються на тумани (дисперсна фаза – краплі рідини 10 мкм), дими (частинки 0,1-5 мкм), смог (0,1-50 мкм) та пил (до 10-100 мкм). Тонкодисперсну тверду речовину аерозолів називають порошком. Пил, що осів, та порошок – тотожні поняття. Тверді частинки аерозолів, що осіли (тонкий порошок) згідно з термінологією колоїдної хімії називають аерогелем.

Аерозолі поділяють на полідисперсні та монодисперсні. Тривалість перебування частинки аерозолу у завислому стані залежить від седиментаційної швидкості (швидкості осідання) та швидкості витання. Седиментаційна швидкість – швидкість падіння, яку має частинка аерозолу у спокійному дисперсійному середовищі під дією сили ваги. Швидкість витання – швидкість, якої набуває частинка під дією вертикального висхідного потоку. Від співвідношення цих швидкостей залежить запиленість повітря у гірничих виробках та промислових приміщеннях.

Запитання для самоконтролю

1. Що таке гідравліка як навчальна дисципліна?
2. Яким нормативно-правовим документом регламентуються вимоги до якості води що використовується у системі централізованого господарсько - питного водопостачання підприємств?
3. Які види сил діють на рідину?
4. Наведіть основні фізичні властивості рідин?
5. За якими показниками характеризується рідина взагалі ?
6. Дайте визначення поняттю водопостачання підприємств.
7. У чому полягає мета дисципліни «Гідростатика та гідродинаміка харчових виробництв» ?

8. Наведіть головні історичні віхи розвитку науки про закономірності властивостей рідких технологічних систем?
9. Яким чином впливає якість води на стан виробництва продукції переробних і харчових виробництв?
10. Дайте класифікацію та аналіз рідин залежно від зміни фізичних властивостей.
11. На які три категорії: показники якості води стандарт поділяє питну воду?
12. Наведіть фізичні, хімічні та бактеріологічні показники якості води ?
13. У чому полягає екологічна безпека використання підземних вод ?
14. Що таке рідина?
15. Які види крапельних рідин використовуються в інженерній діяльності?
16. За якими показниками ідеальна рідина відзначається від реальної?
17. Які рідини належать до газоподібних рідин і де вони використовуються?
18. Дайте класифікацію та аналіз рідин залежно від зміни структури її основних елементів.
19. Дайте характеристику неньютонівських рідин.
20. Дайте характеристику емульсій.
21. Дайте характеристику суспензій.
22. Дайте характеристику газорідких неоднорідних систем.
23. Дайте характеристику рідких неоднорідних систем.
24. Формулювання закону рідинного тертя – закон Ньютона.
25. Основні поняття та різновиди в'язкості рідких мас.
26. Дайте характеристику капілярності рідин.
27. Дайте характеристику стисливості рідин.
28. Дайте характеристику капілярності рідин. Дайте характеристику температурного розширення рідини.
29. Формулювання закону Гука для рідких мас.
30. Дайте характеристику густини рідин.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дідур В. А., Журавель Д. П. Технічна механіка рідини і газу: підручник для здобувачів ступеня вищої освіти закладів вищої освіти. Мелітополь: ТОВ «Колор Принт», 2019. 468 с.
2. Гідравліка. Підручник / В. А. Дідур, Д. П. Журавель, М. А. Палішкін та ін.; за заг. ред. В.А. Дідур. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. 624 с.
3. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі. Підручник / В. А. Дідур, О. Д. Савченко, Д. П. Журавель та ін.; за заг. ред. В. А. Дідур. Київ: Аграрна освіта, 2008. 577 с.
4. Дідур В. А., Савченко О. Д., Пастушенко С. І. та ін. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривод. Запоріжжя: Прем'єр, 2005. 464 с.
5. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев, Б. Б. Некрасов; под ред. Б. Б. Некрасова. Минск: Вышэйш. школа, 1976. 416 с.
6. Вамболь С. О., Міщенко І. В., Кондратенко О. М. Технічна механіка рідини і газу: підручник. Х.: НУЦЗУ, 2016. 300 с.
7. Рогалевич Ю. П. Гідравліка. Підручник К.: Вища шк., 1993. 255 с.
8. Исаев А. П., Сергеев Б. И., Дидур В. А. Гідравліка и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов. М.: Агропромиздат, 1990. 400 с.
9. Сухенко Ю. Г., Жеплінська М. М., Муштрук М. М. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум: [Навчальний посібник] / За ред. проф. Ю.Г. Сухенка. К. ЦП «КОМПРИНТ», 2018. 222 с.
10. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств / под ред. В. Н. Стабникова. Киев. : Вища школа, 1982. 199 с.
11. Стабников В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств. М.: Агропромиздат, 1984. 509 с.
12. Сухенко Ю. Г., Паламарчук І. П., Жеплінська М. М. та ін. Надійність обладнання харчової галузі. Навчальний посібник. К. ЦП «КомпрІнт», 2019. 370 с.

