

О.В. Солоня, В.П. Ковбаса

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДЛЯ УКЛАДАННЯ
ВНУТРІШНЬОҐРУНТОВИХ ЗРОШУВАЧІВ**

Монографія

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

О.В. Солона, В.П. Ковбаса

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРґАНІВ ДЛЯ
УКЛАДАННЯ ВНУТРІШНЬОҐРУНТОВИХ ЗРОШУВАЧІВ

Моноґрафія

Вінниця - 2020

УДК 631.3: 631.674

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного аграрного університету «23» грудня 2020 р. (протокол № 8)

Рецензенти:

Булат А.Ф. професор, доктор технічних наук, академік НАН України, директор Інституту геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України

Налобіна О.О. професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних сільськогосподарських машин і обладнання Національного університету водного господарства та природокористування

Барановський В.М., професор, доктор технічних наук, професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету ім. І.Пулля

О.В. Солона, В.П. Ковбаса. Обґрунтування параметрів робочих органів для укладання внутрішньогрунтових зрошувачів: Монографія. Вінниця, 2020 – 155 с.

ISBN 978-967-2010-73-1

У монографії проведений аналіз сучасного стану та перспектив розвитку існуючих способів та технічних засобів для зрошення сільськогосподарських культур, параметрів і режимів їхньої роботи; проаналізовані результати досліджень умов застосування системи внутрішньогрунтового зрошення; вивчені закономірності руху й розподілу вологи в активному шарі ґрунту за внутрішньогрунтового зрошення; проаналізовані умови фільтраційного руху води для поливу. Проведено аналіз способів та технічних засобів для прокладання системи внутрішньогрунтового зрошення із застосуванням протифільтраційного екрану, що дозволяє зменшити вплив гравітаційного переносу вологи та підвищити її дифузійний перенос.

Робота представляє інтерес для магістрів, аспірантів, наукових співробітників та інженерно-технічних працівників, які займаються питаннями створення зрошувальних та осушувальних систем.

ЗМІСТ

	стр.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ	9
1.1 Характеристика основних водно-фізичних властивостей ґрунтів.....	9
1.2 Аналіз методів прогнозування розповсюдження вологи в ґрунті.....	13
1.3 Аналіз способів і технологій поливу плодкових насаджень та виноградників.....	19
1.4 Аналіз конструкцій техніки та технічних засобів і систем для зрошення.....	36
1.5 Висновки. Мета і завдання досліджень.....	44
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ РОБОЧОГО ОРГАНУ ДЛЯ УКЛАДАННЯ ЗРОШУВАЧІВ...	47
2.1 Опис процесу укладання зрошувальної труби з протифільтраційним екраном.....	47
2.2 Аналіз процесу утворення кротовин для укладання зволожувача з протифільтраційним екраном.....	48
2.3 Аналіз ущільнення ґрунту конусним наконечником робочого органу для утворення кротовин.....	50
2.4 Аналіз ущільнення ґрунту лемішною частиною робочого органу для утворення кротовин.....	76
2.5 Аналіз затрат енергії на протягування зволожувача з протифільтраційним екраном.....	93

2.6 Аналіз процесу утворення склепіння після проходження лемішною частиною робочого органу для утворення кротовин.....	96
2.7 Висновки до розділу.....	102
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	104
3.1 Програма експериментальних досліджень.....	104
3.2 Методика експериментальних досліджень.....	104
3.2.1 Методика визначення ущільнень ґрунту робочим органом для утворення кротовин.....	104
3.2.2 Методика визначення механічних властивостей ґрунту.....	105
3.2.3 Методика визначення тягового опору робочого органу для утворення кротовини при проході без протягування зволожувача та з протягуванням його разом із протифільтраційним екраном.....	110
3.2.4 Методика статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.....	115
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	117
...	
4.1.Результати експериментальних досліджень тягових зусиль для легкосуглинкового ґрунту.....	117
4.1.1 Результати визначення механічних властивостей ґрунту...	117
4.1.2 Результати визначення тягових зусиль для легкосуглинкового ґрунту.....	120
4.2 Результати експериментальних досліджень тягових зусиль для середньосуглинкового ґрунту.....	127

4.2.1	Результати визначення механічних властивостей ґрунту.....	127
4.2.2	Результати визначення тягових зусиль для середньосуглинкового ґрунту.....	130
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УКЛАДАННЯ ЗРОШУВАЛЬНОЇ ТРУБИ З ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНИМ ЕКРАНОМ		
	5.1 Вихідні дані для визначення техніко-економічної ефективності...	135
	5.2 Порівняльний аналіз пропонованого пристрою з базовим	136
	ВИСНОВКИ.....	139
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	142
	ДОДАТКИ.....	170

ВСТУП

Зрошення – один із найбільш дієвих факторів інтенсифікації як сільського господарства загалом, так і зокрема плодівництва.

Як відомо, основним завданням зрошення потрібно вважати отримання високих врожаїв за мінімальних затрат води на створення одиниці продукції.

Зрошення є важливим агротехнічним прийомом, що сприяє кращому росту, підвищенню врожайності та економічної ефективності плодово-ягідних насаджень та виноградників. Але тільки поставлене на наукову основу зрошення в сукупності з іншими прийомами може впливати найбільш позитивно.

Наявні зрошувальні системи поряд із загальним позитивним ефектом мають тенденцію негативного впливу на навколишнє середовище, що виявляється в нераціональному використанні водних ресурсів, низькому ККД, підвищенні рівня ґрунтових вод, вторинному засоленні ґрунтів та ін. Крім того, такі системи енергоємні та дорогі для фермерських господарств. В умовах зростання дефіциту водних та енергетичних ресурсів виникає необхідність у розробці нових локальних способів зрошення, які забезпечують рівномірність зволоження ґрунту, отримання високих врожаїв фруктів та ягід, при значному зниженні енергозатрат, експлуатаційних витрат та зрошувальної води.

Тому створення високопродуктивних промислових садів та впровадження у виробництво прогресивних способів їх зрошення на основі розробки раціональних конструктивних параметрів і режимів роботи зрошувальних систем набуває особливої актуальності [6].

Позитивно вирішити це питання можна на основі впровадження у виробництво нових прогресивних способів поливу, і перш за все, з локальним характером зволоження ґрунту (крапельне та підґрундове

зрошення.) Велике значення для подальшого розвитку зрошувального садівництва має автоматизація поливу, яка неможлива без керування водним режимом ґрунту. На відміну від поверхневих способів поливу, підґрунтове зрошення є недостатньо вивченим. Питання теоретичного обґрунтування цього способу поливу, підтвердженого експериментальними дослідженнями, потребують подальшого більш серйозного вивчення.

Через великі капітальні затрати на будівництво систем внутрішньогрунтового зрошення (СПГО) цей спосіб поливу найбільш доцільно використовувати при вирощуванні високорентабельних сільськогосподарських культур, до яких належать і плодові культури. Однак, будівництво СПГО, що передує посадці плодових дерев, призводить до того, що впродовж багатьох років до початку періоду плодоношення капіталовкладення не приносять прибутку, тобто, є «замороженими». У сучасних умовах це перешкоджає широкому впровадженню цього способу поливу в плодівництві.

У зв'язку з цим з'явилась необхідність у проведенні досліджень і обґрунтуванні параметрів і режимів роботи систем поливу плодових насаджень, зокрема внутрішньогрунтового зрошення садів.

Мета роботи: розробка та оптимізація параметрів і режимів роботи пристрою для прокладання зрошувачів із протифільтраційним екраном для підтримки вологості і розподілу її в горизонтальному напрямку в ґрунті при поливі плодових насаджень.

Завдання:

- Виконати аналіз сучасного стану та перспектив розвитку наявних способів і технічних засобів для зрошення сільськогосподарських культур, параметрів і режимів їхньої роботи;
- Вивчити закономірності пересування та розподілу вологи в активному шарі ґрунту за внутрішньогрунтового зрошення;

- Виконати аналіз взаємодії робочого органу для утворення порожнини в ґрунті для безтраншейного укладання зрошувача з протифільтраційним екраном;
- Проаналізувати ущільнення стінок порожнини при взаємодії з ґрунтом робочого органу;
- Виконати аналіз енергомісткості процесу одночасного утворення порожнини в ґрунті та протягування труби зрошувача з протифільтраційним екраном;
- Виконати аналіз стійкості склепіння порожнини, утвореної робочим органом в ґрунті;
- Експериментально підтвердити адекватність отриманих теоретичних залежностей.

Авторам приємно скористатись можливістю подякувати рецензентам за корисні зауваження та побажання.

Робота буде корисною співробітникам науково-дослідних та проєктно-конструкторських організацій та виробничих підприємств, аспірантам, докторантам, викладачам та студентам ЗВО, усім, хто займається вирішенням завдань, пов'язаних із питаннями внутрішньогрунтового зрошення та осушення.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Характеристика основних водно-фізичних властивостей ґрунтів

Однією з умов отримання високих і стабільних врожаїв сільськогосподарських культур є створення оптимальних параметрів вологості в ґрунтовому профілі.

Закономірності формування режим зволоження ґрунту значною мірою визначаються його гідрофізичними властивостями, які залежать від гранулометричного складу, щільності, температури, порозності, вмісту органічної речовини. Це визначає, з одного боку, неоднорідність ґрунтів за гідрофізичними параметрами, а з іншого – більш практичні можливості для моделювання та прогнозування гідромеліоративних ефектів різних агрозаходів та обґрунтування найбільш раціональних меліоративних технологій.

Водними (водно-фізичними, гідро-фізичними) властивостями називають сукупність властивостей ґрунту, які визначають поведінку ґрунтової води в його товщі. Найбільш важливими водними властивостями є: водоутримувальна здатність ґрунту, його вологоємність, водопідйомна здатність, потенціал ґрунтової вологи, водопроникність.

Водоутримувальна здатність – здатність ґрунту утримувати в собі вологу від стікання під впливом сили тяжіння. Кількісною характеристикою водоутримувальної здатності ґрунту є його вологоємність.

Вологоємність ґрунту – здатність поглинати та утримувати певну кількість води. Залежно від сил та умов, які утримують воду в ґрунті, її утримання розрізняють такі види вологоємності, які відповідають певним формам води: максимальну адсорбційну, максимальну молекулярну, капілярну, найменшу, або польову, і повну.

Для розрахунку поливних норм використовують *найменшу вологоємність (НВ)*, яка залежить головним чином від гранулометричного складу ґрунтів, від їхньої структурності та щільності (складення). У ґрунтах, важких за гранулометричним складом, добре структурованих, НВ ґрунту становить 30–35 %, у ґрунтах піщаних вона не перевищує 10–15 %. Найменша вологоємність ґрунтів є важливою гідрологічною характеристикою ґрунту. З нею пов'язане поняття про дефіцит вологи в ґрунті, що дорівнює різниці між найменшою можливою вологоємністю та фактичною вологістю ґрунту. Оптимальною вологістю вважається вологість ґрунту, яка становить 70–80 % для плодів і ягід, 75–90 % для овочевих культур найменшої вологоємності.

Водопроникність ґрунтів – здатність ґрунтів усмоктувати та пропускати через себе воду, яка надходить з поверхні. У процесі надходження води в ґрунт та подальшого її пересування можна виділити 2 етапи: 1) поглинання води ґрунтом та проходження її від шару до шару у ненасиченому водою ґрунті; 2) фільтрацію води скрізь товщу насиченого водою ґрунту.

При цьому, перший полягає у всмоктуванні ґрунту та характеризується *коефіцієнтом усмоктування*. Другий етап – це сама фільтрація. Інтенсивність проходження води в ґрунтовій товщі, що насичена водою, характеризується *коефіцієнтом фільтрації*. У природних умовах чітко виділити окремі етапи водопроникності практично неможливо. Частіше при цьому проходить усмоктування води ґрунтом, фільтрація ж має місце тільки у випадку надходження великої кількості опадів, за умов зрошення великими нормами та за умов сніготанення. Межею між усмоктуванням ґрунтів і фільтрацією вважають момент встановлення постійної швидкості фільтрації.

Водопроникність ґрунтів знаходиться в тісній залежності від їхнього гранулометричного складу та хімічних властивостей ґрунтів,

їхнього структурного стану, щільності, шпаруватості, вологості та тривалості зволоження.

Водопроникність ґрунтів вимірюється об'ємом води, який проходить через одиницю площі поперечного перетину за одиницю часу (табл. 1.1).

У ненасичених водою ґрунтах для кількісної характеристики водопроникності ґрунтів користуються *коефіцієнтом вологопровідності*. Він визначається як коефіцієнт пропорційності між швидкістю потоку води та градієнтом сил, що викликають пересування води (тиск, гідравлічний напір та ін.). Коефіцієнт вологопровідності залежить від вологості ґрунтів: збільшується зі збільшенням вологості та досягає максимуму у вологонасиченому ґрунті. У цьому випадку його називають *коефіцієнтом фільтрації*.

Таблиця 1.1

Оцінка водопроникності ґрунтів за М. О. Качинським [56]

<i>Водопроникність (в Па) за першу годину усмоктування при напорі 5 Па та температурі води 10° С</i>	<i>Оцінка</i>
Вище від 1000	Провальна
1000–500	Надвисока
500–100, вирівняна за всією площею	Найкраща
100–70	Добра
70–30	Задовільна
<30	Незадовільна

Водопідйомна здатність ґрунтів – властивість ґрунту викликати висхідний потік води, що вміщується в ньому, за рахунок капілярних сил. Висота підйому води в ґрунтах та швидкість її пересування визначаються в основному гранулометричним та структурним складом ґрунтів, їхньою пористістю (табл. 1.2).

У ґрунті, який насичений водою та не вміщує солей, тиск ґрунтової вологи дорівнює нулю. За зниження вологості ґрунту він набуває все більших за абсолютною величиною від’ємних значень. У міру висушування в ґрунті з’являється здатність поглинати воду при зустрічі з нею. Така здатність ґрунтів отримала назву всисної сили ґрунту. Вперше вона була встановлена В. Г. Корнєвим [67]. Величина, що характеризує цю силу, отримала назву всисного тиску ґрунту.

Таблиця 1.2

Водопідйомна здатність ґрунтів залежно від гранулометричного складу [109]

<i>Гранулометричний склад</i>	<i>Водопідйомна здатність, м</i>
Крупний пісок	0,5
Середній пісок	0,5–0,8
Супісок	1,0–1,5
Пилуватий супісок	1,5–2,0
Суглинок середній	2,5–3,0
Суглинок важкий	3,0–3,5
Глина важка	4,0–6,0
Леси	4,0–5,0

При підґрунтовому зрошенні, де вода надходить знизу через закладені у ґрунті труби, зволоження активного шару ґрунту відбувається

переважно капілярним та плівковим шляхом, тобто використовується всисна здатність ґрунту. Остання залежить від капілярних властивостей – чим більша капілярність ґрунту, чим менший діаметр його часточок, тим більша всисна здатність ґрунту за інших рівних умов. Однак, крім цих факторів, всисна здатність ґрунту в певний момент часу значно залежить від його вологості. Чим більша вологість ґрунту, тим менша, за інших рівних умов, його всисна здатність та навпаки.

Зміни всисної здатності ґрунту залежно від вологості відбувається по певній кривій, за думкою М. О. Муромцева [92], у звичайних координатах залежність носить гіперболічний характер, а в напівлогарифмічному масштабі, як зазначає І. І. Судніцин [133], – лінійний.

1.2 Аналіз методів прогнозування розповсюдження вологи в ґрунті

У процесі поливу між ґрунтом та водою виникає ціла низка фізико-хімічних та фізичних явищ, які можуть бути представлені як результат дії сил, що виникають на межі розділу між твердими часточками ґрунту та вологою. Питанню взаємодії твердої частини ґрунту та води, а також пересуванню вологи в ґрунтах присвячена значна кількість експериментальних та теоретичних досліджень. Важливі результати були отримані С. І. Долговим [43], О. В. Ликовим [83], А. І. Будаговським [27], І. І. Судніциним [133], О. Ф. Лебедевим [80, 81], О. О. Роде [118, 119], Е. Букінгемом [150], Н. Едлефсеном [152], Дж. Філіпом [156] та іншими вченими.

Найбільш досконалою класифікацією пересування вологи в ґрунті є класифікація, яка запропонована О. О. Роде [119].

Він розрізняє чотири «механізми» її пересування: гравітаційний, гравітаційно-капілярний, плівково-капілярний і плівковий.

Переміщення вологи в ґрунті залежить від вологості останнього. Обов'язковою умовою переміщення в ґрунті вологи з однієї точки ґрунтової товщі в іншу є наявність різниці сил, під дією яких знаходиться волога в цих точках.

Найбільш перспективним та теоретично зумовленим підходом до вивчення поведінки води в ґрунті вважається термодинамічний підхід, оскільки він не тільки дозволяє описувати стан та переміщення води в ґрунті в конкретний момент часу в найбільш загальному вигляді на базі фундаментальної фізичної теорії, розглядаючи весь водообмін природних екосистем в єдиних термінах, але й допускає кількісний прогноз водообмінних процесів, що особливо важливо для суджень про водозабезпечення та водоспоживання рослин. На основі цього підходу можливе автоматизоване управління водним режимом ґрунтів в умовах штучного зволоження (зрошення) або осушення (дренажу). У розробку такого підходу особливо великий внесок зробили такі вчені, як Л. О. Річардс [158], І. І. Судніцин [133], О. М. Глобус [35], О. Д. Воронін [32]. Сутність термодинамічного підходу зводиться до використання понять повного та часткових термодинамічних потенціалів ґрунтової води, що піддаються інструментальному вимірюванню, тобто кількісній енергетичній оцінці сил взаємодії між водою та твердою фазою ґрунту, що вміщує цю воду.

Оскільки вода в ґрунті знаходиться під одночасним складним впливом декількох силових полів – адсорбційних, капілярних, осмотичних, гравітаційних, – для характеристики їхньої сумарної дії та оцінки енергетичного стану води в ґрунті введено поняття термодинамічного, або повного, потенціалу ґрунтової води.

Повний потенціал ґрунтової води (ψ_t) – це кількість роботи, Дж·кг⁻¹, яку необхідно витратити, щоб перенести одиницю вільної чистої води

зворотно та ізотермічно із стандартного стану S_0 в той стан S_n , у якому вона знаходиться у точці ґрунту, що розглядається. Іншими словами, ця величина відображує здатність води в ґрунті виконувати більшу чи меншу роботу порівняно з чистою вільною водою.

Повний, або термодинамічний, потенціал ґрунтової води дорівнює сумі часткових потенціалів, зв'язаних з різними силовими полями:

$$\psi_t = \varphi_a + \varphi_k + \varphi_0 + \varphi_g = \varphi_p + \varphi_0 + \varphi_g = g_0 S^z dz + V_{H_2O} [S_0^p dP + S_0^\pi d\pi], \quad (1.1)$$

де φ_a – адсорбційний потенціал; φ_k – капілярний потенціал; φ_0 – осмотичний потенціал; φ_g – гравітаційний потенціал; φ_p – потенціал тензометричного тиску; z – вертикальна відстань; g – сила гравітації на одиницю маси води; V_{H_2O} – парціальний питомий об'єм води в ґрунтовому розчині; P – тиск води; π – осмотичний тиск.

Відносний внесок часткових термодинамічних потенціалів ґрунтової води до її повного потенціалу суттєво змінюється зі зміною вологості ґрунту: чим сухіший ґрунт, тим більша роль адсорбційних та осмотичних сил; чим він вологіший, тим більша відносна роль капілярних, а потім гравітаційних явищ і тим менше значення тиску, що показує тензіометр [109].

Різниця потенціалів ґрунтової води у різних точках є безпосередньою причиною руху води в ґрунтах: вода пересувається у бік найбільш низького потенціалу, у загальному випадку із вологіших ділянок у сухіші. Однак, унаслідок наявності опору середовища руху води рушійною силою пересування ґрунтової води слугує не різниця потенціалів (тисків) води між двома точками ΔP , а градієнт $\Delta P / \Delta l$ впродовж напрямку руху, що було встановлено ще в середині XIX століття у відомому законі Дарсі для густини усталеного водного потоку у пористому середовищі [109].

Існує певний зв'язок ґрунтово-гідрологічних констант із тиском ґрунтової води. Наприклад, найменшій вологості ґрунту відповідає тиск від -10^4 до $-3 \cdot 10^4$ Па, а вологості в'янення від $-6 \cdot 10^5$ до $-2,5 \cdot 10^6$ Па. Зі змінами тиску ґрунтової води залежно від вологості змінюється й коефіцієнт вологопровідності ґрунтів K у рівнянні потоку води в ґрунті ($i = -K \Delta P / \Delta l$); за зміни вологості ґрунту від найменшої вологості до вологості в'янення K зменшується на два порядки (сухий ґрунт має гіршу вологопровідність, ніж вологий).

Установлено емпіричні залежності споживання води рослинами від тиску води в ґрунті, але вони досить складні й схильні до дії багатьох найрізноманітніших факторів, які діють у системі ґрунт–рослина–атмосфера. Однак, моделювання процесів споживання води з використанням термодинамічної концепції поведінки води в ґрунті є досить перспективним і може бути використане для керування водним режимом ґрунтів.

При моделюванні водного режиму ґрунтів різного ступеня насиченості до нашого часу, за думкою Ю. Я. Гольцова [98], не запропоновано більш адекватної та простої моделі ізотермічного руху води, ніж одномірне рівняння [110, 116]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(W) \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q(z, t), \quad (1.2)$$

в основі якого лежить рівняння Річардса [158]. Тут: $W(\psi)$ – вологість ґрунту, частк. од; $H = -\psi - z$ – гідравлічний напір, м; $\psi(z)$ – потенціал тиску води, м; $K(W)$ – коефіцієнт вологопровідності, м/доб; $Q(z, t)$ – функція джерел-стоків, л/доб; z – вертикальна координата з позитивним напрямком донизу, м; t – час, год.

Простота рівняння (1.2) та його переваги, що дозволяють розглядати водночас процеси руху води в насиченій та ненасиченій зонах ґрунту, роблять його привабливим при моделюванні.

Збереження одномірності рівняння Річардса при розгляді руху води в різноманітних природних умовах та побудові максимально простих розрахункових схем розширюють його застосування.

Одномірний рух води в ґрунтах у напрямку $s(t)$ як функції часу [116], і таким, що складає кут α з віссю z , дозволяє (1.2) записати у вигляді:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left[K(W) \frac{\partial H}{\partial s} \right] + Q(s, t) \quad (1.3)$$

де вираз для гідравлічного напору отримує вигляд:

$$H = -\psi - s(t) \cos \alpha \quad (1.4)$$

Використовуючи закони Дарсі та збереження речовини або ж застосувавши [113], досить легко отримати одномірне рівняння:

$$F(s) \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left[F(s) K(W) \frac{\partial H}{\partial s} \right] + Q(s, t) \quad (1.5)$$

руху води у стрічці ґрунту (вертикальній площині) змінної ширини $F(s)$ зони неповного та повного насичення.

Усі моделі вологопровідності ґрунту, на думку О. Д. Ахмедова [14], умовно можна розділити на теоретичні, напівемпіричні та емпіричні.

Теоретичні моделі – різні залежності, які базуються на законах руху рідини в капілярно-пористих тілах. До цієї групи моделей належать залежності, що дозволяють визначити вологопровідність за раніше розрахованою основною гідрофізичною характеристикою ґрунту.

На відміну від теоретичних моделей, напівемпіричні базуються на теоретичних передумовах, це складні теоретичні рівняння.

Найбільш розповсюдженою напівемпіричною моделлю є формула, що описує залежність коефіцієнта вологопровідності від ступеня насичення ґрунту вологою ступеневою функцією:

$$K(W) = K_{\phi} \left(\frac{W - W^*}{m - W^*} \right)^n, \quad (1.6)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації; m – пористість; W^* – зв’язана волога, тобто волога, за якої починається інтенсивний рух води у рідкій фазі.

