

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

О. Л. Андрєєва, В. І. Ткаченко

**ГІДРОДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ  
СТРАТИФІКОВАНИХ В'ЯЗКИХ СЕРЕДОВИЩ**

**Монографія**

Харків – 2020

УДК 532.5

А 65

**Рецензенти:**

**Л. А. Булавін** – доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАН України, завідувач кафедри молекулярної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка;  
**В. М. Куклін** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри штучного інтелекту та програмного забезпечення факультету комп'ютерних наук Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради  
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна  
(протокол N 10 від 28.10.2019 року)*

**Андрєєва О. Л.**

**А 65**

Гідродинамічна стійкість стратифікованих в'язких середовищ : монографія /  
О. Л. Андрєєва, В. І. Ткаченко. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. – 204 с.

ISBN 978-966-285-657-6

У монографії викладено новітні результати щодо гідродинамічної стійкості стратифікованих в'язких середовищ. Стратифікація таких середовищ за певних умов може бути нестійкою, наслідком чого є руйнування межі стратифікації. Відомі нестійкості Релея – Бенара, Кельвіна – Гельмгольца, Релея – Тейлора та Релея – Плато розглянуто при врахуванні в'язкості середовищ, що взаємодіють, а також перколяційних граничних умов. Деякі отримані теоретичні результати використані для опису експериментальних даних, що отримані іншими дослідниками або виконані безпосередньо авторами монографії. Показана гарна відповідність теоретичних висновків експериментальним результатам.

Викладені в монографії матеріали можуть бути корисні для студентів бакалаврської та магістерської підготовки, аспірантів та науковців, які спеціалізуються в таких галузях, як гідродинаміка, конвективна стійкість нестисливих рідин, прогнозування погодних умов, а також можуть знайти застосування в технічних галузях знань.

Іл. – 73, табл. – 10, бібліогр. – 120 найм.

**УДК 532.5**

ISBN 978-966-285-657-6

© Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна, 2020

© Андрєєва О. Л., Ткаченко В. І., 2020

© Чорна О. Д., макет обкладинки, 2020

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ ДЛЯ ОПИСУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТЕЧІЙ У В'ЯЗКИХ НЕСТИСЛИВИХ РІДИНАХ, ЩО ПІДГРІВАЮТЬСЯ ЗНИЗУ.....</b>	<b>9</b>
<b>2. КОНВЕКТИВНА СТІЙКІСТЬ ШАРУ В'ЯЗКОЇ НЕСТИСЛИВОЇ РІДИНИ, ЩО ПІДГРІВАЄТЬСЯ ЗНИЗУ (ВІЛЬНІ ГРАНИЦІ).....</b>	<b>14</b>
2.1. Обґрунтування вільних границь задачі Релея.....	14
2.2. Експериментальні дослідження властивостей конвективних комірок з вільними границями.....	15
2.2.1. Зародження та формування конвективних структур при збільшенні температури нижньої поверхні шару рідини.....	18
2.2.2. Дослідження детермінованої залежності розмірів ЕКК.....	21
2.2.3. Руйнування конвективних комірок.....	24
2.2.3.1. Контактний спосіб руйнування конвективних комірок.....	25
2.2.3.2. Безконтактний спосіб руйнування конвективних комірок.....	26
2.2.4. Формування повітряних конвективних комірок Бенара над комірками Бенара у вакуумній оливі.....	27
2.2.5. Швидкість масопереносу в конвективній комірці.....	29
2.2.6. Висновки до розділу 2.2.....	34
2.3. Теорія стійкості горизонтальних шарів в'язкої нестисливої рідини, що підігріваються знизу, з вільними границями (задача Релея).....	35
2.3.1. Основні рівняння для ідеально теплопровідних масивів і вільних границь.....	35
2.3.2. Аналітичний розв'язок для збуреної швидкості та температури.....	37
2.3.3. Аналіз отриманих розв'язків.....	39
2.3.4. Визначення радіуса елементарної конвективної комірки...	45

2.3.5. Застосування моделі ЕКК для опису конвективних процесів у навколишньому просторі.....	46
2.3.5.1. Застосування моделі ЕКК для опису конвективних процесів на Сонці.....	46
2.3.5.2. Застосування моделі ЕКК для опису конвективних концентричних валів у кругових контейнерах.....	51
2.3.6. Висновки до розділу 2.3.....	54