13. Гидроаэромеханика и ее использование в энергетике АПК. Учебное пособие для сельскохозяйственных вузов. В. А. Дидур, Л. И. Грачева, Н. Н. Радул и др.; под об. ред. В. А. Дидура, Москва: МГАУ, 2008. 395 с.

14. Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / и др. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.

15. Гідравліка: Навчально-методичний комплекс. Навчально-методичний посібник / В. І. Дуганець, І. М. Бендера, В. А. Дідур та ін. / За ред. В. І. Дуганця, І. М. Бендери, В. А. Дідура. Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин. О.В., 2013. 572с.

16. Гідропривод сільськогосподарської техніки: Навчальне видання / О. М. Погорілець, М. С. Волянський, В. Д. Вотюк та ін.; за ред. О. М. Погорільця. К.: Вища освіта, 2004. 368 с.

17. Дидур В. А., Малый Ю. С. Эксплуатация гидроприводов сельскохозяйственных машин. М.: Россельхозиздат, 1982. 125 с.

18. Карамбиров Н. А. Сельскохозяйственное водоснабжение. М.: Агропромиздат, 1986. 352 с.

19. Карасьов Б. В. Гидравлика, основы сельскохозяйственного водоснабжения и канализации. Минск: Вишэйшая школа, 1979. 285 с.

20. Карасьов Б. В. Насосы и насосные станции. Минск: Вышэйшая школа, 1979. 275 с.

21. Константинов Ю. М. Гидравлика. К.: Высшая школа, 1981. 360 с.

22. Малюшенко В. В. Динамические насосы: Атлас. М.: Машиностроение, 1984. 214 с.

23. Мотуз І. К. Гідравліка і гідравлічні машин в довідках і таблицях. К.: ІЗПМН, 1996. 28 с.

24. Никитин О. Ф., Холин К. М. Объемные гидравлические и пневматические приводы. М.: Машиностроение, 1981. 285 с.

25. Орлов В. О., Зошук А. М. Сільськогосподарське водопостачання та водовідведення. Рівне, 2002. 203 с.