Запропонована залежність (1.6) отримала подальший розвиток у низці робіт [29, 30]. Причому модифікації цієї моделі торкались гідрологічних констант, що входять до залежності, та показника ступеня. Галузь застосування цієї моделі була розширена у межах від максимальної гігроскопічності до повного водонасичення шляхом збільшення показника ступеня до $n = 5$, при цьому залежність набуває вигляду:

$$K(W) = K_{\phi} \left(\frac{W - W_m}{m - W_m} \right)^5, \quad (1.7)$$

де W_m – максимальна гігроскопічність.

Остання група моделей – це емпіричні моделі, тобто прості емпіричні формули, що апроксимують експериментальні криві вологопровідності ґрунту. Прикладом емпіричних моделей може бути регресійна залежність коефіцієнта вологопровідності від гранулометричного складу ґрунту.

Залежність напору ґрунтової вологи від глибини та з витокком часу описується рівнянням Голованова [28]:

$$C_{\omega} \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial z} \right) - E(\omega, z, t), \quad (1.8)$$

де C_ω – коефіцієнт вологоємності; H – тиск ґрунтової вологи; змінюється: збільшується з часом, зменшується за вертикальною координатою; k_ϵ – коефіцієнт вологопровідності ґрунту, дорівнює коефіцієнту пропорційності між швидкістю потоку води та градієнтом сил;

$$k_\epsilon = k_\phi ((\omega - \omega_m) / (p - \omega_m))^5.$$

де k_ϕ – коефіцієнт фільтрації шару, що розглядається; ω - об'ємна вологість ґрунту; ω_m – максимальна гігроскопічність ґрунту; p – об'ємна пористість ґрунту.

Аналіз розглянутих результатів дозволяє зробити висновок про те, що зрошувачі за умов використання протифільтраційного екрану можуть бути розташовані на відстані 3–4 м. Ураховуючи суттєву засоленість ґрунтів, ця відстань може бути й більшою, оскільки засолені ґрунти мають суттєво вищий потенціал вологи (залежність (1.1)).

1.3 Аналіз способів та технологій поливу плодових насаджень та виноградників

У системі агротехнологічних прийомів при вирощуванні сільськогосподарських культур у посушливих умовах однією з найважливіших операцій є полив. На сьогодні існує велика різноманітність видів зрошення та поливних пристроїв для них.

Дослідженню процесу зрошення присвячені роботи Є. В. Акутневої, М. П. Мазепи, О. Д. Ахмедова, М. М. Багрова, В. І. Барашкова, В. Д. Бердишева, Є. П. Борового, Є. О. Ветренко, Г. І. Вороніної, М. С. Григорова, В. Р. Ридигера, Д. Б. Райхмана, Б. Б. Шумакова, Ю. Л. Маркова, О. О. Черкасова, А. М. Костякова.

М. І. Ромащенко [3, 84, 13, 16-18, 24–26, 29, 33, 37–39, 117, 114, 149, 85, 143, 69, 123] та інші.

Показниками якості поливу є виконання норми поливу, дисперсність краплі, інтенсивність поливу, рівномірність та своєчасність поливу.

Способи і техніка поливу повинні забезпечувати рівномірне зволоження ґрунту на площині та на задану глибину, механізацію робіт і високу продуктивність праці, а також економне витрачання води. У практиці зрошувального виноградарства застосовують наземні способи поливу (в борознах, борознах-щілинах), дощування, підґрунтовий та крапельний.

Поверхневий полив за характером зволоження та умовами механізації проводиться напуском у рядах чи майданчиках із затопленням усієї поверхні ділянки (трави, зернові) або з подаванням води в борозни (просапні культури).

Полив у борознах проводиться переважно при вирощуванні просапних культур, при рядковому способі посіву польових, овочевих культур, а також плодових та ягідних насаджень. Борозни бувають мілкі – 8–12 см, середні – 12–16 см, глибокі – 22 см та дуже глибокі – більше від 22 см.

Полив у борознах-щілинах застосовують на ділянках з нерівним рельєфом, на середньо- та важкосуглинкових ґрунтах. У міжрядді виноградника центральним розпушувачем ПРВМ-53000 нарізують одну борозну-щілину глибиною 45–50 см. Для утворення борозни у верхній частині стояка розпушувача приварюють полицю лістерного корпуса. При цьому борозна має глибину 20–25 см, ширину по верху 50–60 см та нижче дна щілину завглибшки 25 см. На відстані 70 см від осі борозни ґрунт обробляють боковими розпушувачами на глибину 30–35 см [45 а].

Довжина поливної борозни залежить від водопроникності ґрунту, нахилу поливної ділянки та може дорівнювати 100–300 м.

Недоліки цього способу поливу: велика трудомісткість, низька продуктивність праці поливальника, неможливість поливу малими нормами. Крім того, якщо засолені ґрунти залягають неглибоко, то можливе засолення міжборозневих смуг у результаті випаровування вологи [85].

Полив рядів застосовується для вологозарядки, поливу культур суцільного, рідше широкорядкового способу посіву та садів.

Цей спосіб поливу застосовується на полях зі спокійним рельєфом, з однорідним поздовжнім схилом від $0,002^\circ$ до $0,015^\circ$. Поперечний схил не повинен перевищувати $0,005^\circ$ на вузьких та $0,003^\circ$ на широких смугах. Ширина смуг коливається від 3,6 до 20–30 м, довжина – від 50 до 400 м та більше. Довгі смуги нарізуються на добре спланованих полях із поздовжнім схилом $0,001^\circ$ – $0,003^\circ$ та незначною водопроникністю ґрунту.

Недоліком цього способу поливу є ущільнення ґрунту на всій площі та утворення поверхневої ґрунтової кірки. При запізненні з поливом можуть утворюватися щілини в ґрунті, що призводить до розриву кореневої системи рослин.

Полив затопленням проводиться на ділянках (чеках), обмежених земляними валами. Він потребує великих попередніх затрат на спорудження чеків, особливо ретельного планування та, у багатьох випадках, на спорудження дренажної мережі [149].

Недоліки цього способу поливу такі: перш за все, витрачається велика кількість води. Через тривале затоплення чеків ґрунт роз'єднується з приземним шаром повітря, на тривалий час припиняється газообмін між ґрунтовим та атмосферним повітрям, уповільнюється аеробний процес та погіршуються умови живлення рослин [114].

Агротехнічні вимоги до поверхневого поливу:

– час початку зрошення та норми поливу встановлюються безпосередньо в господарствах залежно від вмісту вологи в ґрунті;

– при подачі поливної норми повинна бути забезпечена необхідна глибина зволоження ґрунту, що відповідає глибині залягання основної маси коріння рослин;

– розподіл вологи на зрошуваній площі повинен бути рівномірним: при швидкості вітру до 5 м/с коефіцієнт рівномірності – не менший від 0,7;

– вміст зважених частинок – до 5 г/л та мінеральних солей – до 6 г/л;

– стік води зі зрошуваної площі не допускається;

– нерівномірність подачі води в борозни не повинна перевищувати $\pm 10\%$ від заданої норми поливу за одночасної роботи всіх трубопроводів;

– пошкодження культурних рослин не повинні перевищувати 0,2 %;

– не допускається розмивання ґрунту у місцях сполучення та водовипусків поливного трубопроводу;

– розміри зрошуваних ділянок – площа (з різною конфігурацією) 5–30 га; довжина поливних борозен 100–600 м, глибина 13–16 см [69].

Виходячи з вищевказаного, можна виділити основні переваги та недоліки способу **поверхневого зрошення**.

Переваги: низькі капіталовкладення; низькі витрати на енергію; низькі експлуатаційні витрати; можливість поливу під час вітру; підходить для поливу рослин, чутливих до захворювань листків.

Недоліки: великі втрати води; можливість розповсюдження захворювань рослин; цей спосіб не прийнятний на несприятливих схилах; не прийнятний як зволожувальний полив; великий об'єм планувальних робіт при складному мікрорельєфі; порушення структури ґрунту та необхідність у додатковому рихленні міжрядь; нерівномірність зволоження ґрунту вздовж поливних борозен та смуг; висока ймовірність

підйому рівня ґрунтових вод із засоленням чи заболочуванням зрошуваних ділянок [143].

Дощування – це найбільш розповсюджений спосіб поливу. Застосовується в зонах нестійкого зволоження, при зрошенні ділянок зі складним рельєфом та водопроникними ґрунтами з близьким заляганням ґрунтових вод. Штучне дощування подібне до природного дощу невеликої інтенсивності, але достатньої тривалості, створює найкращі умови для росту рослин; зменшується випаровування внаслідок високої теплоємності води; температура навколоземного шару повітря знижується у спекотний час доби та підвищується у прохолодні нічні години [149].

Дощування найбільш широко застосовують на непохилених або малопохилених ділянках із ґрунтами середньої та високої водопроникності для поливу овочевих, технічних, зернових культур, садів, розсадників, луків у зоні недостатнього зволоження, де зрошення тільки доповнює природні опади в посушливі періоди [114].

Полив дощуванням широко застосовують на виноградниках багатьох країн світу. Він забезпечує рівномірне зволоження ґрунту на всій площі, підвищує продуктивність праці на поливі та зменшує затрати праці. В Україні дощування перспективне при зрошенні виноградників на схилах і на піщаних масивах Лівобережного Нижньодніпров'я. Для поливу виноградників дощуванням використовують стаціонарні зрошувальні системи, шлейфи ДШ-25/300, дощувальну машину ДФ-120 "Днепр", переобладнаний ДДА-100МА. При організації території виноградника для поливу за допомогою ДДА-100МА через кожні 100 м залишають дорогу шириною 6 м для нарізування тимчасового зрошувача та проходу агрегату, Для глибшого зволоження ґрунту перед поливом міжряддя чизелюють на глибину 25–30 см. Кращі результати одержують, коли ДДА-100МА проходить на зрошуваній ділянці шість-вісім разів

залежно від норми поливу. При нормі поливу 500 м³/га продуктивність праці становить 0,9 га/год [45, 45 а].

Зрошення дощуванням незамінне на ділянках зі складним рельєфом, із близьким заляганням ґрунтових вод та зі слабозасоленими ґрунтами.

Дощування має такі переваги порівняно з поверхневим зрошенням: повна механізація робіт; поливна норма регулюється більш точно та в широких межах (від 30...50 до 300...800 м³/га та більше), що дозволяє створювати водно-повітряний режим ґрунту, близький до оптимального, та регулювати глибину промочування ґрунту; можна здійснювати полив на ділянках з великим нахилом та складним мікрорельєфом; забір води можливий із каналів, а також із закритої мережі; відсутні роботи з вироблення поливних борозен, валів, вивідних борозен; покращуються умови механізації посіву, посадки, обробки та збирання сільськогосподарських культур; покращуються мікроклімат та розвиток кореневої системи; активізуються процеси асиміляції; підвищуються родючість ґрунту та врожайність сільськогосподарських культур; запланований врожай можна отримати за менших (на 15...30 %) затрат води, ніж при поверхневому зрошенні; крім того, одночасно зі зрошенням можна вносити в ґрунт і добрива [132].

Агротехнічні вимоги до зрошення методом дощування:

- час початку зрошення та норми поливу встановлюються безпосередньо в господарствах залежно від вмісту вологи в ґрунті;
- не допускається пошкодження рослин при зрошенні;
- при подачі поливної норми повинна бути забезпечена необхідна глибина зволоження ґрунту, що відповідає глибині залягання основної маси коренів рослин;
- розподіл вологи по зрошуваній площі повинен бути рівномірним: за швидкості вітру до 5 м/с коефіцієнт рівномірності – не менший за 0,7;

- стік води зі зрошуваної площі не допускається;
- вміст зважених частинок – до 5 г/л [114];
- при дощуванні розмір краплин не повинен перевищувати 1...2 мм.

Цей показник штучного дощу впливає на допустиму інтенсивність, витрати води на випаровування; витрати потужності, ущільнення ґрунту, допустиму поливну норму до початку утворення стоку та ін. Так, при діаметрі крапель 1,0–1,5 мм та інтенсивності 0,5 мм/хв величина допустимої поливної норми – 130–700 м³/га, а при діаметрі краплин більшим, ніж 2,0 мм – лише 50–190 м³/га. Збільшення інтенсивності до 1,0 мм/хв зменшує допустиму поливну норму до 30–120 м³/га (діаметр краплин більший, ніж 2,0 мм) [69];

- інтенсивність дощування, тобто товщина шару вологи, що подається на ґрунт за одиницю часу, на важких ґрунтах не повинна перевищувати 0,2 мм/хв, на середніх ґрунтах – 0,2...0,3 мм/хв та на легких ґрунтах – 0,5...0,8 мм/хв. За таких умов краплини не пошкоджують рослини, вода вбирається ґрунтом, а ґрунтові грудки не руйнуються [143].

Виходячи з вищевказаного, можна виділити основні переваги та недоліки способу зрошення методом дощування.

Переваги: можливий полив на полях зі складною топографією; підходить для поливу більшості культур; висока ефективність поливу; широкий діапазон вибору розміру краплини дощувача полегшує проєктування та регулювання інтенсивності поливу; дає можливість точного вимірювання розходу води на ділянці; збільшує коефіцієнт земельно використання; висока мобільність систем зрошування; зручність внесення добрив із поливною водою; можливість досягнення однакової інтенсивності поливу на зрошуваній ділянці.

Недоліки: високі початкові капіталовкладення; додаткові витрати на енергію, що необхідна на створення необхідних напорів у зрошувальних системах (40...100 кВт/гол на 1 полив при нормі 300 м³/га);

нерівномірність розподілу води в полі під час вітру; проблеми ущільнення верхнього шару ґрунту, що пов'язане з утворенням кірки на поверхні ґрунту, й підвищений стік; ускладнює проведення сільськогосподарських робіт на зрошуваній ділянці; велика питома металоємність (100–300 кг/га); необхідність постійного обслуговування дощувальних насадок та дефлекторів [143].

Крапельне зрошення – термін, що об'єднує нові технології та технічні засоби поливу сільськогосподарських культур. Процес крапельного зрошення забезпечується при відносно невеликому тиску з деякими інтервалами та з малою інтенсивністю подачі води або подачі слабо концентрованих розчинів поживних речовин до коренів рослин над поверхнею ґрунту або безпосередньо в ґрунт.

Крапельне зрошення характеризується низкою технологічних особливостей, головними з яких є:

- локальний характер зволоження ґрунтів тільки в зоні розвитку основної маси кореневої системи;
- використання для налаштування водорозподільної системи крапельного зрошення інертних відносно навколишнього середовища матеріалів, передусім полімерних [123].

При краплинному зрошенні з'являється можливість проводити обробіток ґрунту, боротьби зі шкідниками та хворобами рослин безпосередньо під час поливу. Низька питома інтенсивність подачі води, а також локальний характер зволоження ґрунту робить краплинний спосіб поливу придатним для проведення зрошення на невірвняних ділянках та крутих схилах, що важливо для зон із низьким рівнем водозабезпечення та пересіченим рельєфом місцевості [124].

Переваги крапельного зрошення: кореневий метод поливу; втрати вологи за рахунок випаровування менші, ніж при дощуванні або поверхневому зрошенні; вітер не впливає на розподіл вологи; не потребує

ретельного планування поливної ділянки, запобігає поверхневому стоку навіть у складних топографічних умовах; дає можливість проведення сільськогосподарських робіт під час зрошення; можливість поливу малими поливними нормами та з короткими міжполивними періодами; не потребує створення високого тиску в напірних магістралях; при використанні баку-накопичувача поливна вода досягає оптимальної температури, що допомагає уникнути температурного шоку у рослин.

Недоліки крапельного зрошення: не припустиме для допоміжних технічних поливів; часта забрудненість крапельниць-водовипусків відкладенням солей та планктоном, що утворюються впродовж міжполивного інтервалу в трубопроводах-зволожувачах; висока вартість побудови систем крапельного зрошення, а також високі експлуатаційні витрати; нерівномірність розподілу води на зрошуваній ділянці; за недостатніх опадів необхідна додаткова поливна норма, частіше за все подана дощуванням.

Підґрунтове зрошення. Систему внутрішньогрунтового зрошення класифікують за конструкцією зволожувачів та улаштуванням провідних елементів мережі, характером роботи мережі в процесі поливу. Основний конструктивний елемент, що визначає особливості системи внутрішньогрунтового зрошення, – зволожувачі, конструкція та матеріал яких можуть впливати на характер та розподіл води та зволоження ґрунту [132].

Для улаштування труб-зволожувачів застосовують гончарні та керамічні труби, а останнім часом – і полімерні. Підґрунтове зрошення базується на дії всисної сили ґрунту, тому його можна застосовувати на ґрунтах із добрими капілярними властивостями та водопроникним підґрунтям, і не можна – не піщаних, супіщаних, присадкових, галечникових та засолених [97].

За способом подавання води підґрунтові системи поділяють на вакуумні або адсорбційні з капілярним зволоженням (вода надходить до рослин завдяки всисним силам ґрунту); низького тиску з капілярно-гравітаційним зволоженням (вода розподіляється по мережі самопливом) та напірні з гравітаційно-капілярним зволоженням (вода надходить в ґрунт при створенні штучного тиску) [114].

При такому виді внутрішньогрунтового зрошення вода в трубах знаходиться під певним тиском, а характер її надходження буде залежати від конструкції зволожувачів. У тому випадку, якщо в трубах має місце зосереджений вихід води (отвір, щілина та ін.), то вода, що надійшла в ґрунт, пересувається в ньому головним чином під дією сили тяжіння та гідростатичного тиску. Якщо вихід води в ґрунт відбувається через пористу поверхню труб, то її подальше пересування в ґрунті носитиме переважно капілярний характер.

Переваги внутрішньогрунтового зрошення: можливість підтримувати вологість активного шару ґрунту на рівні капілярної вологості; структура орного шару не руйнується поливами, не утворюється кірка, менша кількість бур'янів; можна використовувати стічні води та теплові відходи ТЕС; випаровування з поверхні ґрунту менше і запаси вологи в ґрунті зберігаються довше, ніж за поливу способом дощування; немає перепон для механізації всіх сільськогосподарських робіт, тому що відсутня тимчасова зрошувальна та поливна мережа; може бути використаним для внесення рідких мінеральних добрив та аерування [114].

Недоліки: висока вартість будівництва системи; неможливість використання на легких, присадочних та засолених ґрунтах; слабе зволоження верхнього шару ґрунту (0...0,1 м), що погіршує умови сходів та приживлюваності розсади овочевих та інших культур; необхідність освітлення зрошувальної води для уникнення замулювання

зрошувальних труб; утруднений ремонт та огляд поливних ліній; водовипуски можуть зазнавати блокування коренями рослин; необхідне часте промивання системи; не забезпечується рівність використання всіх мікродовипусків за часом [69, 114].

Аерозольний (дрібнодисперсний) полив застосовують переважно при вирощуванні посадкового матеріалу під плівкою та в теплицях. Цей спосіб базується на покриванні рослин туманом, коли краплини води, опадаючи на листки рослин, не скочуються, а знаходяться на них до повного випаровування.

Аерозольне зрошення призначене для регулювання мікроклімату над полем. Доцільність застосування дрібнодисперсного (аерозольного) зрошення залежить від природно-кліматичних (клімат, рельєф, забезпеченість водою, якість зрошувальної води) та господарсько-економічних умов (склад та особливості сільськогосподарських культур, їхні фізіологічні потреби, умови вирощування, ресурсозабезпеченість).

Розробляються технології їхнього застосування для регенерації кореневої системи озимих культур після несприятливих умов зимування [81].

Величина краплин води досягає 200–300 мікроміліметрів, які не скочуються з листків, а залишаються на них до повного випаровування. Такі краплини води утворюються при дробленні струменя води туманоутворювальними пристроями. Упродовж дня посіви та посадки зволожують до 10 разів, витрачаючи за один полив 100–200 л/га води. Системи аерозольного зрошення можуть бути рухомими, напівстаціонарними та стаціонарними [114].

Переваги аерозольного зрошення: економні витрати води; підтримка ґрунту біля кореневої системи рослин у вологому стані, а в міжряддях – у напівсухому, що забезпечує обробіток насаджень; туман,

утворений над поверхнею ґрунту при аерозольному зрошенні, сприяє захисту рослин від заморозків.

Недоліки: підвищені вимоги до очищення води; можливе супроводження посиленням розвитком певної групи хвороб листків та плодів; не враховуються фізіологічні процеси в рослинах [87].

Виходячи з аналізу переваг та недоліків способів зрошення, Д. Б. Райхман та Д. В. Зубоченко склали таблицю призначення способів поливу сільськогосподарських культур (табл. 1.3) та таблицю умов застосування різних способів зрошення у несприятливих природно-кліматичних умовах (табл. 1.4) [114].

Таблиця 1.3

Основне призначення різних способів зрошення
сільськогосподарських культур*

Спосіб зрошення	Зволоження ґрунту	Зволоження повітря	Вологозарядка	Промивання від солей	Внесення добрив	Зрошення стічними водами	Терморегулююче зволоження рослин	Провокаційні поливи для росту бур'янів
Дощування	+	+	х	-	+	Х	+	+
Поверхнєве	+	х	+	+	х	+	-	+
Підґрунтове	+	-	-	+	+	+	-	-
Крапельне	+	-	-	-	+	-	-	-
Аерозольне	-	+	-	-	-	-	+	-

*Примітка: «+» – забезпечує, «-» – не забезпечує, «х» – частково забезпечує

Таблиця 1.4

Застосування різних способів зрошення сільськогосподарських культур у несприятливих природно-кліматичних умовах*

Спосіб зрошення	Засолені ґрунти	Легкі піщані ґрунти	Важкі ґрунти	Складний рельєф	Великі уклони	Близько розташовані мінералізовані води	Дефіцит водних ресурсів	Мінералізована вода	Сильний вітер
Дощування	-	+	х	+	+	+	+	-	х
Поверхнєве	+	х	+	х	х	х	Х	х	+
Підґрунтове	+	х	х	х	+	+	+	-	+
Крапельне	-	х	+	+	+	+	+	-	+
Аерозольне	+	+	+	+	+	+	+	-	+

*Примітка: «+» – забезпечує, «-» – не забезпечує, «х» – частково забезпечує

У наш час у зрошувальному садівництві є різні способи поливу: суцільне затоплення площі саду, полив тільки по чашах та чашах з одночасним зволоженням міжрядь саду напуском, по чеках, підковоподібних лунках – чашах на схилах, по довгих борознах, коротких затоплюваних борознах, комбіновані способи (по борознах із одночасним подаванням води у пристовбурові смуги), дощування за допомогою короткоструменевих та далекоструменевих дощувальних апаратів, дощувальних машин та установок, переносних та стаціонарних систем зі встановленням дощувальних насадок на висоті 3–4 м від поверхні ґрунту, зі зволоженням крони дерев та біля штампів (дощування з індивідуальним характером вологозабезпечення), краплинний полив з підґрунтовим та наземним зволоженням кореневмісного шару та інші, зокрема підґрунтовий полив із роздаванням води через стики гончарних трубок чи перфорацію поліетиленових труб [86].

Кожен із цих способів має свої особливості, переваги та недоліки. На вибір того чи іншого способу впливає багато факторів: умови рельєфу, водопроникність ґрунту, глибина залягання ґрунтових вод, вимоги сільськогосподарських культур та багато іншого. Останнім часом великі перспективи відкриваються (особливо за інтенсивного садівництва) щодо застосування крапельного та внутрішньоґрунтового способів поливу.

У посушливих регіонах переважають поверхневі способи поливу садів. Краплинний та підґрунтовий способи вивчені мало і потребують експериментальної перевірки на дослідно-виробничих ділянках. Полив по чашах – один із найбільш стародавніх способів поливу, у якому вода потрапляє під кожне дерево індивідуально.