<b>3. КОНВЕКТИВНА СТІЙКІСТЬ ШАРУ В'ЯЗКОЇ, НЕСТИСЛИВОЇ РІДИНИ, ЩО ПІДГРІВАЄТЬСЯ ЗНИЗУ, (ТВЕРДІ ГРАНИЦІ).....</b>	<b>57</b>
3.1. Обґрунтування твердих граничних умов задачі Релея.....	57
3.1.1. Експериментальні дослідження властивостей конвективних комірок з твердими граничними умовами.....	59
3.1.1.1. Експериментальне дослідження формування конвективних комірок в оливі з додавання оливної фарби...	61
3.1.1.2. Експериментальне дослідження формування конвективних комірок в оливі з додаванням алюмінієвої пудри.....	62
3.1.2. Висновки до розділу 3.1.....	63
3.2. Крайова задача Релея з твердими граничними умовами.....	63
3.2.1. Аналітичний розв'язок задачі Релея з твердими і змішаними граничними умовами.....	64
3.2.2. Визначення діаметра конвективної комірки з твердими та змішаними граничними умовами.....	68
3.2.3. Нейтральні криві задачі Релея з твердими і змішаними граничними умовами.....	73
3.2.4. Фізичне обґрунтування ступеневої залежності числа Нуссельта від числа Релея на основі моделі елементарної конвективної комірки.....	76
3.2.5. Тепломасоперенос в конвективній комірці з вільною верхньою границею і при врахуванні поверхневого натягу.....	82
3.2.5.1. Рівняння масопереносу і граничні умови.....	82
3.2.5.2. Рівняння для збуреної вертикальної швидкості і температури в циліндричній комірці і граничні умови.....	85
3.2.5.3. Розв'язок рівнянь для збурених вертикальної швидкості і температури в циліндричній комірці з урахуванням твердих граничних умов.....	86
3.2.6. Висновки до розділу 3.2.....	95

<b>4. ЗАДАЧА РЕЛЕЯ З ВІЛЬНИМИ ГРАНИЦЯМИ ТА ЛЕНГМЮРІВСЬКІ ЦИРКУЛЯЦІЇ.....</b>	<b>98</b>
4.1. Обговорення отриманих розв'язків і пояснення деяких особливостей ЛЦ.....	101
4.1.1. Зв'язок характерних швидкостей ЛЦ зі швидкістю вітру...	110
4.1.2. Зсув осей зустрічних конвективних валів.....	111
4.1.3. Оцінка порогової швидкості вітру.....	112
4.1.4. Обґрунтування інваріантності утворення ЛЦ від способу підігріву.....	114
4.1.5. Розподіл швидкостей у поверхневому шарі рідини.....	115
4.1.6. Орієнтування <i>wind-streaks</i> щодо напрямку вітру.....	116
4.1.7. ЛЦ як природний спосіб поліпшення екології поверхневих шарів водних басейнів.....	118
4.2. Висновки до розділу 4.1.....	118
<b>5. НЕСТІЙКІСТЬ СТРАТИФІКОВАНИХ ЗСУВНИХ ТЕЧІЙ....</b>	<b>120</b>
5.1. Нестійкість Кельвіна – Гельмгольца.....	120
5.1.1. Енергетичне трактування виникнення вітрової нестійкості у відсутність і при наявності в'язкості в середовищах.....	121
5.1.2. Які граничні умови треба застосовувати для опису нестійкості КГ: непроникні або «перколяційні»?.....	125
5.1.3. Застосування «перколяційних» граничних умов для опису розвитку вітрової хвилювання поверхні води.....	129
5.1.4. Вибухова взаємодія збурень границі розділу повітряний потік - вода при врахуванні їх в'язкостей.....	132
5.1.5. Зсувні нестійкості на контактній границі сталевих зразків, коли межа навантажується похилою ударною хвилею.....	139
5.1.6. Зсувні нестійкості в металах при їх спільній прокатці у вакуумі.....	142
5.1.7. Багатоликі прояви дисипативної нестійкості КГ в навколишньому середовищі.....	149
5.2. Висновки до розділу 5.1.....	153
<b>6. НЕСТІЙКІСТЬ ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ В'ЯЗКИХ РІДИН У ЗОВНІШНЬОМУ СИЛОВОМУ ПОЛІ.....</b>	<b>154</b>
6.1. Нестійкість Релея – Тейлора при врахуванні в'язкості середовищ.....	154
6.2. Формування границі з'єднання біополімерів при біполярному електричному зварюванні високочастотним струмом.....	160
6.3. Висновки до розділу 6.....	165

<b>7. НЕСТІЙКІСТЬ СТРУМЕНЯ РІДИНИ, ЩО ВІЛЬНО ПАДАЄ, ПО ВІДНОШЕННЮ ДО РОЗБИТТЯ НА КРАПЛІ.....</b>	<b>166</b>
7.1. Нестійкість Релея – Плато: нестійкість струменя, що вільно падає (літературний огляд).....	166
7.2. Нестійкість Релея – Плато: нестійкість струменя рідини, що вільно падає (теорія).....	169
7.3. Нестійкість Релея – Плато в постановці задачі Кельвіна – Гельмгольца з перколяційними граничними умовами.....	173
7.4. Врахування впливу в'язкості середовищ на нестійкість Релея – Плато в постановці задачі Кельвіна – Гельмгольца.....	182
7.4.1. Струмінь з малою в'язкістю. ....	182
7.4.2. Струмінь з великою в'язкістю.....	184
7.4.3. Струмінь і навколишнє середовище мають велику в'язкість.....	185
7.5. Висновки до розділу 7.....	186
<b>ПІСЛЯМОВА.....</b>	<b>187</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>189</b>