26. Осипов П. Е. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 424 с.
27. Палишкин Н. А. Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение. М.: Агропромиздат, 1980. 351 с.
28. Журавель Д. П., Петренко К. Г. Розрахунок об'ємного гідроприводу. Методичні вказівки до лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Гідравлічні системи сільськогосподарської техніки». Мелітополь, ТДАТУ, 2015. 59 с.
29. Журавель Д. П. Методичні вказівки до лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Гідравліка». Мелітополь, ТДАТУ, 2015. 28 с.
30. Журавель Д. П., Паламарчук І. П. Петренко К. Г. та ін. Гідростатика і гідродинаміка. Посібник-практикум. Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2021. 152 с.
31. Журавель Д. П., Савченко О. Д., Стручаєв М. І. Системи сільськогосподарського водопостачання. Методичний посібник. Мелітополь, ТДАТА, 2002. 36 с.
32. Журавель Д. П. Гідравлічні опори. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Гідравліка». Мелітополь, ТДАТУ, 2015. 60с.
33. Журавель Д. П. Дослідження потоку рідини із застосуванням рівняння Бернуллі. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Гідравліка». Мелітополь, ТДАТУ, 2015. 64 с.
34. Журавель Д. П. Прилади для вимірювання кількості і витрат потоку рідини. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Гідравліка». Мелітополь, ТДАТУ, 2015. 88 с.
35. Журавель Д. П. Насоси системи водопостачання. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Гідравліка». Мелітополь, ТДАТУ, 2015. 76 с.
36. Журавель Д. П. Елементи гідроприводу. Методичний посібник до лабораторно–практичних занять з дисципліни «Гідропривід сільськогосподарської техніки». Мелітополь, ТДАТА, 2015. 70 с.
37. Савин И. Ф., Сафонов П. В. Основы гидравлики и гидропривод. М.: Высшая школа, 1978. 222 с.

38. Сафонов Н. А. и др. Сельскохозяйственное водоснабжение. К.: Вища школа, 1988. 224 с.
39. Стрелец Б. И. Справочник по водным ресурсам. К.: Урожай, 1987. 304с.
40. Васильченко В. А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник М.: Машиностроение, 1983. 301 с.
41. Земницкий В. А., Каплун А. В., Попир А. Н. и др. Лопастные насосы: Справочник. Л.: Машиностроение, 1986. 442 с.
42. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П. Г. Кисилева. М.: Энергия, 1972. 312 с.
43. Часовской В. П., Лангазов В. Н. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы сельскохозяйственной техники. Луганск: Знание, 2003. 336 с.
44. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Энергоиздат, 1984. 215 с.
45. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л.: Энергоиздат, 1982. 672с.
46. Шевелев Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных и пластмассовых труб. М.: Стройиздат, 1986. 114с.
47. Паніна В. В., В'юник О. В., Дашивець Г. І., Журавель Д. П. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання: навчально-методичний посібник до лабораторного практикуму для самостійної роботи Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2019. 84 с.
48. Бондар А. М., Журавель Д. П., Новік О. Ю., Петренко К. Г. Технічний сервіс мехатронних систем. Навчально-методичний посібник для самостійної роботи. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. 141 с.
49. Журавель Д. П., Новік О. Ю., Бондар А. М., Паніна В. В. Триботехніка. Методичні вказівки до самостійної роботи. Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2019. - 116 с.
50. Журавель Д. П., Новік О. Ю., Бондар А. М., Петренко К. Г. Триботехніка. Посібник до лабораторно-практичних робіт. Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2019. 136 с.

51. Журавель Д. П., Новік О. Ю., Бондар А. М., Петренко К. Г. Триботехніка. Курс лекцій. Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2019. 280 с.
52. Galina Gritsaenko, Igor Gritsaenko, Andrei Bondar, Dmytro Zhuravel. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture. Modern Development Paths of Agricultural Production. Springer Nature Switzerland AG., 2019. P.29-40.
53. Kyrylo Samoichuk, Dmytro Zhuravel, Olga Viunyk, Dmytro Milko, Andrii Bondar. Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P.142-148.
54. Dmitry Milko, Dmytro Zhuravel, Kyrylo Samoichuk, Yulia Postol. Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 1/12(103). P.24-29.
55. Dmytro Milko., Oleksandr Sclyar., Radmila Sclyar., Ganna Pedchenko., Dmytro Zhuravel Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH - Agricultural Engineering. - National Institute Of Research-Development For Machines And Installations Designed To Agriculture And Food Industry - INMA Bucharest*, Vol. 60, no.1 / 2020. P. 269-274.
56. Kyrylo Samoichuk, Dmytro Zhuravel, Nadiya Palyanichka, Vadim Oleksiienko, Serhii Petrychenko Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P.633-640. Наукове фахове видання (наукометрична база: Scopus).
57. Struchaiev N., Postol Y., Stopin Y., Zhuravel D., Hulevskyi V. Ways to improve the efficiency of pipelines heat insulation. *Problemele energeticii regionale 2* (46) 2020. P. 43-52. Наукове фахове видання (наукометрична база: Web of Science Core Collection).
58. Дидур В. А., Журавель Д. П. Надежность мобильной сельскохозяйственной техники при использовании биологических топливо-смазочных материалов. Науковий вісник Національного університету біоресурсів

і природокористування України / НУБіП ; відп. ред. Д. О. Мельничук. К., 2016. № 251. С. 69-78. (Техніка та енергетика АПК).