До недоліків цього способу варто віднести велику трудоємність у виготовленні чаш, необхідність ретельного планування основ чаш, застосування великих норм поливу та неминуче скидання води за межі кореневмісного шару, вимивання легкорозчинних поживних речовин. Перезволоження ґрунту у межах чаші після поливу негативно впливає на повітряний режим кореневмісного шару. Крім того, полив по чашах не забезпечує зволоження всієї зони розповсюдження коренів плодового дерева.

Полив по борознах характеризується низькою продуктивністю і великими затратами праці. Не зволожується 50–60 % площі, яка відведена під плодове дерево. Застосування перехресного нарізання борозен сприяє скороченню незволоженої частини кореневмісного шару ґрунту до 16...20 %, але при цьому подвоюються витрати праці на проведення поливів. Полив по борознах непридатний на ділянках з ґрунтами легкого механічного складу [17], хоч відомо, що перспективою розвитку зрошувального садівництва передбачається використання великих площ з легким механічним складом ґрунтів.

Крім того, широке розповсюдження отримав спосіб поливу затоплення по чеках. Головними перевагами його є швидкість введення в експлуатацію, швидка окупність, певним чином вирішується завдання повної механізації зрошення. Недоліки: низький коефіцієнт використання води, великі поливні норми, загроза швидкого підняття ґрунтових вод, необхідне ретельне планування [3]. Комбінований спосіб поливу запропонований Т. І. Гориним в 1956 р. У дослідженнях, проведених О. К. Травиним на Кримській дослідній станції садівництва, вказано, що врожайність яблук за комбінованого поливу (по борознах та чеках) була вищою на 16,5 %, ніж за поливу по борознах [114].

В останні роки для зрошення садів у зоні нестійкого зволоження найбільш широкого застосування набув спосіб дощування. Зацікавленість

до цього способу невпинно зростає. Основною перевагою його є можливість повної механізації зрошення. Особливий інтерес виявляється до поливу садів дощуванням від стаціонарної зрошувальної мережі. У Молдові в наш час дощуванням зрошується більше, ніж 80 % плодкових насаджень. Також у садах можливе застосування дощування над кроною.

В Українському науково-дослідному інституті зрошуваного садівництва розроблений полив дощуванням з індивідуальним характером вологозабезпечення. Суть його полягає у тому, що: через міжряддя на глибині 0,25...0,40 м укладають трубопровід, від якого до кожного дерева двох суміжних рядків роблять відгалуження, які закінчуються дощувальним апаратом [3].

Деякі автори [114] вважають, що найбільш універсальним способом зрошення як для застосування різних видів поливу (зволоження ґрунту, зволоження повітря та ін.), так і для умов, у яких буде здійснюватися зрошення, є метод дощування.

В. І. Бобченко [22] вважає, що ні зрошення ґрунту з краплинних зволожувачів, ні дощування під крону не створюють оптимальних умов для росту сільськогосподарських культур. У районах із сухим та спекотним кліматом навіть за високої вологості ґрунту рослини можуть потерпати від водного дефіциту. Як доведено, вже невелике зневоднення рослинних тканин призводить до зупинки росту та зниженню продуктивності рослин. З іншого боку, постійне застосування дощування в плодovому саду, крім загрози недостатньо глибокого промочування ґрунту, підвищує вологість повітря, що сприяє розповсюдженню грибкових захворювань [144].

Властиві кожному способу поливу недоліки можна у багатьох випадках усунути суміщенням або поєднанням у процесі поливу різних способів поливу, що доповнюють один одного. Це забезпечує гнучке регулювання режиму вологості кореневмісних шарів ґрунту та

приземного шару повітря відповідно до біологічних особливостей сільськогосподарських культур [22].

Крім того, варто відзначити, що дослідженнями багатьох інших вчених, таких як В. Г. Коренев, В. М. Кичигін, В. І. Бобченко, О. О. Богушевський, І. М. Астапов, М. С. Григоров, В. Г. Лабода, В. І. Гостищев, Г. Ю. Шейнкін, Б. О. Шумаков, В. П. Остапчик, В. Р. Ридигер, А. Д. Ахмедов, Є. О. Ветренко, Є. В. Акутнєва, Є. П. Боровий та інших, – була встановлена ефективність дії внутрішньогрунтового зрошення на розвиток та продуктивність рослин, підвищення продуктивності праці на поливі порівняно з поверхневим зрошенням та дощуванням [3, 13, 12, 22, 23, 24-26, 36-39, 58, 67, 78-78, 117,99, 145, 149].

Уже зараз немає сумнівів у тому, що серед перспективних способів зрошення, у тому числі й плодкових насаджень, одним із основних є підґрунтове зрошення. Його використання дозволяє автоматизувати процес поливу, оптимізувати водно-повітряний режим ґрунту, зберегти та покращити його структуру, забезпечити найбільш сприятливе для рослин капілярне зволоження ґрунту. У результаті цього врожайність сільськогосподарських культур зростає на 35–40 % [25] за мінімальних затрат поливної води та ручної праці навіть порівняно з дощуванням.

За внутрішньогрунтового зрошення нерівності рельєфу долаються за рахунок п'єзометричного напору, тоді як за поверхневого зрошення – нерівномірність поливу є причиною засолення.

Таким чином, досліджуючи параметри систем внутрішньогрунтового зрошення можна досягти більш економного використання зрошувальної води, знизити вартість будівництва, витрати на експлуатацію, збільшити врожайність сільськогосподарських культур, тим самим підвищити економічну ефективність внутрішньогрунтового зрошення.

1.4 Аналіз конструкцій техніки, технічних засобів та систем для зрошення

Ефективність зрошення садів залежить не тільки від дотримання раціонального поливного режиму, але й від способу та техніки проведення поливу.

Суттєвим недоліком, що гальмує впровадження внутрішньогрунтового зрошення у виробництво, є слабка практична та теоретична розробка його прийомів, відсутність широкої експериментальної перевірки цього способу поливу.

Сучасні способи й техніка поливу повинні забезпечувати створення оптимальних умов для вирощування плодкових культур; сприяти збереженню структури ґрунту; проведенню поливів із мінімальними витратами зрошувальної води на одиницю площі; отриманню високих урожаїв із доброю якістю плодів; перешкоджати виникненню водної ерозії; механізувати та автоматизувати процес поливу; регулювати в певному діапазоні водний, поживний та повітряний режими ґрунту та рослин, підвищувати ступінь надійності та коефіцієнт корисної дії зрошувальних систем; зменшувати енергетичні витрати [16, 153].

У зв'язку з достатньо великими капіталовкладеннями в будівництво систем внутрішньогрунтового зрошення, необхідне подальше проведення досліджень, спрямованих на зменшення вартості цих систем та збільшення їхньої економічної ефективності шляхом удосконалення наявних конструкцій систем внутрішньогрунтового зрошення та методів розрахунку режиму та техніки поливу.

Основний конструктивний елемент, що визначає особливості системи внутрішньогрунтового зрошення, – зволожувачі, конструкція й матеріал яких можуть впливати на характер зволоження ґрунту та розмір витрат на будівництво. За способом налаштування підґрунтових зволожувачів розрізняють *підґрунтове зрошення по трубах*, виконаних

із різних матеріалів (керамічні труби, пустотіла цегла, черепиця, дошки та ін.), та по так званих *кратовинах*, нарізання яких здійснюється спеціальними механізмами, шляхом видавлювання в ґрунті циліндричної або іншої форми порожнини [40].

Найбільшого виробничого застосування зазнали трубчасті системи внутрішньогрунтового зрошення. Випробувано велику кількість різних видів труб – це гончарні та керамічні з виходом води у стиках, через отвори, щілини в стінках труб, бетонні, піщано-бітумні, із толю та ін.

Уже з минулого сторіччя застосовується підґрунтове зрошення по гончарних та керамічних трубах з випусканням води через стики. Найчастіше застосовувались гончарні труби довжиною 333 та 500 мм із внутрішнім діаметром 50 та 75 мм. Для запобігання деформацій труб та замулювання останніх стики прикривають гончарними муфтами або обгортають стрічкою поліетиленової плівки.

Використання гончарних трубок дозволяє виконувати зволожувачі довжиною до 300 м за оптимальних уклонів 0,001...0,0005. Величина тиску в голові зволожувача не повинна перевищувати глибину вкладання останнього більше, ніж на 0,1...0,15 м.

Ураховуючи значну трудомісткість при вкладанні зволожувачів, великі втрати води на фільтрацію, гончарні труби вкладаються стиком до стика на жолоб із поліетиленової плівки, а зверху прикриваються іншою плівкою рівної ширини [24].

Останнім часом переваги надаються трубам із полімерних матеріалів – поліетиленовим та поліхлорвініловим з виходом води через перфорації та щілини. Це пов'язано з тим, що будівництво системи внутрішньогрунтового зрошення при цьому значно дешевше і вкладання труб може бути повністю механізоване. Гончарні труби достатньо міцні. Не підлягають корозії, мають незначну вартість, однак значна їхня маса, складність механізованого вкладання, розбивання при транспортуванні

стримують виробниче впровадження систем внутрішньогрунтового зрошення з такими зволожувачами.

Поліетиленові ж труби мають малу масу, еластичність, високу механічну міцність та хімічну стійкість. Будівельні витрати за безтраншейного вкладання поліетиленових труб скорочуються на 60–80 % [30]. Виконання різних перфорацій у таких трубах дозволяє зменшити замулення та заростання корінням рослин внутрішньої порожнини зволожувачів.

При використанні суцільнотягнутих труб у якості зволожувачів спростився процес будівництва ділянок внутрішньогрунтового зволоження, особливо із застосуванням безтраншейних трубоукладачів. Відпадає одна з найбільш трудомістких робіт – виконання стиків труб, немає небезпеки зміщення стиків у траншеї та виходу з ладу зволожувачів. І як наслідок – збільшується надійність в експлуатації ділянок внутрішньогрунтового зрошення.

Укладання труб у ґрунтах може здійснюватися *траншейним, вузькотраншейним та безтраншейним способами.*

Траншейний та вузькотраншейний способи укладання труб характеризуються значним обсягом робіт, виносом мінерального ґрунту на денну поверхню та змішуванням останнього з гумусним шаром при засипці траншеї. Крім того, конструкція сучасних траншейних трубоукладачів характеризується наявністю значної кількості кінематичних зв'язків, що при роботі в умовах абразивного середовища призводить до частих поломок. Такі трубоукладачі втрачають працездатність на пластичних липких ґрунтах.

Глибину закладання трубчастих зволожувачів рекомендується витримувати в межах 0,45...0,5 м, тому що під час механізованого обробітку ґрунту можливе пошкодження останніх сільськогосподарським знаряддям і машинами.

Проектування та будівництво систем внутрішньогрунтового зрошення з трубчастими зволожувачами може здійснюватися за нахилів від 0,0001 до 0,001 та більших. Ділянки перед укладанням зволожувальної мережі повинні підлягати обов'язковому плануванню [24].

Тобто, застосування поліетиленових труб у меліоративній практиці сприяло б розширенню та поглибленню робіт у галузі внутрішньогрунтового зрошення.

Найбільш широкі дослідження внутрішньогрунтового зрошення проведені в Узбекистані (в Голодному Степу). Поліетиленові трубки-зволожувачі закладали як за допомогою вузькотраншейного екскаватора, так і безтраншейним способом. Застосовували трубки з діаметром від 38 до 16 мм з перфорацією діаметром 1,5...2 мм та відстанню між зволожувачами від 0,9 до 1,8 м.

Схил уздовж зволожувачів довжиною до 200 м дорівнював 0,002–0,01.

У закордонних джерелах описані переважно тимчасові досліді, де вивчався зв'язок різних конструкцій зволожувачів з урожаєм та витратами води. Випробовувались пластмасові трубки малого діаметру з колотою та висвердленою перфорацією, а також зі щілинними випусками води. Пізніше перфорацію стали захищати спеціальним козирком, пружинними клапанами, що відкриваються лише на час поливу. Застосування еластомірів для виготовлення трубок дозволило виконувати щілинні отвори, що перекриваються самі за рахунок еластичності матеріалу без допомоги пружин. Принцип їхньої дії оснований на розкритті щілин під час зниження тиску у зволожувачі та закритті при підвищенні тиску.

Є багато інших рішень для вирівнювання роздачі води за довжиною трубок-зволожувачів: застосування азбестових чи нейлонових гнотів, зміна щільності волокон за довжиною трубки. Для захисту перфорації від

забивання застосовують також пластмасові насадки, якими оснащуються зволожувачі при вкладанні в ґрунт. Як правило, для вкладання зволожувачів застосовують безтраншейний спосіб, у тому числі модифіковані сільськогосподарські знаряддя.

Підґрунтове зрошення по кротовинах є найбільш дешевим і доступним. За цього способу поливу зволожувачі мають вигляд «земляних труб», що називаються штучними з добре вираженою капілярністю. Широке впровадження у виробництво такого зрошення стримується через короткий термін служби. Для зменшення проникнення води в глибокі шари ґрунту (особливо на ґрунтах з високою фільтрацією) та кращого розповсюдження її в горизонтальному напрямку на трубчастих системах внутрішньогрунтового зрошення встановлюють різні протифільтраційні екрани, виконані з поліетиленової плівки, руберойду, скловати та ін. [3].

Німецькими дослідниками були поставлені широкі дослідження з підґрунтовим зрошенням за методом Нідервеммера [90].

Запропонована Нідервеммером система внутрішньогрунтового зрошення для умов аридної зони західної частини Туреччини на бавовнику (середземноморське узбережжя) досить дороговартісна, однак експлуатаційні витрати у 3,4 рази менші, ніж при дощуванні.

Найкращі результати підґрунтове зрошення давало при вкладанні плівкового екрану на глибині 0,8 м, на якому розміщували поліетиленовий трубопровід малого діаметру через 3 м. Відзначено, що плівковий екран шириною 2 м обмежував накопичення зимово-весняної вологи у період дощів, тому поливи треба були починати раніше. Наявність фільтру з пошарово переробленого ґрунту (спочатку на екран потрапляють крупні фракції, потім середні та дрібні) створює сприятливі умови для бокового розподілу води вздовж стрічки шириною 2...4 м.

Учені С. В. Кравець, О. Л. Романовський, М. Д. Каслін, В. М. Супонєв [56, 70–73, 120–122, 135] підтвердили доцільність прокладання підземних комунікацій *безтраншейним* способом. Він позбавлює від недоліків, які властиві траншейному та вузькотраншейному способам та знижує собівартість будівництва на 12 % [7].

Основні переваги безтраншейного способу прокладання підземних комунікацій [135. 73]:

- висока робоча швидкість прокладання (до 5 км/год), а з нею й продуктивність праці;
- зменшення обсягу земляних робіт у 3–5 разів за рахунок суміщення процесів формування щілини, подачі і укладання труби та закриття щілини;
- збереження гумусного шару на поверхні ґрунту та, відповідно, мінімізація техногенного впливу на навколишнє середовище;
- можливість використання у зсувних ґрунтах, а також в ґрунтах з високим рівнем ґрунтових вод.

Аналіз патентної та науково-технічної літератури показав, що існує низка технічних рішень, спрямованих на виконання операцій з укладання трубопроводів безтраншейним способом, який базується на принципі вертикального заглиблення гнучких трубопроводів [104].

Відомі методи безтраншейного прокладання інженерних комунікацій – горизонтальне проходження в ґрунтах та протягування в утворену свердловину окремих модулів труб або гілок трубопроводів.

Проходження горизонтальних (похилених) свердловин, а також вертикальних стовбурів та протягування в них трубопроводів можуть проводитися такими методами: горизонтальне (похилене) спрямоване буріння (у тому числі шнекове), прокладання мікротунелів, ударно-імпульсне проштовхування, розкатка свердловин.

Розкатка свердловин – це безперервний процес утворення в ґрунті циліндричної порожнини шляхом деформації та ущільнення ґрунту розкатником (рис. 1.1) [111].

Перевагою методу розкатки порівняно з горизонтальним (похиленим) спрямованим бурінням є відсутність необхідності використання пересувних насосних установок (для подачі води до бурового інструменту) або компресора (для подачі стисненого повітря до пневмопробійника). Крім того, при використанні розкатників повністю виключається просадка ґрунту на поверхні.

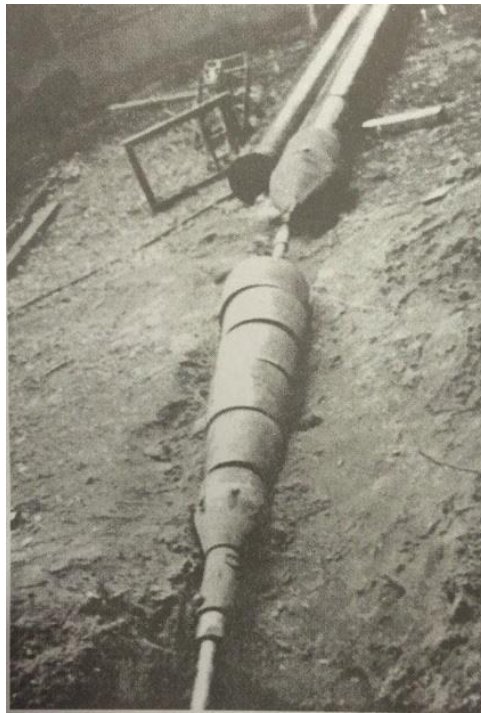


Рис. 1.1 Розкатник свердловин РТ-470 із закріпленою у хвостовій частині трубою для протягування в горизонтальну свердловину

Саме на основі цього методу в сільському господарстві використовується підґрунтове зрошення по кротовинах, яке є найбільш дешевим та доступним.

Відомими є технічні рішення, спрямовані на розробку конструкцій робочих органів для здійснення багатоярусного роздроблення ґрунту [19, 103, 104], що характеризується найменшою енергоємністю.

Також відомі ножові укладачі кабеля та труб [104], робота яких базується на принципі розрізання ґрунту.

Для прокладання пластмасових трубопроводів використовують укладачі на базі колісних та гусеничних тракторів. За типом базового шасі можна використовувати начіпні, напівнавісні та навісні трубоукладачі [71].

Так наприклад, трубоукладач STR 150 (рис. 1.2) (Австралія) укладає зрошувальні трубопроводи діаметром до 70 мм на глибину до 0,6 м.

Робоче обладнання включає вертикальний розрізний ніж із незагостреною різальною кромкою та долотоподібний ніж, а також трубоспрямовувальний пристрій для подачі труб.



а



б

Рис. 1.2 Трубоукладач STR 150: а – робоче обладнання трубоукладача; б– трубоукладач STR 150 у робочому положенні

Трубоукладач Caterpillar (США) на базі гусеничного трактора Caterpillar D6H (рис. 1.3) виконаний у вигляді ножа-розпушувача з

шарнірно закріпленим трубоспрямовуючим пристроєм для подачі трубопроводу діаметром до 70 мм [112]. Глибина укладання труб до 0,6 м.



а



б

Рис. 1.3 Трубоукладач Caterpillar D6H: а – робоче обладнання трубоукладача; б - трубоукладач Caterpillar D6H у робочому положенні

В укладачах труб КУ – 25 та КУ – 120 у якості робочого обладнання використовують долотоподібні ножі. Ці укладачі призначені для безтраншейного укладання поліетиленових труб завтовшки 35–75 мм на глибину 1,2 м з одночасним прокладанням контрольної стрічки [113].

Тобто робочі органи безтраншейних укладачів труб мають просту конструкцію, високу надійність і досить невисоку вартість. Порівняно з траншейними, їхня питома енергоємність менша на 15–20 %, а питома металоємність – на 40–50 % [135], що суттєво збільшує можливості застосування безтраншейного способу укладання труб для зрошення.

1.5 Висновки. Мета та завдання досліджень

У результаті проведеного аналізу можна зробити висновок про те, що найбільш перспективним способом зрошення плодових насаджень та виноградників варто вважати підґрунтове зрошення.

У якості зволожувачів рекомендуються тонкостінні гофровані труби діаметром 25...50 мм із перфорацією в западинах гофра; діаметр отворів – не більший за 1 мм, кількість отворів від 100 до 600 на метрі; діаметр трубок-зволожувачів – постійний за всією довжиною.

Обов'язковою умовою є захист перфорації шляхом обертання трубки рулонним матеріалом, що не гниє (капрон, склотканина, поліетиленова плівка або їхня комбінація).

Усі розглянуті способи укладання труб не дозволяють досягнути оптимальних умов для збереження та розповсюдження вологи за внутрішньогрунтового зрошення сільськогосподарських рослин.

Найбільш прийнятним для цього є безтраншейний спосіб укладання труб-зволожувачів, який базується на принципі вертикального заглиблення гнучких трубопроводів у ґрунт. При цьому для утворення кротовин використовують робочі органи різної геометричної форми та розмірів.

Однак розглянутий спосіб не дозволяє укласти протифільтраційний екран разом із зволожувачем. У зв'язку з цим, дослідження потрібно спрямувати на обґрунтування геометричних параметрів і режимів роботи робочого органу для утворення кротовини, розробку способу та технічного рішення безтраншейного укладання зволожувачів сумісно з протифільтраційним екраном.

У зв'язку з цим сформульовані мета та завдання досліджень.

Мета роботи: розробка та оптимізація параметрів і режимів роботи пристрою для прокладання зрошувачів із протифільтраційним екраном для підтримки вологості і розподілу її в горизонтальному напрямку в ґрунті при поливі плодкових насаджень.

Предмет роботи: взаємозв'язки параметрів і режимів роботи пристрою для прокладання зрошувача з властивостями ґрунту.

Об'єкт досліджень: процес взаємодії з ґрунтом робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном.

Завдання:

– виконати аналіз сучасного стану та перспектив розвитку відомих способів і технічних засобів, параметрів і режимів їхньої роботи для зрошення сільськогосподарських культур;

– вивчити закономірності пересування та розподілу вологи в активному шарі ґрунту за внутрішньогрунтового зрошення;

– виконати аналіз взаємодії робочого органу для утворення порожнини в ґрунті для безтраншейного укладання зрошувача з протифільтраційним екраном;

– проаналізувати ущільнення стінок порожнини при взаємодії з ґрунтом робочого органу;

– виконати аналіз енергоємності процесу утворення порожнини в ґрунті та одночасного протягування труби зрошувача з протифільтраційним екраном;

– виконати аналіз стійкості склепіння порожнини, утвореної робочим органом в ґрунті;

– експериментально підтвердити адекватність отриманих теоретичних залежностей.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ РОБОЧОГО ОРГАНУ ДЛЯ УКЛАДАННЯ ЗРОШУВАЧІВ

2.1 Опис процесу укладання зрошувальної труби з протифільтраційним екраном

У зоні витікання води зі зрошувача ґрунт отримує повне вологонасичення внаслідок інтенсивного надходження в нього зрошувальної води. Результатом цього є процес фільтрації, який супроводжується інтенсивним перенесенням води в нижні шари ґрунту. При цьому процес дифузійного переносу вологи від більш вологих ділянок до більш сухих зменшується. Це призводить до суттєвого зменшення зони зволоження в напрямку, перпендикулярному до осі зрошувальної труби й паралельному до поверхні поля. Для запобігання інтенсивного фільтраційного процесу в зоні витікання поливної води застосовується протифільтраційний екран, який дозволяє знизити фільтраційні процеси та збільшити зону витікання поливної води в напрямку, поперечному до напрямку укладання зрошувальної труби й вирівняти зону витікання води між отворами зрошувача.

Схема такого укладання зрошувача наведена на рис. 2.1.

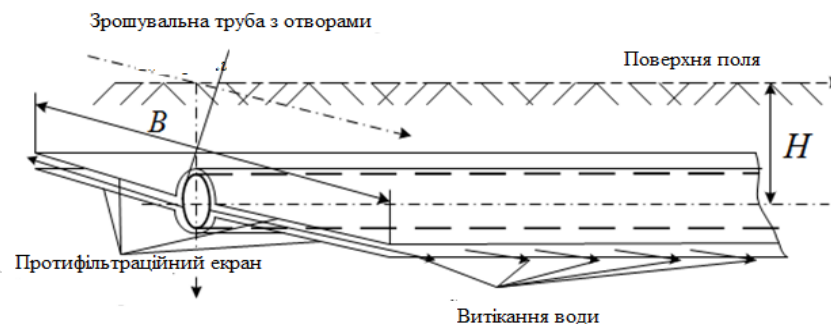


Рис. 2.1 Схема укладання зрошувальної труби з протифільтраційним екраном

2.2 Аналіз процесу утворення кротовин для укладання зволожувача з протифільтраційним екраном

У багатьох процесах, пов'язаних зі зміною механічних властивостей ґрунту при будівництві іригаційних та інженерних споруджень, виникають задачі про утворення дрен в середині ґрунтового горизонту. При цьому використовують робочі органи різної геометричної форми та розмірів. Зокрема, для прокладання дренажних (зрошувальних) трубопроводів або кабелю методом протяжки виникає необхідність утворення порожнини (з метою зниження опору тертя протягування), у якій протягується комунікація. Тому обґрунтування геометричних параметрів і режимів роботи робочого органу для утворення цієї порожнини є актуальним науковим завданням.

Аналізуючи стан досліджень взаємодії робочих органів із ґрунтом, варто відзначити існування двох складових цього питання. Перша належить до формалізації самого ґрунту як середовища, на яке спрямована дія робочого органу, а інша складова – до формалізації взаємодії самого робочого органу з ґрунтом і впливає зі способу формалізації ґрунту та, отже, можливості самої схеми формалізації взаємодії.

Відносно першого питання слід відзначити, що за останнє десятиріччя суттєвих змін у формалізації ґрунту не відбулося. Тому за формою представлення моделі побудови ґрунту всі роботи, що стосуються взаємодії з ним робочих органів, можна розділити на п'ять груп: 1) тверде тіло; 2) суцільне пружне середовище; 3) суцільне нестискуване сипуче середовище; 4) суцільне пружно-в'язко-пластичне середовище; 5) формалізація методами теорії подібності та розмірностей [5; 15; 34; 42; 68; 77]. Виходячи з цього, частіше за все використовують моделі, що більше нагадують взаємодію з абсолютно твердим тілом, або моделі, що використовуються в класичній теорії механіки ґрунтів, які

базуються на механіці сипучих середовищ [130]. Крім того, при побудові моделей взаємодії частіше за все використовують або одномірні моделі, або у кращому випадку плоскі рішення, які не завжди відображають реальний процес змін властивостей ґрунту під дією робочого органу [75, 77].

При цьому варто відзначити, що щільність ґрунту під дією робочого органу змінюється у функції всіх шести компонентів деформацій або напружень, що не можна відобразити у плоскій постановці завдання, а тим більше – в одномірній. Крім того, такі постановки завдання не дозволяють визначити всіх трьох складових опору рухові робочого органу в ґрунті. Тому рішення задачі про взаємодію робочого органу з ґрунтом у трьохмірній постановці з встановленням взаємозв'язку геометричних параметрів і режимів роботи самого робочого органу зі зміною властивостей ґрунту, а також компонентів тягового опору є актуальним завданням, яка потребує розв'язку.

Варто відзначити, що найбільш адекватним методом формалізації ґрунту, який можна використати для розв'язання задач про знаходження раціональних геометричних форм та режимів руху робочих органів, є метод, коли ґрунт можна представити у вигляді суцільного деформівного середовища з проявом таких властивостей, як пружність, в'язкість та пластичність [52, 60, 75, 77].

При цьому під час розв'язання контактних задач взаємодії робочих органів із ґрунтом за такої формалізації найчастіше буває достатньо розв'язати задачу у пружній (мала швидкість руху робочого органу) або в'язко-пружній постановці. Такі розв'язки дозволяють використовувати аналітичні методи знаходження компонент деформацій, напружень, складових сил опору рухові робочого органу та визначати напрямок змін щільності ґрунту або навіть самі її зміни. Тобто, розв'язання задачі до

настання пластичності або руйнування суцільності ґрунту дозволяє прогнозувати розвиток подальших процесів зміни її властивостей залежно від геометричних параметрів і режимів руху робочого органу.

У зв'язку з цим, необхідно визначити швидкості відносних деформацій у зоні контакту конусного наконечника робочого органу для утворення кротовин та його лемішної частини з ґрунтом залежно від геометричних та кінематичних параметрів самого робочого органу, а також встановити функції зміни щільності ґрунту та складових сил опору рухові робочого органу залежно від його геометричних параметрів, швидкості руху та механічних властивостей ґрунту.

2.3 Аналіз ущільнення ґрунту конусним наконечником робочого органу для утворення кротовин

У найбільш загальному випадку геометричні параметри та режими роботи робочого органу можуть бути представлені у вигляді схеми, наведеної на рис. 2.2.

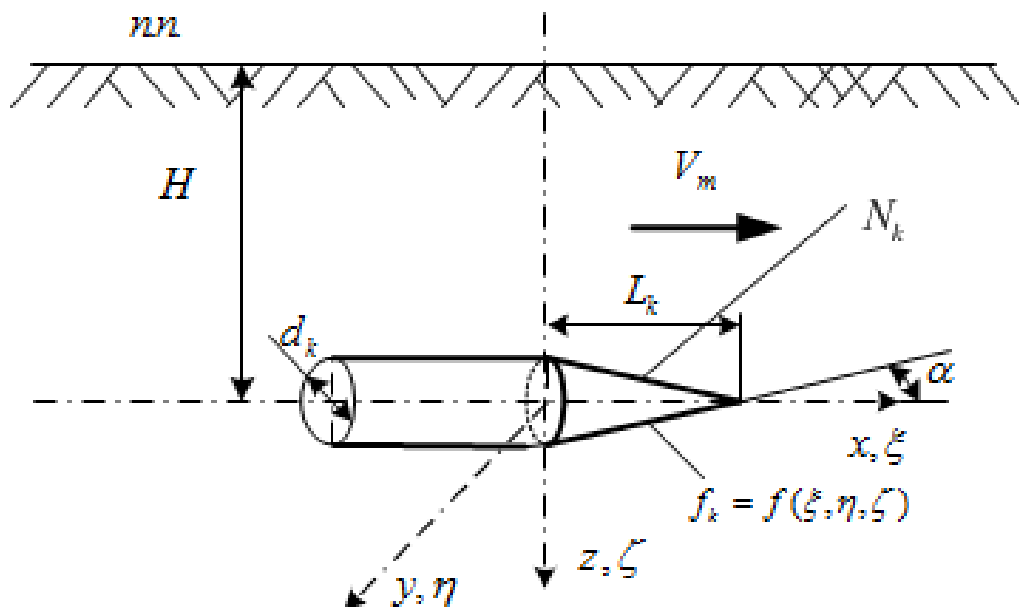


Рис. 2.2 Схема конусного робочого органу для утворення кротовини

Розглянемо роботу конусної частини робочого органу.

Робочий орган представлений складеним тілом, що складається з конусної частини, яка переходить у циліндричну. Основна робоча частина, яка взаємодіє з ґрунтом, – це конусна частина. Робочий орган рухається в напрямку осі ox на глибині H від поверхні ґрунту зі швидкістю V_m .

Форма поверхні конуса в системі координат ξ, η, ζ , яка співпадає із системою координат ґрунту x, y, z , може бути представлена рівнянням для дійсного конуса в неявному вигляді:

$$f_k = -\frac{\xi^2}{a^2} + \frac{\eta^2}{b^2} + \frac{\zeta^2}{c^2} = 0$$

Для випадку прямолінійної твірної та осьової симетрії відносно осі $o\xi$ коефіцієнти $a = b = r$, а коефіцієнт $a = \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha}$, де α – кут нахилу твірної до осі $o\xi$.

У цьому випадку, з урахуванням зміщення вістря конуса на величину L_k , рівняння конусу матиме вигляд:

$$-\frac{(L_k - \xi)^2}{r^2} + \frac{\eta^2 + \zeta^2}{a^2} = 0.$$

Рівняння координат поверхні конуса виражаться залежностями:

$$\xi = \frac{a^2 L_k \pm \sqrt{a^2 r^2 \zeta^2 + a^2 r^2 \eta^2}}{a^2},$$

$$\eta = \pm \frac{\sqrt{a^2 L_k^2 - r^2 \zeta^2 - 2a^2 L_k \xi + a^2 \xi^2}}{r},$$

$$\zeta = \pm \frac{\sqrt{a^2 L_k^2 - r^2 \eta^2 - 2a^2 L_k \xi + a^2 \xi^2}}{r},$$

де r – радіус основи конуса.

Косинуси кутів нахилу нормалі до поверхні конуса до осей координат $o\xi$, $o\eta$, $o\zeta$ виразяться залежностями:

$$l_k = \frac{\partial f_k / \partial \xi}{\sqrt{(\partial f_k / \partial \xi)^2 + (\partial f_k / \partial \eta)^2 + (\partial f_k / \partial \zeta)^2}},$$

$$m_k = \frac{\partial f_k / \partial \eta}{\sqrt{(\partial f_k / \partial \xi)^2 + (\partial f_k / \partial \eta)^2 + (\partial f_k / \partial \zeta)^2}},$$

$$n_k = \frac{\partial f_k / \partial \zeta}{\sqrt{(\partial f_k / \partial \xi)^2 + (\partial f_k / \partial \eta)^2 + (\partial f_k / \partial \zeta)^2}}.$$

Далі, якщо спроектувати швидкість поступального руху V_m на нормаль до поверхні конуса і далі цю нормальну складову спроектувати на осі координат $o\xi$, $o\eta$, $o\zeta$, то можна отримати компоненти швидкостей переміщень на осі координат у вигляді:

$$u_{k0} = V_m; v_{k0} = \frac{r^2 V_m \eta}{a^2 (L_k - \xi)}; w_{k0} = \frac{r^2 V_m \zeta}{a^2 (L_k - \xi)}$$

Ці вирази будуть вихідними для розв'язку контактної задачі взаємодії конуса з ґрунтом у кінематичній постановці.

Аналітичні рішення для контактних задач можливі лише в пружній або пружно-в'язкій постановці. Причому, ці рішення допускаються лише для випадку, коли при послідовних підстановках геометричних рівнянь у фізичні рівняння зв'язку напружень із деформаціями та подальшої підстановки отриманих компонент напружень у рівняння статки (динаміки) суцільного середовища будуть отримані рівняння еліптичного типу. У такому випадку рішення може бути знайдене за використання бігармонічних потенціальних функцій, які задовольняють умови на поверхні контакту тіла (система координат ξ, η, ζ) та середовища, з яким воно взаємодіє (система координат x, y, z), тобто при

$x - \xi = 0, y - \eta = 0, z - \zeta = 0$ компоненти швидкостей (переміщень) дорівнюють їхнім початковим значенням.

Для нашого випадку це означає, що компоненти швидкостей для конуса мають вигляд:

$$\begin{aligned} u_k \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} &= u_{k0}, \\ v_k \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} &= v_{k0}, \\ w_k \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} &= w_{k0}. \end{aligned}$$

Друга умова, яку повинні задовольняти бігармонічні потенціальні функції, має вигляд:

$$\begin{aligned} u_k \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} &\rightarrow 0, \\ v_k \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} &\rightarrow 0, \\ w_k \Big|_{x-\xi=\infty, y-\eta=\infty, z-\zeta=\infty} &\rightarrow 0. \end{aligned}$$

Такі бігармонічні потенціальні функції, згідно з О. І Лур'є [82], мають вигляд:

$$\begin{aligned} u_k &= \int_{\eta_{k0}}^{\eta_{kk}} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \frac{a_0 u_{k0} (x - \xi_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_i + \delta)^2)^{3/2}} d\zeta_k d\eta_k; \\ v_k &= \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \int_{\xi_{k0}}^{\xi_{kk}} \frac{a_0 v_{k0} (y - \eta_i + \delta)}{((x - \xi_i + \delta)^2 + (y - \eta_i + \delta)^2 + (z - \zeta_i + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_k d\zeta_k; \\ w_k &= \int_{\eta_{k0}}^{\eta_{kk}} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \frac{a_0 w_k (z - \zeta_i + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_i + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_k d\eta_k, \end{aligned} \tag{2.1}$$

де $\xi_{k0}, \eta_{k0}, \zeta_{k0}, \xi_{kk}, \eta_{kk}, \zeta_{kk}$ – початкові та кінцеві значення координат конуса; $a_0 = \frac{1}{\pi} \frac{4}{\text{Log}[-\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}] - \text{Log}[\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}]}$ – коефіцієнт, що

забезпечує виконання початкових умов за введення малої величини δ , яка усуває сингулярність виразів (2.1).

Бігармонічні потенціальні функції повинні задовольняти рівняння $\Delta^2 f = 0$, де Δ – оператор Лапласа, а $f = \{u_k, v_k, w_k\}$ (рис. 2.3).

У зв'язку зі складністю інтегрування рівнянь (2.1), які є компонентами швидкостей переміщень ґрунту у просторі перед робочим органом у загальному вигляді, можна розв'язати задачу про знаходження розповсюдження швидкостей переміщень, швидкостей відносних деформацій та компонент напружень у диференціальному вигляді, як це було запропоновано в [60, 64].

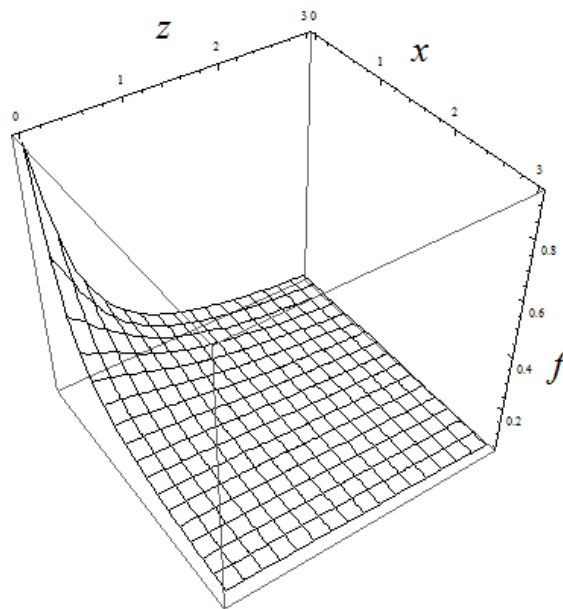


Рис. 2.3 Графічне представлення виду функцій (2.1)

Суть методу полягає в тому, що для знаходження компонентів швидкостей деформацій передбачається диференціювання рівнянь (2.1)

згідно з геометричним рівнянням (рівнянням Коші) теорії суцільних середовищ.

Для цього можна перетворити рівняння (2.1) таким чином, у результаті чого будуть отримані компоненти диференціальних складових du_k, dv_k, dw_k компонентів швидкостей зсуву ґрунту перед робочим органом.

$$\begin{aligned} du_k &= \frac{d^2}{d\eta_k d\zeta_k} \int_{\eta_{k0}}^{\eta_{kk}} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \frac{a_0 u_{k0} (x - \xi_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} d\zeta_k d\eta_k = \\ &= \frac{a_0 u_{k0} (x - \xi_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} = \\ &= \frac{a_0 V_m (x + \delta - \xi_k)}{((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{3/2}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dv_k &= \frac{d^2}{d\zeta_k d\xi_k} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \int_{\xi_{k0}}^{\xi_{kk}} \frac{a_0 v_{k0} (y - \eta_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_k d\zeta_k = \\ &= \frac{a_0 v_{k0} (y - \eta_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} = \\ &= \frac{a_0 r^2 V_m (y + \delta - \eta) \eta}{a^2 ((z + \delta - \zeta)^2 + (y + \delta - \eta)^2 + (x + \delta - \xi)^2)^{3/2} (Lk - \xi)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dw_k &= \frac{d^2}{d\eta_k d\zeta_k} \int_{\eta_{k0}}^{\eta_{kk}} \int_{\zeta_{k0}}^{\zeta_{kk}} \frac{a_0 w_k (z - \zeta_i + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} d\zeta_k d\eta_k = \\ &= \frac{a_0 w_k (z - \zeta_k + \delta)}{((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_k + \delta)^2)^{3/2}} = \\ &= \frac{a_0 r^2 V_m (z + \delta - \zeta_k) \zeta_k}{a^2 ((x - \xi_k + \delta)^2 + (y - \eta_k + \delta)^2 + (z - \zeta_i + \delta)^2)^{3/2} (Lk - \xi_k)}. \end{aligned} \tag{2.2}$$

Із рівнянь (2.2) можна отримати диференціальні компоненти швидкостей деформацій ґрунту, використовуючи геометричні рівняння (рівняння Коші):

$$d\dot{\Gamma}_{xk} = \frac{d}{dx} du_k = \frac{a_0 V_m ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 - 2(x + \delta - \xi_k)^2)}{((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2}};$$

$$d\dot{\Gamma}_{yk} = \frac{d}{dy} dv_k = \frac{a_0 r^2 V_m \eta_k ((z + \delta - \zeta_k)^2 - 2(y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (L_k - \xi_k)};$$

$$d\dot{\Gamma}_{zk} = \frac{d}{dz} dw_k = \frac{a_0 r^2 V_m \zeta_k (-2(z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (L_k - \xi_k)};$$

(2.3)

$$d\dot{\gamma}_{xyk} = \frac{d}{dy} du_k + \frac{d}{dx} dv_k = \frac{3a_0 V_m (y + \delta - \eta_k)(r^2 \eta_k + a^2 (L_k - \xi_k))(x + \delta - \xi_k)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (-L_k + \xi_k)};$$

$$d\dot{\gamma}_{xzk} = \frac{d}{dz} du_k + \frac{d}{dx} dw_k = \frac{3a_0 V_m (z + \delta - \zeta_k)(r^2 \zeta_k + a^2 (L_k - \xi_k))(x + \delta - \xi_k)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (-L_k + \xi_k)};$$

$$d\dot{\gamma}_{yzk} = \frac{d}{dz} dv_k + \frac{d}{dy} dw_k = \frac{3a_0 r^2 V_m (z + \delta - \zeta_k)(y + \delta - \eta_k)(\zeta_k + \eta_k)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (-L_k + \xi_k)};$$

де $d\dot{\Gamma}_{xk}, d\dot{\Gamma}_{yk}, d\dot{\Gamma}_{zk}, d\dot{\gamma}_{xyk}, d\dot{\gamma}_{xzk}, d\dot{\gamma}_{yzk}$ – компоненти диференціальних складових відносних нормальних деформацій та деформацій зсуву ґрунту перед конусним робочим органом.

Для розуміння характеру дії робочого органу в зоні безпосереднього контакту з ґрунтом, а саме його геометричних форм та розмірів, на зміни компонентів відносних деформацій вирази (2.3) можна проінтегрувати відповідно до виразів (2.1), враховуючи те, що аналізу

підлягає зона безпосереднього контакту, а саме умови: $\{\zeta_k - z = 0, \eta_k - y = 0, \xi_k - x = 0\}$.

Це суттєво спрощує вирази (2.3). На жаль, у розгорнутому вигляді подати кінцеві вирази компонентів швидкостей деформацій $\dot{T}_{xk}, \dot{T}_{yk}, \dot{T}_{zk}, \dot{\gamma}_{xyk}, \dot{\gamma}_{xzk}, \dot{\gamma}_{yzk}$ не є можливим через громіздкість кінцевих виразів. Графічна інтерпретація цих виразів представлена на рис. 2.4 – 2.5.

Унаслідок симетрії конуса відносно осі $O\xi$ компонента швидкостей нормальної деформації \dot{T}_{zk} аналогічна \dot{T}_{yk} .

Аналогічно, внаслідок симетрії конуса відносно осі $O\xi$ компонента швидкостей деформації зсуву $\dot{\gamma}_{xyk}$ аналогічна $\dot{\gamma}_{xzk}$.

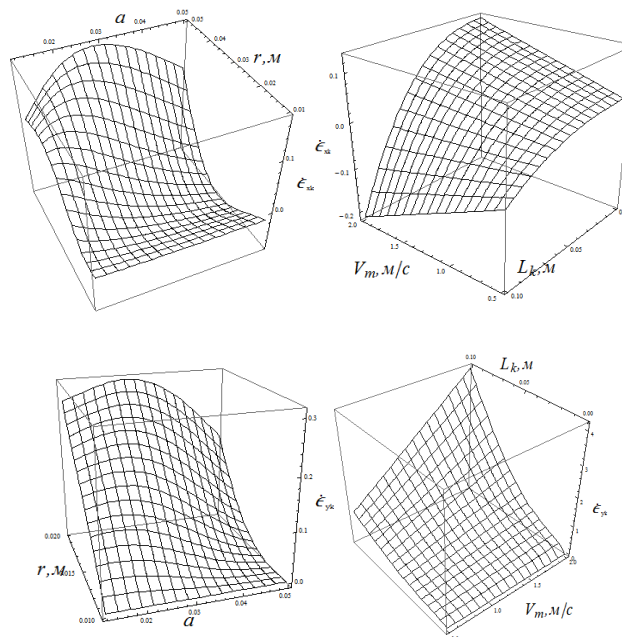


Рис. 2.4 Графіки змін компонентів швидкостей нормальних деформацій $\dot{T}_{xk}, \dot{T}_{yk}$ залежно від гостроти конуса a , винесення вістря L_k , радіуса основи r та швидкості його переміщення в ґрунті V_m

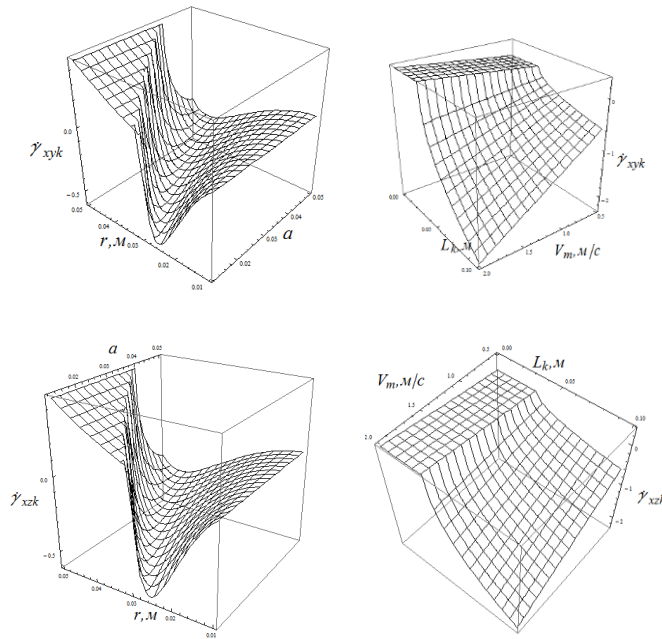


Рис. 2.5 Графіки змін компонент швидкостей деформацій зсуву $\dot{\gamma}_{xyk}, \dot{\gamma}_{xzk}$ залежно від гостроти конуса a , винесення вістря L_k , радіуса основи r та швидкості його переміщення в ґрунті V_m .

Аналіз поздовжніх нормальних швидкостей деформацій \dot{T}_{xk} ґрунту під дією конусного робочого органу свідчить про те, що зі збільшенням радіусу r основи конуса швидкість деформації зростає, при цьому зменшення гостроти конуса a призводить спочатку до зростання швидкості деформації до значення $\dot{T}_{xk} = 0.03$, а подальше зменшення гостроти призводить до зменшення швидкості деформації, причому це виявляється більшою мірою при збільшенні радіуса основи.

Швидкість V_m руху конуса не здійснює істотного впливу на швидкість нормальної компоненти деформацій \dot{T}_{xk} , у той час як винесення вістря конуса L_k наперед по осі від точки, в якій аналізується компонент деформації, призводить до зниження цього компонента швидкості деформації.