59. Журавель Д. П. Методологія оцінки надійності мобільної сільськогосподарської техніки при експлуатації на різних видах паливо-мастильних матеріалів. Вісник Сумського національного аграрного університету / СНАУ. – Суми, 2016. – Вип. 10/3(31). – С.66-71. – (Механізація та автоматизація виробничих процесів).

60. Журавель Д. П. Підвищення довговічності функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопаливно-мастильних матеріалів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. К., 2018. Вип. 282. С.279-292.

61. Журавель Д. П. Моделювання процесу зношування прецизійних пар паливних систем мобільної техніки при експлуатації на біодизелі. Праці ТДАТУ. Вип. 18.т.2. Мелітополь, 2018 .С. 105-118.

62. Журавель Д. П. Підвищення ефективності використання мобільної сільськогосподарської техніки шляхом забезпечення оптимального складу сумішевих біодизельних паливних / Д.П. Журавель // Науковий вісник ТДАТУ: Електронне наукове фахове видання. Вип.8. Т.2. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. С. 91-107.

63. Журавель Д. П. Обґрунтування пристрою для оцінки триботехнічних властивостей змащувальних матеріалів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Вип. 9. Том 1. Мелітополь, 2019. – С.12-22.

64. Журавель Д. П. Моделювання працездатності машино-тракторного агрегату при експлуатації на біодизелі. Праці ТДАТУ. Вип. 19.Т.3. Мелітополь, 2019. С.57-68.

65. Журавель Д. П. Обґрунтування методики прогнозування технічного стану функціональних систем мобільних енергетичних засобів. Праці ТДАТУ. Вип. 19.Т.4. Мелітополь, 2019. С.86-104.

66. Журавель Д. П., Мілько Д. О., Бондар А. М. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2019. Вип. № 10 (109). С. 125-131.

67. Журавель Д. П. Вплив технічного обслуговування і ремонту на надійність машин та обладнання при використанні біологічних рідин. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного [Електронний ресурс]. Вип. 10. Том 1. - Мелітополь, 2020. 9 с. DOI:10.31388/2220-8674-2020-1-3.

68. Журавель Д. П. Раціональне використання біологічних олив для мобільних енергетичних засобів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного [Електронний ресурс]. Вип. 10. Том 1. - Мелітополь, 2020. 17 с. DOI:10.31388/2220-8674-2020-1-9.

Навчальне видання

Журавель Дмитро Павлович
доктор технічних наук, професор
Паламарчук Ігор Павлович
доктор технічних наук, професор
Уманський Сергій Михайлович
кандидат технічних наук, доцент
Паламарчук Владислав Ігорович
кандидат економічних наук, доцент

ГІДРАВЛІКА, ГІДРО- ТА ПНЕВМОПРИВОДИ

Підручник для здобувачів вищої освіти

Видавець ФОП Ямчинський О.В.
03150, Київ, вул. Предславинська, 28
Свідоцтво про внесення до державного реєстру
Суб'єкта видавничої справи ДК № 65545 від 26.12.2018 р.

Формат 60x84/16. Наклад 300 пр. Ум. друк. арк. 29,8. Зам. №77

Виготовлювач ТОВ «ЦП «КОМПРИНТ»
03150, Київ, вул. Предславинська, 28
Свідоцтво про внесення до державного реєстру
Суб'єкта видавничої справи ДК № 4131 від 04.08.2011 р.