Аналіз поперечних компонентів нормальних швидкостей деформацій $\dot{T}_{yk}, \dot{T}_{zk}$ ґрунту під дією конусного робочого органу свідчить про те, що зі збільшенням радіусу r основи конуса (аналогічно поздовжньому компоненту) швидкість деформації зростає, при цьому зменшення гостроти конуса a призводить спочатку до зростання швидкості деформації до значення $\dot{T}_{yk}, \dot{T}_{zk} = 0.03$, а подальше зменшення гостроти призводить до зменшення швидкості деформації, причому це виявляється більшою мірою при збільшенні радіуса основи.

Швидкість V_m руху конуса не робить істотного впливу на швидкість нормального компонента деформацій \dot{T}_{xk} за наявності виносу вістря конуса від перерізу, що розглядається. Винесення вістря конуса L_k наперед по осі від точки, у якій аналізується компонент деформації, призводить до суттєвого збільшення компонентів поперечних швидкостей деформацій $\dot{T}_{yk}, \dot{T}_{zk}$.

Переходячи до аналізу складових швидкостей деформацій зсуву в поздовжньо-поперечній $\dot{\gamma}_{xyk}$ та поздовжньо-вертикальній $\dot{\gamma}_{xzk}$ площинах, варто відзначити, що збільшення радіусу основи до $r = 0.03$ м спричинює зниження швидкостей цих деформацій у перерізі, що розглядається; подальше збільшення радіуса основи призводить до зростання швидкостей цих деформацій.

У той самий час затуплення конуса спричинює зростання деформацій у поздовжньо-поперечній $\dot{\gamma}_{xyk}$ та поздовжньо-вертикальній $\dot{\gamma}_{xzk}$ площинах лише за великих значень радіуса основи конуса. Швидкості деформацій у поздовжньо-поперечній $\dot{\gamma}_{xyk}$ та поздовжньо-вертикальній $\dot{\gamma}_{xzk}$ площинах зростають як зі збільшенням швидкості V_m пересування конуса, так і зі збільшенням винесення L_k вістря відносно перерізу, що розглядається.

Аналогічна картина характерна для швидкості деформації зсуву у поперечно-вертикальній площині $\dot{\gamma}_{yzk}$.

Що стосується цієї швидкості залежно від радіуса r основи конуса та його гостроти, яку характеризує величина a , то варто відзначити, що існує явно виражений максимум швидкості деформації $\dot{\gamma}_{yzk}$, який залежить від співвідношень факторів r та a .

При розв'язанні задачі про взаємодію робочого органу для утворення кротовини з ґрунтом була прийнята модель ґрунту у вигляді в'язко-пружного середовища, яке може бути формалізоване моделлю Кельвіна-Фойгта. Механічна модель такого середовища наведена на рис. 2.6.

Згідно з цією моделлю, внаслідок прикладення навантаження відбувається в'язко-пружне деформування матеріалу, за якого зі збільшенням швидкості прикладення навантаження швидкість деформації знижується пропорційно коефіцієнту в'язкості. При виведенні рівнянь зв'язку напружень зі швидкостями деформування необхідно підсумувати девіаторні складові напружень пружного та в'язкого деформування.

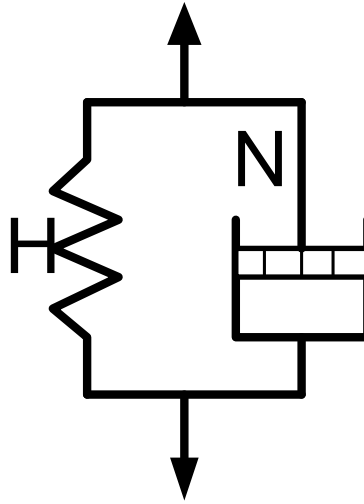


Рис. 2.6 Механічна модель в'язко-пружного середовища (ґрунту)

Лінійно пружне середовище описується узагальненим законом Гука.

Компоненти дівіаторної складової закону Гука можна представити залежностями:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_x - \varepsilon); \\ \sigma_y &= 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_y - \varepsilon); \\ \sigma_z &= 3K\varepsilon + 2G(\varepsilon_z - \varepsilon); \\ \tau_{xy} &= G\gamma_{xy}; \tau_{xz} = G\gamma_{xz}; \tau_{yz} = G\gamma_{yz},\end{aligned}\quad (2.4)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненти нормальних деформацій та деформацій зсуву, K – об'ємний модуль пружності, $K = E/(3(1 - 2\nu))$; E – модуль пружності лінійних деформацій; G – модуль зсуву, $G = E/(2(1 + \nu))$; ν – коефіцієнт Пуассона; $\varepsilon = 1/3(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$, де

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – компоненти лінійних деформацій; $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ – компоненти деформацій зсуву.

Залежності (2.4) можуть бути виражені через дві пружні постійні таким чином:

$$\sigma_x = \frac{E(\varepsilon_x(-1+\nu) - (\varepsilon_y + \varepsilon_z)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2};$$

$$\sigma_y = \frac{E(\varepsilon_y(-1+\nu) - (\varepsilon_x + \varepsilon_z)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2};$$

$$\sigma_z = \frac{E(\varepsilon_z(-1+\nu) - (\varepsilon_y + \varepsilon_x)\nu)}{-1+\nu+2\nu^2};$$

$$\tau_{xy} = \frac{E\gamma_{xy}}{2(1+\nu)}; \tau_{yz} = \frac{E\gamma_{yz}}{2(1+\nu)}; \tau_{xz} = \frac{E\gamma_{xz}}{2(1+\nu)}. \quad (2.5)$$

Рівняння (2.4), (2.5) характеризують поведінку пружного елемента моделі «Н». Рівняння, які характеризують лінійну в'язкість «N», можуть бути виражені залежностями компонентів девіаторних складових напружень зі швидкостями деформацій такими залежностями [58]:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}) + \sigma; & \sigma_y &= 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}) + \sigma; \\ \sigma_z &= 2\mu_0(\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}) + \sigma, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де μ_0 – коефіцієнт в'язкості об'ємних деформацій,

$$\mu_0 = \frac{2}{3} \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \right) \mu$$

μ – коефіцієнт в'язкості деформацій зсуву;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{3}(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z)$$

де $\dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y, \dot{\varepsilon}_z$ – компоненти швидкостей лінійних деформацій.

З урахуванням уведених позначень вирази (2.6) набудуть вигляду:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_x - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_y))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_y &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_y - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_z + \dot{\varepsilon}_x))}{-9+18\nu}; \\ \sigma_z &= \frac{2\mu((-7+11\nu)\dot{\varepsilon}_z - (-2+7\nu)(\dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_x))}{-9+18\nu}; \\ \tau_{xy} &= \mu(\dot{\gamma}_{xy}); \tau_{xz} = \mu(\dot{\gamma}_{xz}); \tau_{yz} = \mu(\dot{\gamma}_{yz}).\end{aligned}\quad (2.7)$$

Для побудови загального рівняння в'язко-пружного середовища повинні бути підсумовані складові пружної та в'язкої частин моделі. Суми компонентів напружень пружної та в'язкої складових можуть бути записані з урахуванням того, що компоненти деформацій і швидкостей деформацій можна переписати у вигляді, зручному для розуміння, типу рівнянь і зручному для рішення, рівнянь відносно компонентів деформацій:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_x[t](-1+\nu) - (\varepsilon_y[t] + \varepsilon_z[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} + \\ &+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon'_x[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon'_y[t] + \varepsilon'_z[t]))}{-9+18\nu};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_y &= \frac{E(\varepsilon_y[t](-1+\nu) - (\varepsilon_x[t] + \varepsilon_z[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} + \\
&+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon_y'[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon_x'[t] + \varepsilon_z'[t]))}{-9+18\nu}; \\
\sigma_z &= \frac{E(\varepsilon_z[t](-1+\nu) - (\varepsilon_x[t] + \varepsilon_z[t])\nu)}{-1+\nu+2\nu^2} + \\
&+ \frac{2\mu((-7+11\nu)\varepsilon_z'[t] - (-2+7\nu)(\varepsilon_x'[t] + \varepsilon_y'[t]))}{-9+18\nu}; \\
\tau_{xy} &= \frac{E\gamma_{xy}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\gamma_{xy}'[t]); \quad \tau_{yz} = \frac{E\gamma_{yz}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\gamma_{yz}'[t]); \\
\tau_{xz} &= \frac{E\gamma_{xz}[t]}{2(1+\nu)} + \mu(\gamma_{xz}'[t]).
\end{aligned} \tag{2.8}$$

де $\varepsilon_x[t], \varepsilon_y[t], \varepsilon_z[t], \tau_{xy}[t], \tau_{xz}[t], \tau_{yz}[t]$ – компоненти деформацій, які залежать від часу, $\varepsilon_x'[t], \varepsilon_y'[t], \varepsilon_z'[t], \gamma_{xy}'[t], \gamma_{xz}'[t], \gamma_{yz}'[t]$ – похідні за часом від компонентів деформацій.

Розв'язок диференціальних рівнянь (2.8) відносно компонентів деформацій має вигляд:

$$\varepsilon_x[t] = \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} \left(\begin{array}{l} 3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) + \\ + e^{\frac{Et}{\mu(1+\nu)}} E(2C_1 - C_2 - C_3) + \\ + E(C_1 + C_2 + C_3) \end{array} \right);$$

$$\varepsilon_y[t] = \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} \begin{pmatrix} -3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (-\sigma_y + \nu(\sigma_x + \sigma_z)) - \\ -e^{\frac{Et}{\mu(1+\nu)}} E(C_1 - 2C_2 + C_3) + \\ +E(C_1 + C_2 + C_3) \end{pmatrix};$$

$$\varepsilon_z[t] = \frac{1}{3E} e^{-\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} \begin{pmatrix} -3e^{\frac{3Et}{2\mu(1+\nu)}} (\nu(\sigma_x + \sigma_y) - \sigma_z) - \\ -e^{\frac{Et}{\mu(1+\nu)}} E(C_1 + C_2 - 2C_3) + \\ +E(C_1 + C_2 + C_3) \end{pmatrix}; \quad (2.9)$$

$$\gamma_{xy}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_4; \quad \gamma_{yz}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{yz}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_5;$$

$$\gamma_{xz}[t] = \frac{2(1+\nu)\tau_{xz}}{E} + e^{-\frac{Et}{2\mu(1+\nu)}} C_6,$$

де $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – постійні інтегрування, які визначаються із умови, що за часу $t = 0$, $\varepsilon_x[t] = \varepsilon_y[t] = \varepsilon_z[t] = 0$, $\gamma_{xy}[t] = \gamma_{xz}[t] = \gamma_{yz}[t] = 0$,

звідки:

$$C_1 = -\frac{\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z}{E}; \quad C_2 = -\frac{-\nu\sigma_x + \sigma_y - \nu\sigma_z}{E};$$

$$C_3 = -\frac{-\nu\sigma_x - \nu\sigma_y + \sigma_z}{E}; \quad C_4 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E};$$

$$C_5 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{yz}}{E}; \quad C_6 = -\frac{2(1+\nu)\tau_{xz}}{E}.$$

Після підставлення постійних інтегрування в рівняння (2.9), значення компонентів в'язко-пружних деформацій будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{T}}_x &= \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}} (e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z))}{12\eta(1+\nu)^2}; \\ \dot{\mathbf{T}}_y &= \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}} (-e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\sigma_x - 2\sigma_y + \sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z))}{12\eta(1+\nu)^2}; \\ \dot{\mathbf{T}}_z &= \frac{e^{-\frac{3Gt}{2\eta(1+\nu)}} (-e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\sigma_x + \sigma_y - 2\sigma_z) - 3(-1+2\nu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z))}{12\eta(1+\nu)^2}; \\ \dot{\gamma}_{xy} &= \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{xy}}{2\eta(1+\nu)}; \dot{\gamma}_{yz} = \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{yz}}{2\eta(1+\nu)}; \dot{\gamma}_{xz} = \frac{e^{-\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \tau_{xz}}{2\eta(1+\nu)}.\end{aligned}$$

Із останніх залежностей компоненти напружень виразяться таким чином:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (6\dot{\mathbf{T}}_x - 3(\dot{\mathbf{T}}_y + \dot{\mathbf{T}}_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\dot{\mathbf{T}}_x + \dot{\mathbf{T}}_y + \dot{\mathbf{T}}_z)}{-1+2\nu}); \\ \sigma_y &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (-3(\dot{\mathbf{T}}_x - 2\dot{\mathbf{T}}_y + \dot{\mathbf{T}}_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\dot{\mathbf{T}}_x + \dot{\mathbf{T}}_y + \dot{\mathbf{T}}_z)}{-1+2\nu}); \\ \sigma_z &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (-3(\dot{\mathbf{T}}_x + \dot{\mathbf{T}}_y - 2\dot{\mathbf{T}}_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu)(\dot{\mathbf{T}}_x + \dot{\mathbf{T}}_y + \dot{\mathbf{T}}_z)}{-1+2\nu});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{xy} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{xy}, \\
\tau_{yz} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{yz}, \\
\tau_{xz} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \dot{\gamma}_{xz}.
\end{aligned}
\tag{2.10}$$

Час деформування t , який входить до залежностей зв'язку напружень зі швидкостями деформацій, може бути визначений за часом розповсюдження хвилі напружень. Швидкість розповсюдження хвилі напружень [5]: $c = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$, де λ – коефіцієнт Ляме.

$$\lambda = k - 2/3G; \quad k = 2/3((1+\nu)/(1-2\nu))G$$

Час розповсюдження хвилі:

$$t = \frac{l}{c} = l / \sqrt{\frac{E(-1+\nu)}{(-1+\nu+2\nu^2)\rho}} = \sqrt{2}l / \sqrt{\frac{G(-1+\nu)}{(1+\nu)^2(-1+2\nu)\rho}}, \tag{2.11}$$

де l – відстань, на якій затухає хвиля напружень у цьому середовищі.

Таким чином, рівняння (2.10) разом з (2.11) визначають компоненти напружень в'язко-пружного середовища, у вигляді якого представлений ґрунт.

Для визначення динамічних характеристик контактної взаємодії конусного робочого органу з ґрунтом необхідно скористатися отриманими вище фізичними рівняннями зв'язку компонентів напружень з компонентами швидкостей деформацій. З урахуванням раніше визначених [137] компонентів швидкостей деформацій за рівняннями (2.10) визначаються компоненти напружень на поверхні контакту робочий орган-ґрунт. У розгорнутому вигляді ці вирази мають ще більш

громіздкий, ніж компоненти швидкостей деформацій, вигляд. Тому навести їх повністю у межах цієї роботи не є можливим (Додаток Б).

Під дією зміни напружено-деформованого стану ґрунту на межі контакту з робочим органом відбуваються зміни щільності самого ґрунту. Найвідомішими регресійними залежностями, які зв'язують зміни щільності ґрунту зі змінами напружень, є вирази [75, 77]:

$$BVW = m \ln \left[\sqrt{\sigma_m^2 + \tau_{\max}^2} \right] + n \left(\frac{\tau_{\max}}{\sigma_m} \right) + b; \quad (2.12)$$

$$\rho_k = \rho_0 + b \ln[\sigma_m (1 + \tau_{\max})],$$

де BVW – зміна об'єму ґрунту, віднесеного до маси $[m^3/kg]$, ρ_k – кінцева щільність ґрунту $[kg/m^3]$, ρ_0 – початкова щільність ґрунту, σ_m – середнє або гідростатичне напруження в об'ємі, що розглядається; τ_{\max} – максимальне дотичне напруження в об'ємі, що розглядається; m, n, b – емпіричні коефіцієнти, які характерні для певного типу ґрунту за різної вологості та підлягають експериментальному визначенню.

Величина гідростатичного напруження визначається як: $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_z + \sigma_y) / 3$, а величина максимального дотичного напруження для прикладних розв'язків, згідно з результатами досліджень Новожилова [96], може бути представлена середньоквадратичним компонентом дотичних напружень у вигляді:

$$\tau_{\max} = \sqrt{(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) / 3}.$$

Використовуючи другий із виразів (2.12) та враховуючи те, що для конкретного ґрунту за певного його стану величина $b = const$, з використанням вище наведених результатів можна побудувати залежності зміни щільності ґрунту від його механічних властивостей, геометричних параметрів робочого органу для утворення кротовини та

швидкості його руху. Самі залежності в кінцевому вигляді не можуть бути наведені в межах дисертації, а їхня графічна інтерпретація наведена на рис. 2.7.

Аналіз змін щільності ґрунту ρ_k від дії робочого органу для утворення кротовини свідчить про те, що зі збільшенням радіусу r основи конуса щільність зростає нелінійно, причому інтенсивність цього зростання збільшується зі зменшенням гостроти конуса робочого органу.

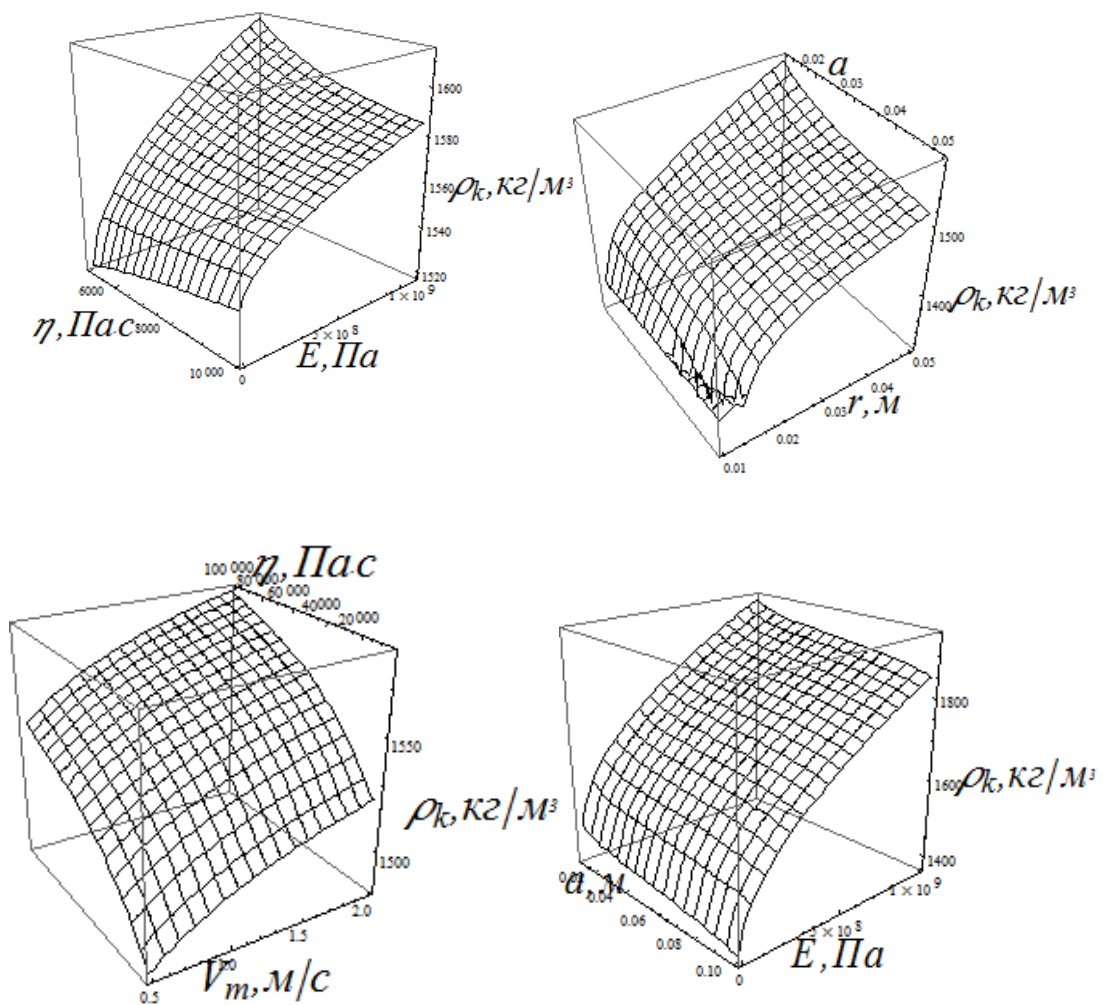


Рис. 2.7 Характерні графіки змін щільності ґрунту ρ_k залежно від модулів в'язкості η та пружності E ґрунту, радіуса r основи конуса,

коефіцієнта, що характеризує його гостроту α , та швидкості його переміщення V_m .

Збільшення модулів пружності E та в'язкості η ґрунту призводить до зростання щільності, причому зростання модуля в'язкості призводить до менш інтенсивного зростання щільності ґрунту. Аналогічна картина спостерігається зі збільшенням радіуса r основи конуса та зменшенням його гостроти α (інтенсивне зростання щільності зі збільшенням радіуса і зменшенням гостроти в початковій частині). Як і варто було очікувати, щільність ґрунту зростає з ростом швидкості V_m переміщення робочого органу, причому ця інтенсивність зберігається постійною для широкого діапазону значень модуля в'язкості η .

Розподіл компонентів тиску ґрунту на поверхню конусної частини робочого органу можуть бути визначені із умов рівноваги на поверхні:

$$\begin{aligned} dF_x &= \sigma_x l_k + \tau_{xy} m_k + \tau_{xz} n_k; \\ dF_y &= \sigma_y m_k + \tau_{xy} l_k + \tau_{yz} n_k; \\ dF_z &= \sigma_z n_k + \tau_{xz} l_k + \tau_{yz} m_k, \end{aligned} \quad (2.13)$$

де dF_x, dF_y, dF_z – проєкція на відповідні осі координат компонентів тисків ґрунту на поверхню робочого органу, l_k, m_k, n_k – спрямовуючі косинуси нормалі до поверхні робочого органу [137].

Інтегрування виразів (2.13) за проєкціями, перпендикулярними відповідним індексам компонент тисків, дає величини сил опору рухові робочого органу в ґрунті:

$$F_x = \int_{-r}^r \int_{-r}^r dF_x d\eta d\zeta; F_y = \int_{-r}^r \int_{-r}^0 dF_y d\xi d\zeta; dF_z = \int_{-r}^r \int_{-r}^0 dF_z d\xi d\eta. \quad (2.14)$$

Залежності (2.14) в кінцевому вигляді через громізdkість не можуть бути представлені в роботі, а їхня графічна інтерпретація представлена на рис. 2.8-2.9.

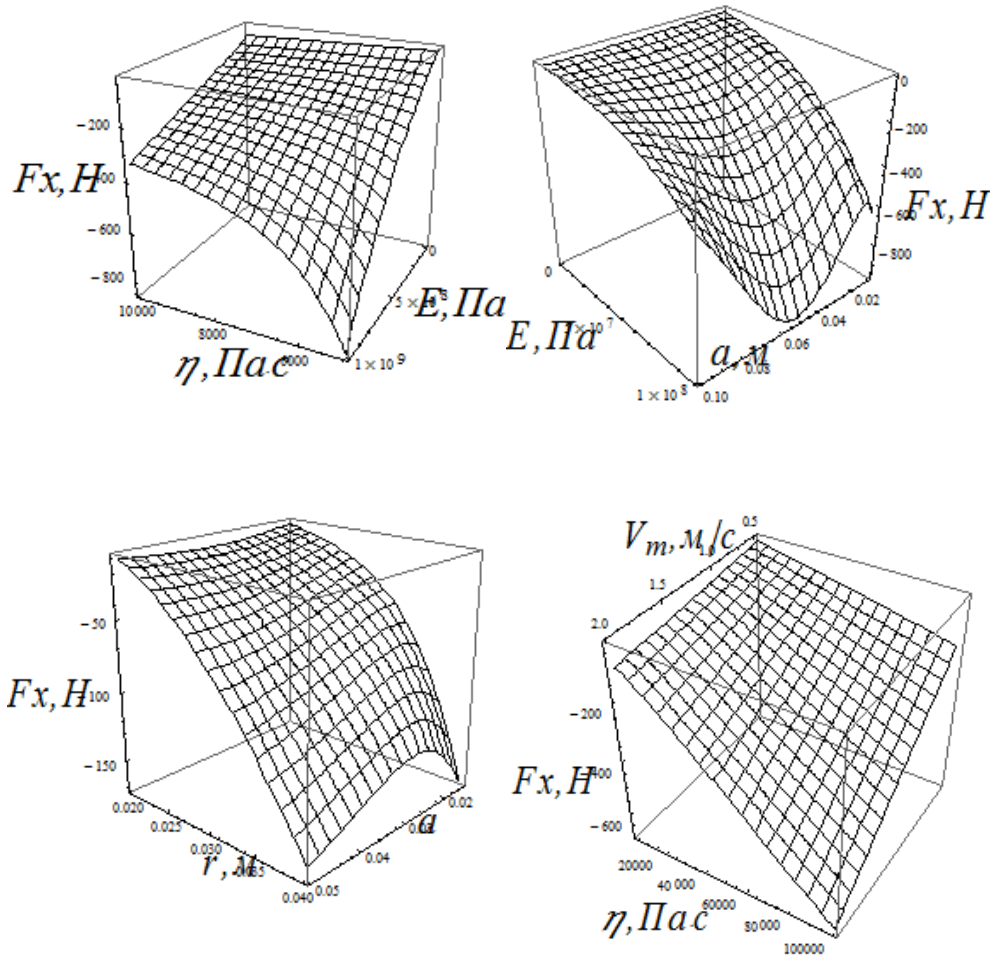


Рис. 2.8 Характерні графіки змін поздовжньо-горизонтальної F_x складової опору руху робочого органу в ґрунті залежно від модулів в'язкості η та пружності E ґрунту, радіуса r основи конуса, коефіцієнта, що характеризує його гостроту α , та швидкості його переміщення V_m .

Сумарний опір переміщенню конусної частини робочого органу в ґрунті складається зі складової опору ґрунту F_x та сил тертя на поверхні конуса, спроектованих на напрямок руху. Тоді загальна сила опору рухові виразиться таким чином:

$$F_{xtk} = F_x - \left(\sqrt{(F_y m_k)^2 + (F_z n_k)^2} \right) \operatorname{tg} \psi, \quad (2.14.a)$$

де ψ – кут тертя ґрунту по матеріалу поверхні конуса (рис. 2.10).

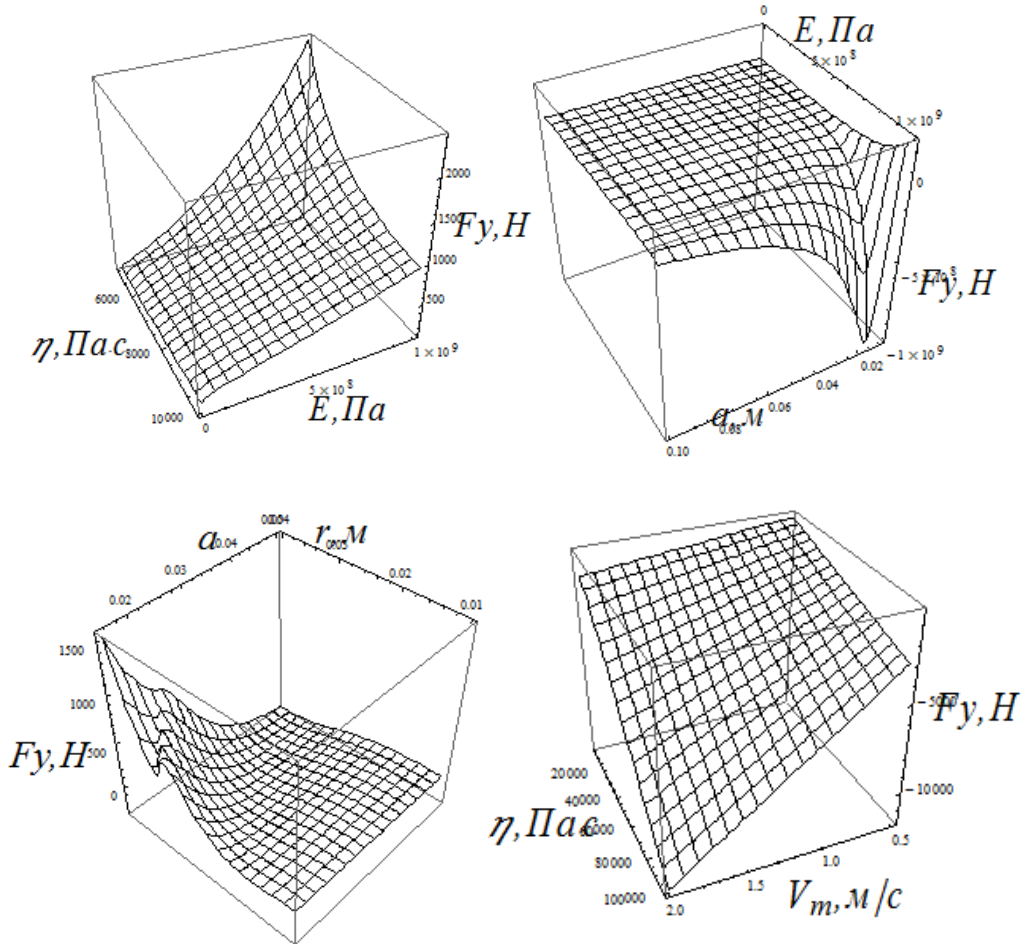


Рис. 2.9 Характерні графіки змін поперечно-горизонтальної F_y складової опору руху робочого органу в ґрунті залежно від модулів в'язкості η та пружності E ґрунту, радіуса r основи конуса, коефіцієнта, що характеризує його гостроту α , та швидкості його переміщення V_m .

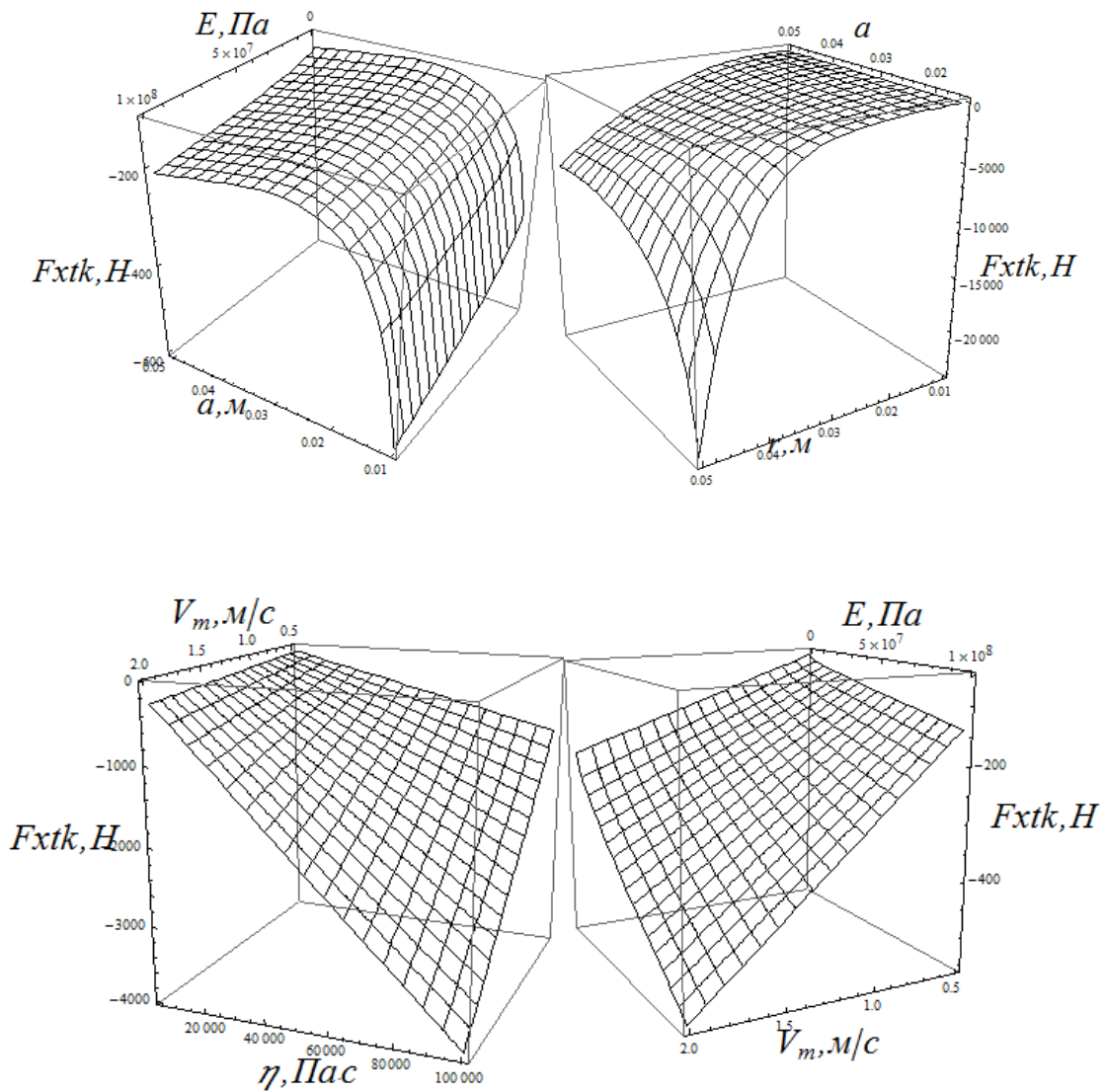


Рис. 2.10 Характерні графіки змін сумарної сили опору F_{xtk} рухові робочого органу в ґрунті залежно від модулів в'язкості η та пружності E ґрунту, радіуса r основи конуса, коефіцієнта, що характеризує його гостроту a та швидкості його переміщення V_m .

Варто відзначити, що поперечно-горизонтальна F_y та вертикально-горизонтальна F_z складові опору руху робочого органу є сумами за модулем сил, що діють у прямому та зворотному напрямках по осях Oy та Oz , відповідно.

Унаслідок симетрії конуса відносно осі $O\xi$, складова сили опору руху F_z має характер, аналогічний F_y .

Аналіз поздовжньо-горизонтальної F_x складової опору руху робочого органу в ґрунті свідчить про те, що зі збільшенням радіуса r основи конуса зусилля опору зростає нелінійно, причому інтенсивність цього зростання збільшується зі зменшенням гостроти конуса робочого органу. Збільшення модулів пружності E та в'язкості η ґрунту призводить до зростання опору руху робочого органу, причому ріст модуля в'язкості призводить до більш інтенсивного зростання опору за початкового збільшення в'язкості до величини $\eta \leq 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}$, після чого подальше зростання в'язкості не призводить до істотного зростання сил опору. Аналогічна картина спостерігається зі зростанням радіуса r основи конуса та зменшенням його гостроти a (інтенсивне зростання зі збільшенням радіуса та зменшенням гостроти в початковій частині). Як і варто було очікувати, опір F_x зростає зі зростанням швидкості переміщення робочого органу, причому ця інтенсивність вища для великих значень модуля в'язкості η .

Що стосується сил опору руху F_y , та аналогічно, F_z , – то збільшення модулів пружності E та в'язкості η призводить до збільшення даних компонентів сил опору, причому інтенсивніше зростання опору спостерігається за менших значень модуля в'язкості η , у той час як зростання модуля пружності E призводить до рівномірного пропорційного збільшення сил опору F_y та F_z .

Величини сил опору F_y та F_z збільшуються зі зменшенням гостроти конуса a , причому інтенсивніше зростання спостерігається за менших значень радіуса r основи конуса.

Складові опору F_y та F_z зростають зі зростанням швидкості переміщення робочого органу V_m , причому ця інтенсивність зростання вища для менших значень модуля в'язкості η .

Аналіз залежності сумарної сили опору ґрунту пересуванню конусної робочої частини свідчить про те, що збільшення модуля пружності E та модуля в'язкості η ґрунту призводить до зростання сил опору, що цілком закономірно. Зі збільшенням радіусу основи конуса r та зменшенням гостроти конуса a сили опору зростають.

Таким чином, у результаті проведеного аналізу отримані компоненти швидкостей відносних деформацій ґрунту на поверхні контакту з конусним робочим органом. Ці вирази є вихідними для подальшого визначення компонент напружень у ґрунті, які дозволяють визначити ущільнення ґрунту на стінках утвореної кротовини та складові сил опору переміщенню робочого органу.

На підставі проведеного аналізу динаміки контактної взаємодії робочого органу з ґрунтом встановлені компоненти нормальних і зсувних напружень ґрунту на поверхні контакту.

Визначено напрямки і величини ущільнення ґрунту залежно від механічних властивостей ґрунту, геометричних параметрів робочого органу для утворення кротовини та швидкості його поступального переміщення. Визначено складові сил опору ґрунту руху робочого органу в ґрунті залежно від геометричних параметрів та швидкості поступального переміщення, а також механічних властивостей ґрунту.

Аналізуючи залежності ущільнення ґрунту стінок утвореної кротовини та опір ґрунту пересуванню робочого органу, можна дійти до висновку, що для більшості ґрунтів за механічними характеристиками найбільш раціональними будуть такі геометричні параметри конусної

частини робочого органу: загострення $a \approx 0.02$, радіус основи конуса $r \approx 1.1r_t$, де r_t – радіус труби зрошувача, при швидкості руху $V_m \approx 1\text{ м/с}$.

2.4 Аналіз ущільнення ґрунту лемішною частиною робочого органу для утворення кротовин

Аналіз останніх досліджень та публікацій [3, 15, 34, 43, 64, 75, 77] показує, що для вирішення цього завдання необхідна формалізація ґрунту, як середовища, на яке спрямовано дію робочого органу, а також формалізація взаємодії робочого органу з ґрунтом. Найчастіше використовуються моделі, що більше нагадують взаємодію з абсолютно твердим тілом, або моделі, що використовуються в класичній теорії механіки ґрунтів, які засновані на механіці сипучих середовищ [130].

Крім того, при побудові моделей взаємодії використовуються одновимірні моделі, або в кращому випадку плоскі рішення, які не завжди відображають реальний процес змін властивостей ґрунту під дією робочого органу [75, 77].

При цьому варто зазначити, що щільність ґрунту під впливом робочого органу змінюється у функції зміни всіх шести компонентів деформацій або напруг, що не може бути відображено в плоскій постановці задачі, а тим більше – до одновимірної. Крім того, такі постановки задач не дозволяють визначити всі три складові опору руху робочого органу в ґрунті. Тому розв'язання задачі про взаємодії робочого органу з ґрунтом у тривимірній постановці зі встановленням взаємозв'язку геометричних параметрів і режимів роботи робочого органу та зміною властивостей ґрунту, а також компонент тягового опору є актуальним завданням, яка потребує вирішення.

У зв'язку з цим необхідне подальше визначення відносних швидкостей деформацій в зоні контакту лемішного робочого органу з ґрунтом залежно від його геометричних і кінематичних параметрів.

Для утворення порожнини, у якій повинен бути покладений екран методом протягання, може бути використаний лемішний робочий орган, схема руху якого представлена на рис. 2.11.

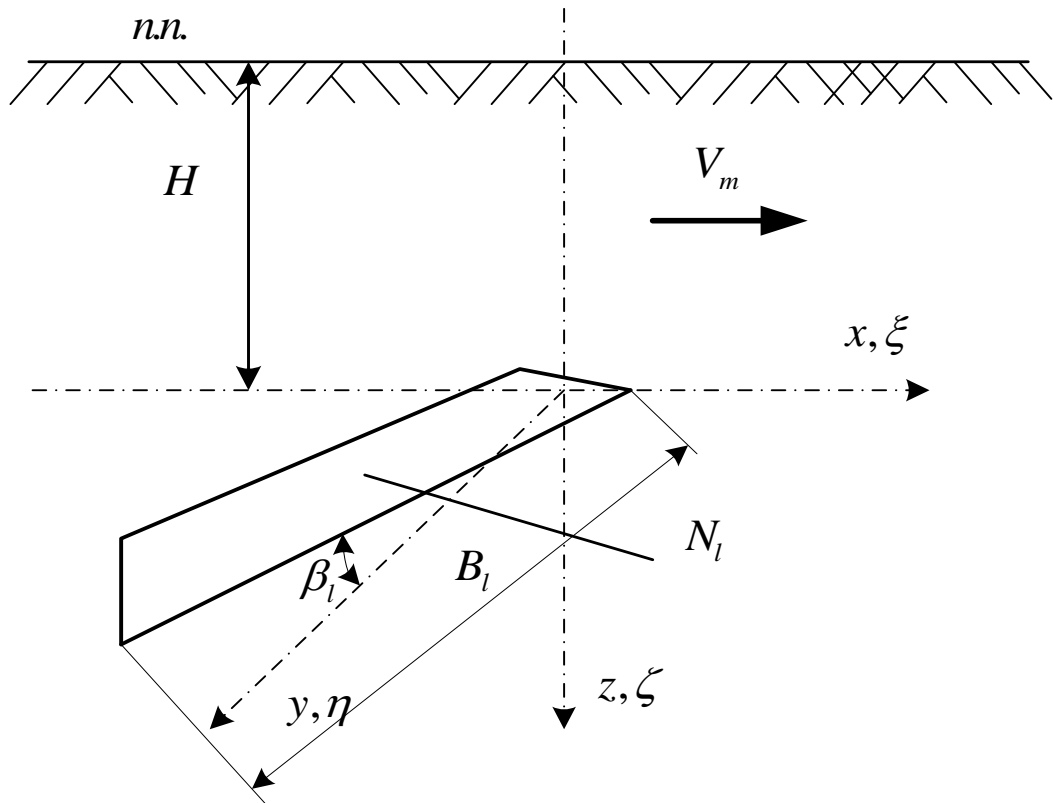


Рис. 2.11 Схема руху леміша

Метод побудови рішення щодо ущільнення стінок порожнини аналогічний розглянутому вище методу для конусного робочого органу [137].

Рівняння робочої частини поверхні леміша в системі координат $\xi\eta\zeta$ іdem xuz має вигляд рівняння площини:

$$f_l = \frac{\xi}{a} + \frac{r - \eta}{b} + \frac{(r/2) - \zeta}{c} = 0,$$

де a, b, c – коефіцієнти, що визначають нахил площини до відповідних осей координат $o\xi, o\eta, o\zeta$.

r – радіус основи конусного робочого органу. Введення останнього рівняння визначає зміщення центру площини до початку координат у напрямку осі $o\zeta$.

Косинуси кутів нахилу нормалі до поверхні до осей координат виразяться залежностями:

$$l_l = \frac{\partial f_l / \partial \xi}{\sqrt{(\partial f_l / \partial \xi)^2 + (\partial f_l / \partial \eta)^2 + (\partial f_l / \partial \zeta)^2}} = 1 / \left(a \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}} \right)$$

$$; m_l = \frac{\partial f_l / \partial \eta}{\sqrt{(\partial f_l / \partial \xi)^2 + (\partial f_l / \partial \eta)^2 + (\partial f_l / \partial \zeta)^2}} = -1 / \left(b \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}} \right);$$

$$n_l = \frac{\partial f_l / \partial \zeta}{\sqrt{(\partial f_l / \partial \xi)^2 + (\partial f_l / \partial \eta)^2 + (\partial f_l / \partial \zeta)^2}} = -1 / \left(\sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}} c \right).$$

Швидкості переміщень ґрунту на поверхні леміша визначаються аналогічно тому, як це проводилося для конусного робочого органу [137], на підставі того, що проєкція швидкості на нормаль до поверхні леміша має вигляд $V_{Nl} = V_m / l_l$:

$$v_{l0} = V_{nl} m_l = -a V_m / b; w_{l0} = V_{nl} n_l = -a V_m / c; u_{l0} = V_{nl} l_l = V_m.$$

Аналітичні рішення для контактних задач можливі тільки в пружній або пружно-в'язкій постановці. Причому ці рішення допускаються лише для випадку, коли при послідовних підстановках геометричних рівнянь у фізичні рівняння зв'язку напружень з деформаціями подальша підстановка одержаних компонент напружень у рівняння статки (динаміки) суцільного середовища призведе до отримання рівнянь еліптичного типу. У такому випадку рішення може бути знайдене при використанні бігармонічних потенціальних функцій, які задовольняють умовам на

поверхні контакту тіла (система координат ξ, η, ζ) та середовища, з яким воно взаємодіє (система координат x, y, z), тобто за $x - \xi = 0, y - \eta = 0, z - \zeta = 0$ компоненти швидкостей (переміщень) дорівнюють їх початковим значенням. Для нашого випадку це означає, що компоненти швидкостей для конуса мають вигляд:

$$u_l \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = u_{l0}, \quad v_l \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = v_{l0}, \quad w_l \Big|_{x-\xi=0, y-\eta=0, z-\zeta=0} = w_{l0}.$$

Такі бігармонічні потенціальні функції, згідно О. І. Лур'є [82], мають вигляд:

$$u_l = \int_{r-r}^B \int_{r-r}^r \frac{a_0 u_{l0} (x - \xi_l + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\eta_l;$$

$$v_k = \int_{-r}^r \int_0^{L_k} \frac{a_0 v_{l0} (y - \eta_k + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\zeta_l;$$

(2.15)

$$w_l = \int_{r-r}^{BL_l} \frac{a_0 w_{l0} (z - \zeta_l + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\eta_l,$$

де $L_l = -B \cos(1/a)$ – проєкція довжини леміша у напрямку осі $o\xi$;

B – проєкція довжини леміша у напрямку осі $o\eta$;

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \frac{4}{\text{Log}[-\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}] - \text{Log}[\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}]} \quad - \quad \text{коефіцієнт, що}$$

забезпечує виконання початкових умов при введенні малої величини δ , яка усуває сингулярність виразів (2.15). Бігармонічні потенціальні

функції повинні задовольняти рівняння $\Delta^2 f = 0$, де Δ – оператор Лапласа, $f = \{u_l, v_l, w_l\}$.

У зв'язку зі складністю інтегрування рівнянь (2.15), які є компонентами швидкостей переміщень ґрунту в просторі перед робочим органом, у загальному вигляді можна розв'язувати задачу про знаходження поширення швидкостей переміщень, швидкостей відносних деформацій, компонент напружень у диференціальному вигляді, як це було запропоновано в [64, 137]. Суть методу полягає в тому, що для знаходження компонент швидкостей деформацій передбачається диференціювання рівняння (2.15), відповідно до геометричних рівнянь (рівнянь Коші) теорії суцільних середовищ.

Для цього можна перетворити рівняння (2.15) таким чином, що в результаті будуть отримані компоненти диференціальних складових компонент швидкостей зміщень ґрунту перед робочим органом:

$$\begin{aligned}
 du_l &= \frac{d^2}{d\eta_l d\zeta_l} \int_0^r \int_{-r}^r \frac{a_0 u_{l0} (x - \xi_l + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\zeta_l d\eta_l = \\
 &= \frac{15a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)(y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{7/2}}; \\
 dv_l &= \frac{d^2}{d\zeta_l d\xi_l} \int_{-r}^r \int_0^{L_l} \frac{a_0 v_{l0} (y - \eta_k + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\zeta_l = \\
 &= -\frac{15a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)(y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{b((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{7/2}}; \\
 dw_l &= \frac{d^2}{d\eta_l d\zeta_l} \int_0^{BL_l} \int_{r_0}^r \frac{a_0 w_{l0} (z - \zeta_l + \delta)}{((x - \xi_l + \delta)^2 + (y - \eta_l + \delta)^2 + (z - \zeta_l + \delta)^2)^{3/2}} d\xi_l d\eta_l = \\
 &= -\frac{15a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)(y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{c((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{7/2}}.
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

З рівнянь (2.16) можна одержати диференціальні компоненти швидкостей деформацій ґрунту, використовуючи геометричні рівняння (рівняння Коші):

$$d\dot{\tau}_{xl} = \frac{d}{dx} du_l = \frac{15a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)(y + \delta - \eta_l)((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 - 6(x + \delta - \xi_l)^2)}{((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{9/2}};$$

$$d\dot{\tau}_{yl} = \frac{d}{dy} dv_k = \frac{105a a_0 V_m (z + \delta - \zeta_l)^2 (y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{c((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{9/2}} - \frac{15a a_0 V_m (y + \delta - \eta_l)(x + \delta - \xi_l)}{c((z + \delta - \zeta_l)^2 + (y + \delta - \eta_l)^2 + (x + \delta - \xi_l)^2)^{7/2}};$$

$$d\dot{\tau}_{zl} = \frac{d}{dz} dw_l = 15a_0 V_m (\delta - \zeta_l + z) \times \left(\frac{7a(\delta - \xi_l + x)^2(\delta - \eta_l + y)}{b} - \frac{a(\delta - \eta_l + y)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{b} - \frac{-7(\delta - \xi_l + x)(\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \xi_l + x)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)^{9/2}} \right);$$

(2.17)

$$d\dot{\gamma}_{xyl} = \frac{d}{dy} du_l + \frac{d}{dx} dv_l = 15a_0 V_m (\delta - \zeta_l + z) \times \left(\frac{7a(\delta - \xi_l + x)^2(\delta - \eta_l + y)}{b} - \frac{a(\delta - \eta_l + y)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{b} - \frac{-7(\delta - \xi_l + x)(\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \xi_l + x)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)^{9/2}} \right);$$

$$d\dot{\gamma}_{xzl} = \frac{d}{dz} du_l + \frac{d}{dx} dw_l = 15a_0 V_m (\delta - \eta_l + y) \times$$

$$\left(\frac{-a(\delta - \zeta_l + z)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)}{c} + \frac{7a(\delta - \xi_l + x)^2(\delta - \zeta_l + z)}{c} + \right)$$

$$\times \frac{+(\delta - \xi_l + x)((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2) - 7(\delta - \xi_l + x)(\delta - \zeta_l + z)^2}{((\delta - \xi_l + x)^2 + (\delta - \eta_l + y)^2 + (\delta - \zeta_l + z)^2)^{9/2}};$$

де $d\dot{\tau}_{xl}, d\dot{\tau}_{yl}, d\dot{\tau}_{zl}, d\dot{\gamma}_{xyl}, d\dot{\gamma}_{xzl}, d\dot{\gamma}_{yzl}$ – компоненти диференціальних складових швидкостей відносних нормальних і зсувних деформацій ґрунту перед лемішем.

Для розуміння характеру впливу робочого органу в зоні безпосереднього контакту з ґрунтом, а саме його геометричних форм і розмірів, на зміни компонент відносних деформацій, вирази (2.17) можна проінтегрувати, згідно з виразами (2.15). При цьому варто ураховувати те, що аналізу підлягає зона безпосереднього контакту, а саме умови: $\{\zeta_l - z = 0, \eta_l - y = 0, \xi_l - x = 0\}$. Це суттєво спрощує вирази (2.17). На жаль, у розгорнутому вигляді навести кінцеві вирази компонент швидкостей деформацій $\dot{\tau}_{xl}, \dot{\tau}_{yl}, \dot{\tau}_{zl}, \dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$ є можливим через їхню громіздкість. Тому графічна інтерпретація цих виразів показана на рис. 2.12-2.13.

Аналіз показав, що вплив коефіцієнтів рівняння площини a, b, c на зміну нормальних компонентів (рис. 2.12) швидкостей деформацій характеризується такими змінами: зменшення кута нахилу a поверхні до поздовжньої у відношенні напрямку руху осі призводить до зростання швидкостей деформацій $\dot{\tau}_{xl}, \dot{\tau}_{zl}$ (стиснення) і зменшення поперечної до напрямку руху нормальної швидкості деформації $\dot{\tau}_{yl}$; зміна нахилу нормалі до площини до осі ou , поперечної до напрямку руху b , призводить до зменшення компонентів швидкостей деформацій $\dot{\tau}_{xl}, \dot{\tau}_{yl}$ та за дуже малих його значень – до зменшення складової $\dot{\tau}_{zl}$; зі збільшенням

нахилу нормалі до площини до осі Oz (величина c) зменшуються компоненти швидкостей деформацій $\dot{T}_{xl}, \dot{T}_{zl}$, а компонент \dot{T}_{yl} залишається незмінною.

Варто відзначити, що зменшення кута нахилу нормалі до площини a призводить до зменшення всіх трьох компонентів швидкостей зсувних деформацій $\dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$; а збільшення кута нахилу нормалі до площини c – до зменшення $\dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$, при цьому $\dot{\gamma}_{xyl}$ залишається незмінним. Зменшення величини b призводить до збільшення компонент $\dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{yzl}$ та не впливає на зміну $\dot{\gamma}_{xzl}$ (рис. 2. 13).

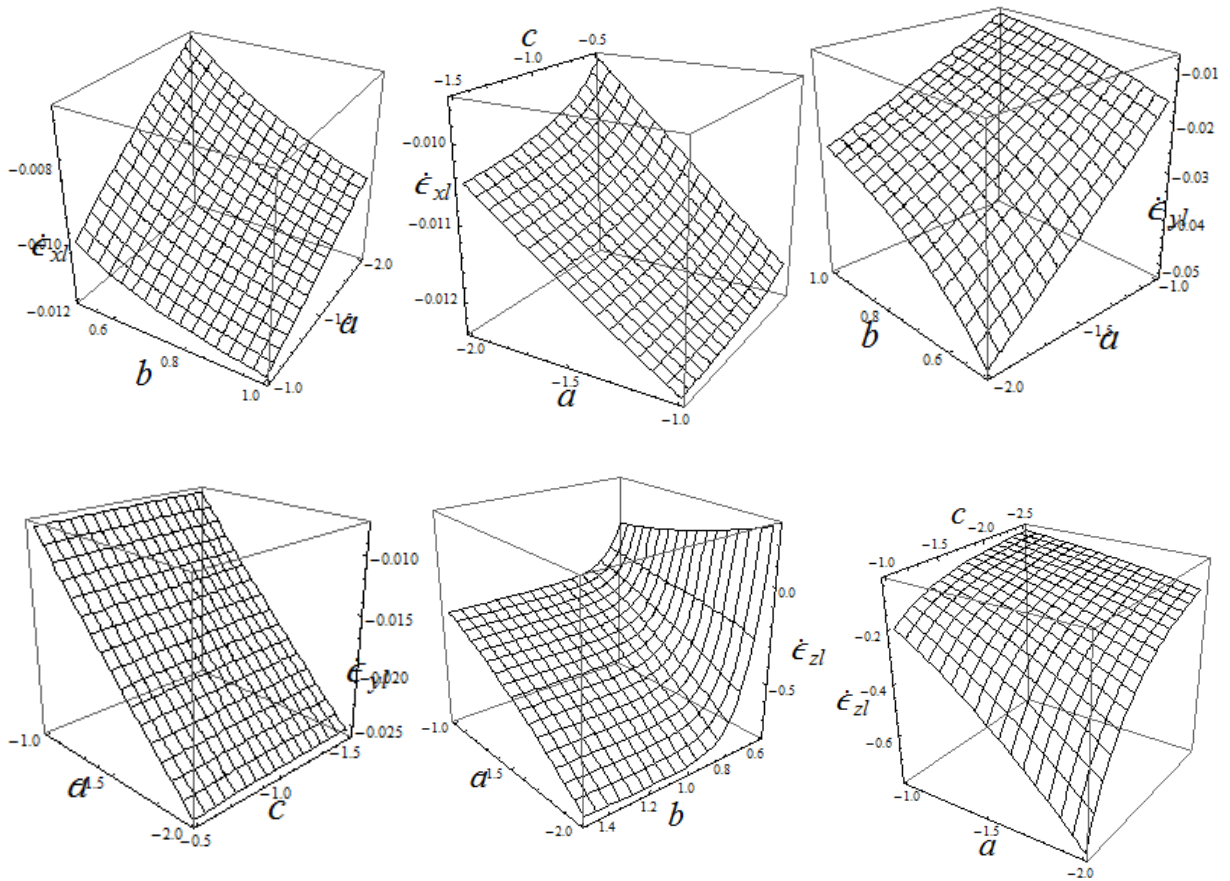


Рис. 2.12 Графіки нормальних компонентів швидкостей відносних нормальних деформацій ґрунту $\dot{T}_{xl}, \dot{T}_{yl}, \dot{T}_{zl}$ залежно від коефіцієнтів a, b, c рівняння площини.

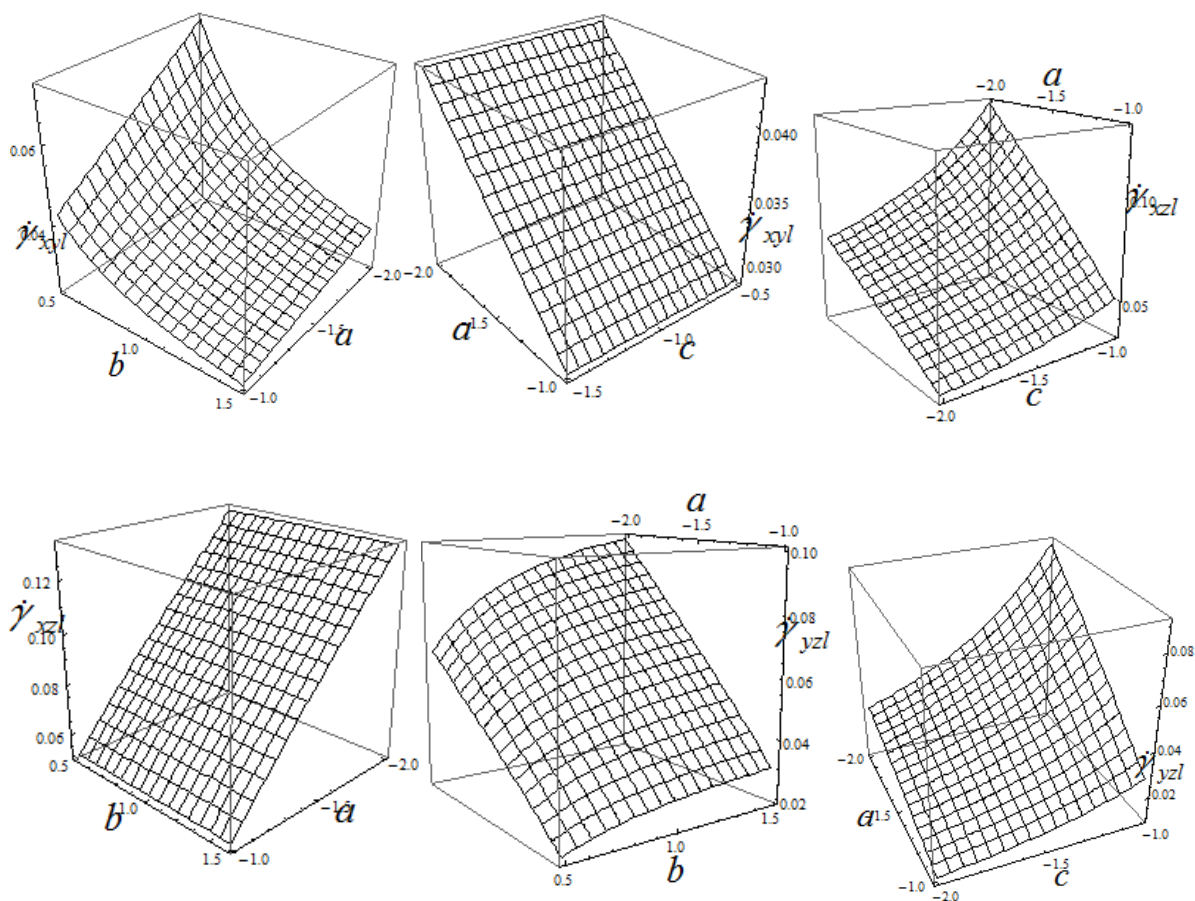


Рис. 2.13 Графіки дотичних (зсувних) компонентів швидкостей відносних деформацій ґрунту $\dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$ залежно від коефіцієнтів a, b, c рівняння площини.

Відповідно з прийнятою моделлю зв'язку напружень зі швидкостями деформацій для ґрунту [138], визначаються компоненти напружень $\sigma_{xl}, \sigma_{yl}, \sigma_{zl}, \tau_{xyl}, \tau_{xzl}, \tau_{yzl}$ в ґрунті на поверхні контакту леміша з ґрунтом, при цьому компоненти швидкостей деформацій на поверхні контакту становлять $\dot{T}_{xl}, \dot{T}_{yl}, \dot{T}_{zl}, \dot{\gamma}_{xyl}, \dot{\gamma}_{xzl}, \dot{\gamma}_{yzl}$.

$$\sigma_{xl} = \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu)(6\dot{\tau}_{xl} - 3(\dot{\tau}_{yl} + \dot{\tau}_{zl}) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}}(1+\nu)(\dot{\tau}_{xl} + \dot{\tau}_{yl} + \dot{\tau}_{zl})}{-1+2\nu});$$

$$\sigma_{yl} = \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu)(-3(\dot{\tau}_{xl} - 2\dot{\tau}_{yl} + \dot{\tau}_{zl}) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}}(1+\nu)(\dot{\tau}_{xl} + \dot{\tau}_{yl} + \dot{\tau}_{zl})}{-1+2\nu});$$

$$\sigma_{zl} = \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu)(-3(\dot{\tau}_{xl} + \dot{\tau}_{yl} - 2\dot{\tau}_{zl}) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}}(1+\nu)(\dot{\tau}_{xl} + \dot{\tau}_{yl} + \dot{\tau}_{zl})}{-1+2\nu}); \quad (2.18)$$

$$\tau_{xyl} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu)\dot{\gamma}_{xyl}, \tau_{yyl} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu)\dot{\gamma}_{yyl}, \tau_{xzl} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu)\dot{\gamma}_{xzl},$$

де $G = E/(2(1+\nu))$ – модуль пружності зсувних деформацій, η – коефіцієнт в'язкості зсувних деформацій, E – модуль пружності лінійних деформацій, G – модуль зсуву, ν – коефіцієнт Пуассона.

Через громіздкість отриманих виразів, у роботі вони не наводяться (Додаток Г), а графічна інтерпретація компонент напружень наведена на рис. 2.14 та 2.15.

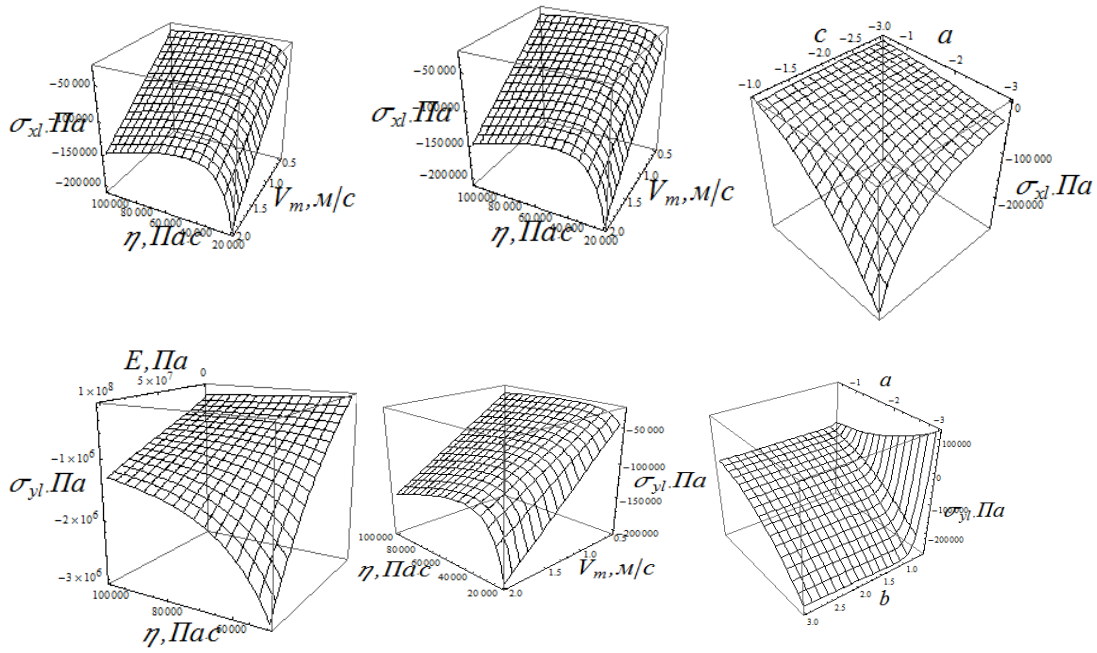


Рис. 2.14 Графіки залежності компонент нормальних напружень σ_{xl}, σ_{yl} від властивостей ґрунту E, η , швидкості переміщення леміша V_m та коефіцієнтів a, b, c рівняння його площини

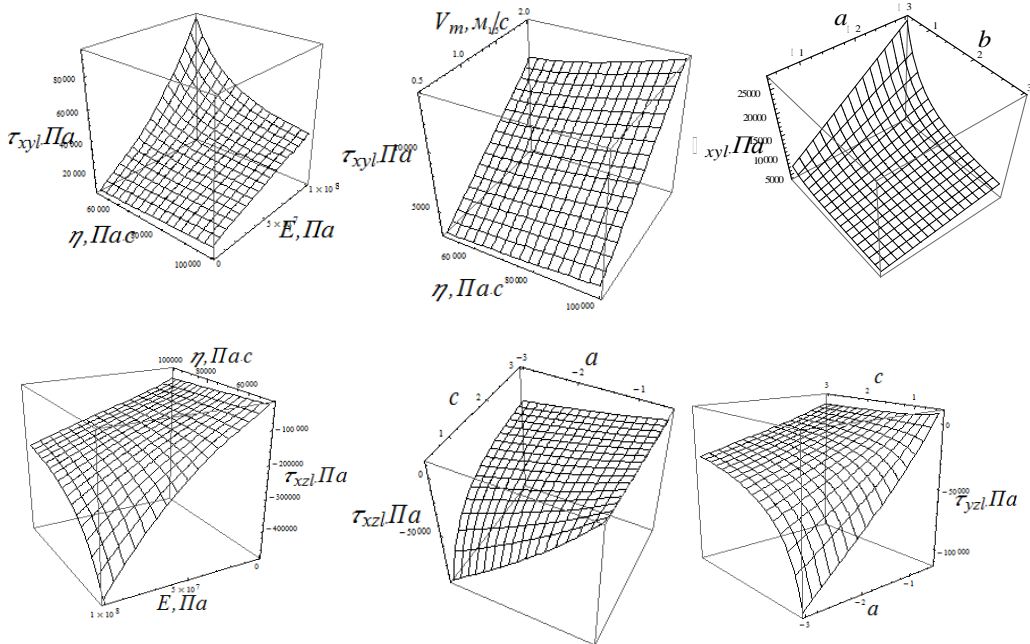


Рис. 2.15 Графіки залежності компонент дотичних напружень $\tau_{xyl}, \tau_{xzl}, \tau_{yzl}$ від властивостей ґрунту E, η , швидкості V_m переміщення леміша та коефіцієнтів a, b, c рівняння його площини.

Аналізуючи залежності зміни компонент напружень (рис. 2.14, 2.15), варто зазначити, що зростання модулів пружності E та в'язкості η призводять до збільшення всіх компонент напружень. Збільшення поступальної швидкості переміщення леміша V_m призводить до лінійного зростання компонент напружень, яке виявляється більш істотно зі зростанням модуля в'язкості ґрунту. Вплив кутів нахилу нормалі до поверхні леміша аналогічне такому, яке виявляється для компонентів швидкостей деформацій.

Як було зазначено в пункті 2.5 (залежність (2.12), під впливом зміни напружено-деформованого стану ґрунту на границі контакту з робочим органом відбуваються зміни щільності самого ґрунту.

Величина гідростатичного напруження визначається як $\sigma_{ml} = (\sigma_{xl} + \sigma_{zl} + \sigma_{yl})/3$, а величина максимального дотичного напруження для прикладних рішень, згідно з результатами досліджень Новожилова [96], може бути представлена середньоквадратичним компонентом дотичних напружень у вигляді:

$\tau_{ml} = \sqrt{(\tau_{xyl}^2 + \tau_{xzl}^2 + \tau_{yzl}^2)}/3$. Залежності величин гідростатичних і найбільших дотичних напружень від властивостей ґрунту та параметрів леміша наведені на рисунку 2.15. Використовуючи другий із виразів (2.19) і враховуючи те, що для конкретного ґрунту при певному стані величина $b = const$, з використанням вищевикладених результатів можна побудувати залежності зміни щільності ґрунту від його механічних властивостей, геометричних параметрів леміша та швидкості його руху. Самі залежності в кінцевому вигляді не можуть бути наведені в межах роботи, а графічна інтерпретація цих залежностей представлена на рис. 2.16 – 2.17.

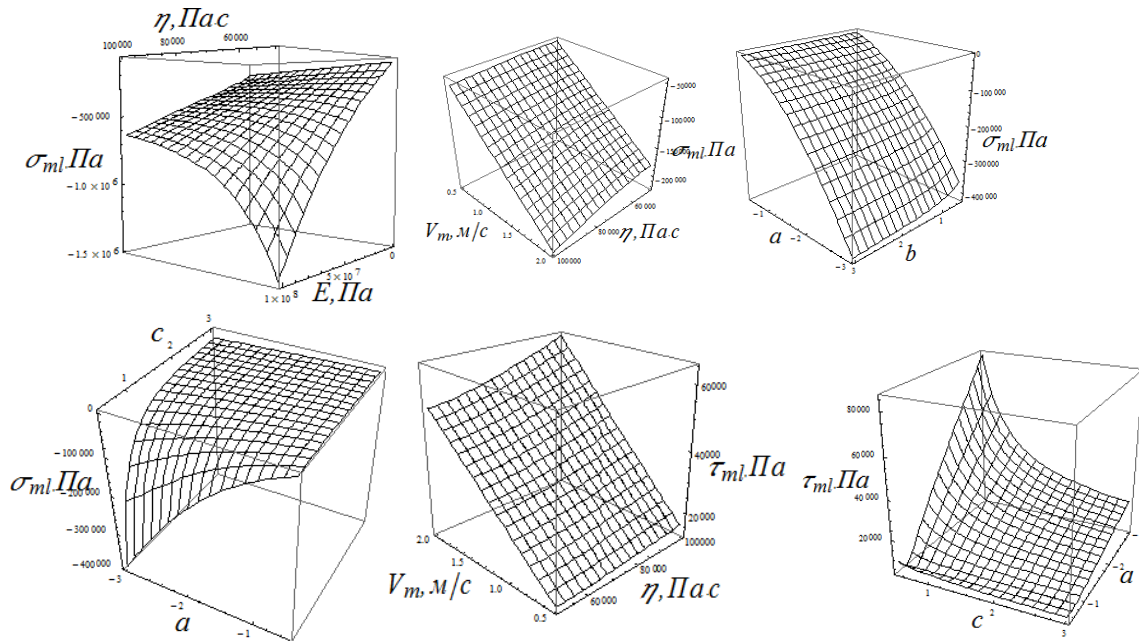


Рис. 2.16 Графіки залежностей гідростатичних і найбільших дотичних напружень σ_{ml}, τ_{ml} ґрунту від його властивостей E, η , швидкості V_m переміщення леміша та коефіцієнтів a, b, c рівняння його площини.

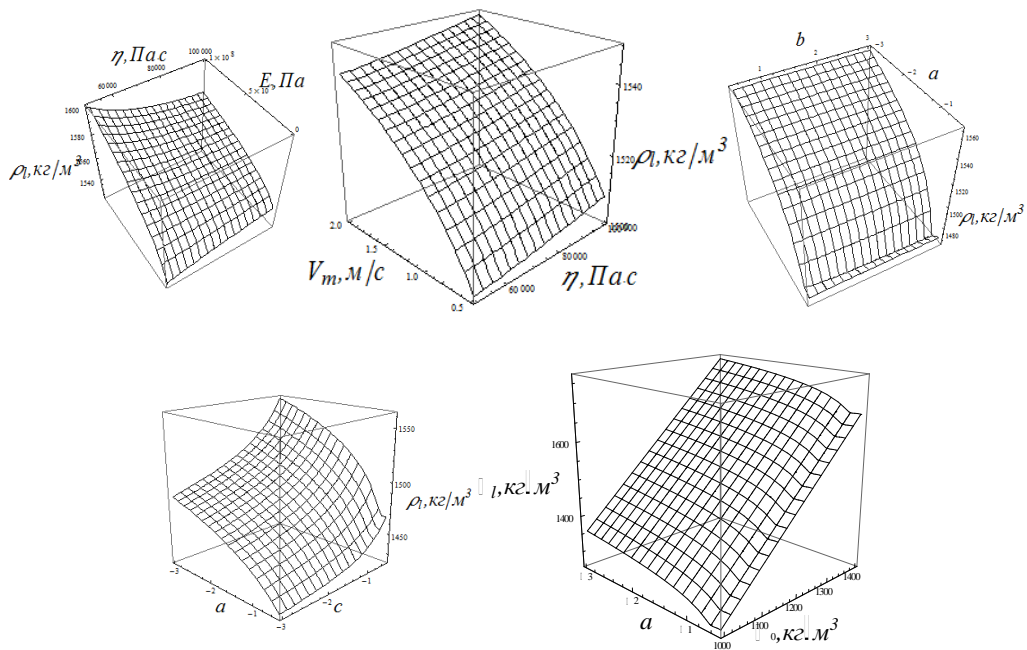


Рис. 2.17 Графіки залежностей зміни щільності ґрунту ρ_l в зоні контакту з лемішем від його властивостей E, η , швидкості V_m переміщення леміша та коефіцієнтів a, b, c рівняння його площини

Розподіли компонент тисків ґрунту на поверхню леміша можуть бути визначені з умов рівноваги на поверхні:

$$dF_{xl} = \sigma_{xl}l_l + \tau_{xyl}m_l + \tau_{xzl}n_l; dF_{yl} = \tau_{xyl}l_l + \sigma_{yl}m_l + \tau_{yzl}n_l;$$

$$dF_{zl} = \tau_{xzl}l_l + \tau_{yzl}m_l + \sigma_{zl}n_l, \quad (2.20)$$

де $dF_{xl}, dF_{yl}, dF_{zl}$ – проєкції на відповідні осі координат компонент тисків ґрунту на поверхню робочого органу для утворення кротовини;

l_l, m_l, n_l – спрямовуючі косинуси нормалі до поверхні робочого органу.

Інтегрування виразів (2.20) за проєкціями, перпендикулярними відповідним індексам компонент тисків, дає величини сил опору руху леміша в ґрунті:

$$F_{xl} = \int_{-r}^r \int_r^B dF_{xl} d\eta_l d\zeta_l; F_{yl} = \int_{-r}^r \int_0^{L_l} dF_{yl} d\xi_l d\zeta_l; dF_{zl} = \int_0^{BL_l} dF_{zl} d\xi_l d\eta_l. \quad (2.21)$$

Залежності (2.21) в кінцевому вигляді не можуть бути наведені в роботі через їх громіздкість, а графічна інтерпретація цих залежностей представлена на рисунках 2.18-2.20.

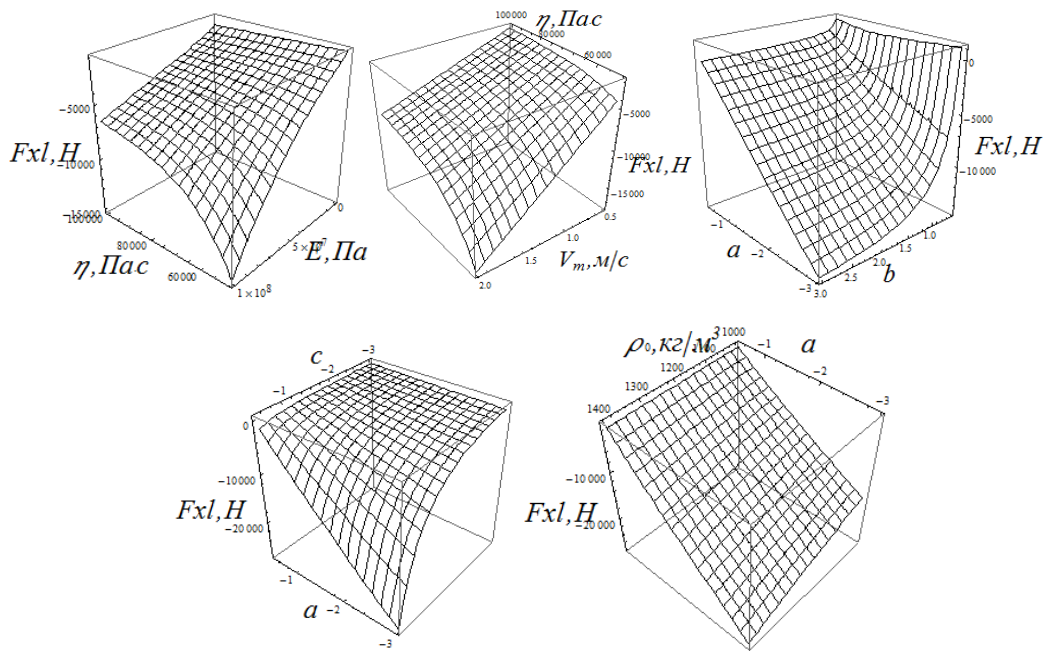


Рис. 2.18 Графіки залежностей опору руху леміша F_{xl} у напрямку поступального руху робочого органу від властивостей ґрунту E, η , швидкості V_m переміщення леміша та коефіцієнтів a, b, c рівняння його площини

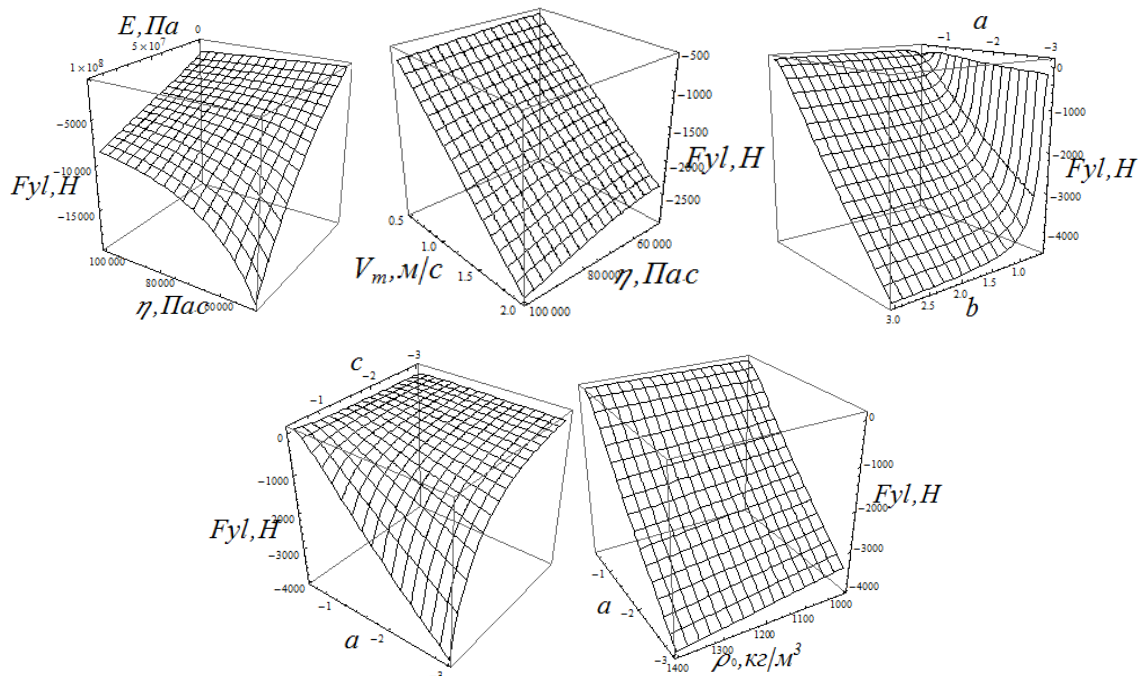


Рис. 2.19 Графіки залежностей опору руху леміша F_{yl} в горизонтально-поперечному напрямку від властивостей ґрунту E, η ,

швидкості V_m переміщення леміша та коефіцієнтів a, b, c рівняння його ПЛОЩИНИ

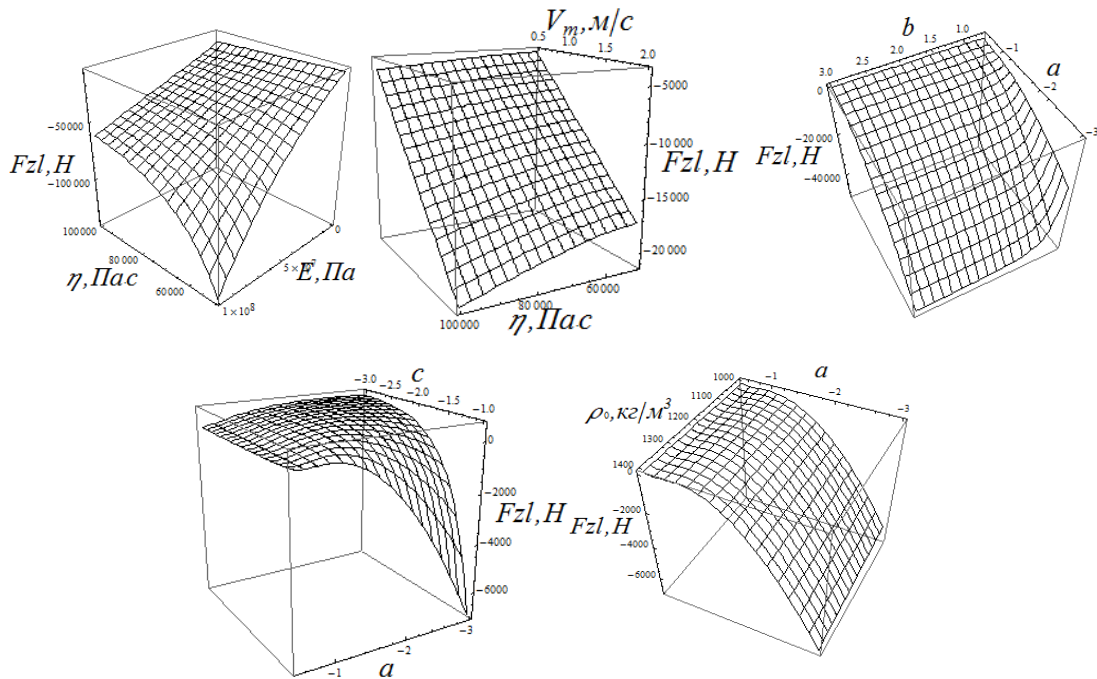


Рис. 2.20 Графіки залежностей опору руху леміша F_{zl} у вертикальному напрямку від властивостей ґрунту E, η , швидкості V_m переміщення леміша та коефіцієнтів a, b, c рівняння його площини.

Сумарний опір переміщенню лемішної частини робочого органу в ґрунті складається зі складової опору ґрунту F_{xl} та сил тертя по поверхні леміша, спроектованих на напрямок руху. Тоді загальна сила опору руху виразиться таким чином:

$$F_{xtl} = F_{xl} - \left(\sqrt{(F_{yl ml})^2 + (F_{zl nl})^2} \right) \operatorname{tg} \psi, \quad (2.22)$$

де ψ – кут тертя ґрунту по матеріалу поверхні леміша.

Графічно залежності загального опору руху та зміна щільності ґрунту для величин коефіцієнтів площини, близьким до раціональних, наведені на рис. 2.21.

Основною зміною, що досягається при роботі леміша, повинне бути ущільнення ґрунту для того, щоб у ньому зберігався простір для

протягнення екрану. При цьому щільність ґрунту повинна зростати. Оскільки на механічні властивості ґрунту впливу зробити не можна, то досягти його максимального ущільнення можна зміною кутів нахилу нормалі до поверхні леміша відносно до осей координат ґрунтового простору та зміною швидкості поступального руху робочого органу.

Аналізуючи вплив коефіцієнтів рівняння площини a, b, c на зміну щільності ґрунту (рис. 2.17), варто зазначити, що коефіцієнт нахилу b не впливає на зміну щільності ґрунту ρ_l , а збільшення коефіцієнта a призводить до зростання щільності ґрунту в зоні контакту. Аналогічно, зменшення коефіцієнта c призводить до зростання щільності ґрунту. До зростання щільності призводить і збільшення швидкості поступального руху робочого органу V_m . Разом із тим, варто брати до уваги й зміну складових сил опору руху робочого органу (рис. 2.18 -2.20).

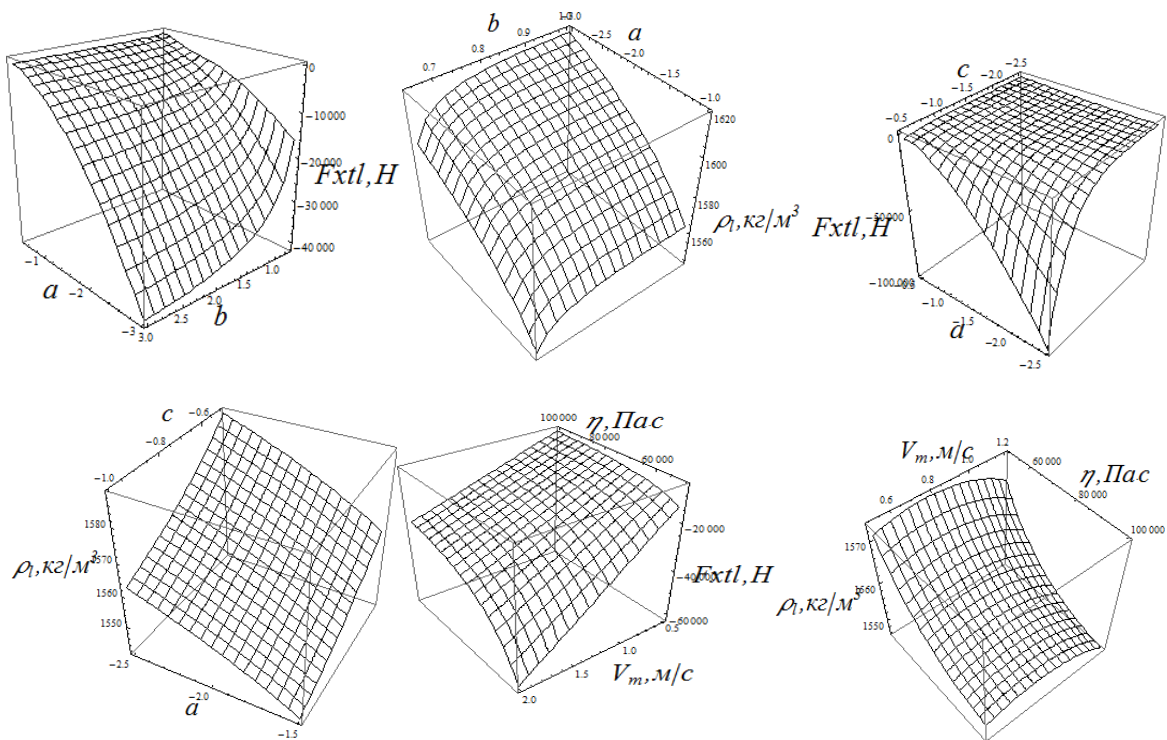


Рис. 2.21 Графіки залежностей опору руху леміша F_{xtl} в напрямку переміщення робочого органу та зміни щільності ґрунту ρ_l від модуля

в'язкості ґрунту η , швидкості V_m переміщення леміша та коефіцієнтів a, b, c рівняння його площини

Так, збільшення швидкості руху V_m , зменшення коефіцієнта c та збільшення коефіцієнта a призводять до зростання сил опору руху робочого органу. Тобто, для отримання необхідного ефекту ущільненої стінки щілини, яка забезпечить безперешкодне протягування екрану, необхідно витратити великі зусилля.

Таким чином, у результаті проведеного аналізу отримано компоненти швидкостей відносних деформацій ґрунту на поверхні контакту з лемішним робочим органом, а також компоненти напружень у ґрунті на поверхні контакту з лемішною частиною робочого органу. Отримано залежності ущільнення ґрунту та складові опору ґрунту руху робочого органу залежно від геометричних параметрів і режимів руху робочого органу, а також механічних властивостей ґрунту.

Дослідження показали, що для забезпечення безперешкодного протягнення екрану (мінімальне тертя екрану об стінки щілини) леміш може бути виконаний у вигляді площини з мінімально можливими коефіцієнтами $b < 1$ та $c < -1$, при цьому коефіцієнт $a \rightarrow -2$, з урахуванням геометричних розмірів такої площини. За таких параметрів площина леміша забезпечить максимально можливе ущільнення ґрунту за найменш можливого опору руху робочого органу.

2.5 Аналіз витрат енергії на протягування труби зволожувача з протифільтраційним екраном

У процесі протягування зрошувача в утвореній робочим органом порожнині на границі контакту поверхні труби зрошувача зі стінкою кротовини виникають сили тертя. При цьому потрібно враховувати, що тиск на стінки кротовини від дії сил тяжіння труби розподілений за певним

законом, отже, сили тертя при розподіленому навантаженні повинні бути визначені як добуток коефіцієнта тертя та інтегральної функції сили, яка розподілена за довжиною перерізу нижньої частини труби (рис. 2.22).

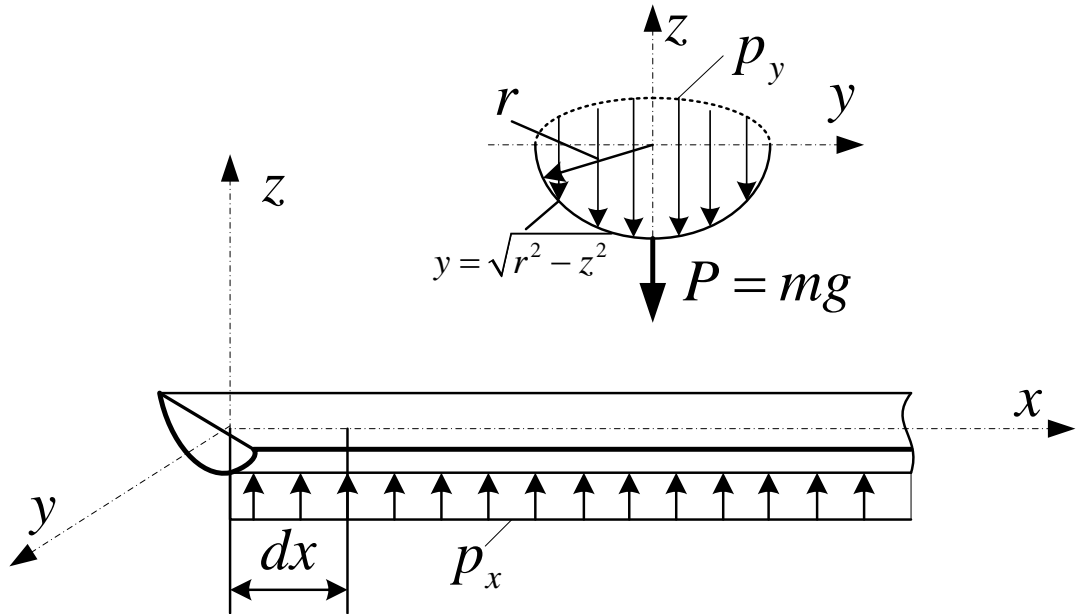


Рис. 2.22 Розподіл тиску труби зрошувача на дно утвореної кротовини

А з урахуванням сили, що розподілена за довжиною труби, – ще й як інтегральна функція отриманої сили тертя за поперечним перерізом труби.

Крива у поперечному перерізі yoZ поверхні труби, яка стикається з дном кротовини, визначається функцією:

$$y = \sqrt{r^2 - z^2}; z = \sqrt{r^2 - y^2}, \quad (2.23)$$

де r – радіус труби та, відповідно, радіус кротовини.

Розподілена по перерізу труби сила може бути отримана на підставі прирівнювання зосередженої сили тяжіння, віднесеної до проєкції перерізу на поперечну вісь, і криволінійного інтеграла першого роду, за яким визначається зосереджена сила від функції розподілу сили. Зв'язок

зосередженої сили з розподіленою по перерізу може бути записаний у вигляді:

$$\left(\frac{P}{2r}\right) = \frac{d}{dy} \int_{-r}^r p_y \sqrt{1+(z'[y])^2} dy, \text{ или } \left(\frac{P}{2r}\right) = p_y \sqrt{1+(z'[y])^2}, \quad (2.24)$$

де $P = mg$ – сила ваги елементарної довжини труби, m – маса елементарної ділянки довжини труби, p_y – розподілена по перерізу труби сила, $z'[y]$ – похідна функції z за y .

Підстановка у друге рівняння (2.24) значення похідної

$z'[y] = -\frac{y}{\sqrt{r^2 - y^2}}$ дає вираз:

$$P/2r = p_y \sqrt{1 + y^2/(r^2 - y^2)},$$

рішення якого відносно розподіленої сили призводить до виразу:

$$p_y = P / \left(2r \sqrt{r^2/(r^2 - y^2)}\right). \quad (2.25)$$

Інтегрування виразу (2.25) по довжині нижньої частини кола труби та множення його на коефіцієнт зовнішнього тертя матеріалу труби об ґрунт, а також з урахуванням того, що $P = mg$, дає питому силу тертя елементарної ділянки труби dx :

$$F_m = tg[\psi] \int_{-r}^r mg / \left(2r \sqrt{r^2/(r^2 - y^2)}\right) dy = \frac{g m \pi \sqrt{r^2} tg[\psi]}{4 |r|}. \quad (2.26)$$

Інтегрування виразу (2.26) по довжині протягнутого зрошувача дає вирази зміни зусилля протягування у функції довжини трубопроводу x :

$$F_t = \int \frac{g m \pi \sqrt{r^2} tg[\psi]}{4 |r|} dx = \frac{x g m \pi \sqrt{r^2} tg[\psi]}{4 |r|} \quad (2.27)$$

Аналогічно одержанню залежності (2.27), може бути отримана залежність сил тертя при протягуванні протифільтраційного екрана. При цьому рішення спрощується через відсутність необхідності застосування криволінійного інтеграла першого роду, оскільки поверхня контакту є площиною.

Розподілена сила тиску елементарної ділянки довжини екрана dx шириною $2b$ буде мати вигляд $p_{ye} = m_e g / (2b)$. Питома сила тертя елементарної ділянки екрана dx :

$$F_{me} = tg[\psi_e] \int_{-r}^r m_e g / (2b) dy = g m_e tg[\psi_e],$$

а вирази зміни зусилля протягування екрана у функції довжини зрошувача x :

$$F_{te} = \int g m_e tg[\psi_e] dx = x g m_e tg[\psi_e]. \quad (2.28)$$

Таким чином, аналізуючи залежності (2.27) та (2.28), можна зробити висновок про те, що на зусилля протягування зрошувальної труби та протифільтраційного екрана не впливають їхні геометричні розміри, а впливає питома, віднесена до одиниці довжини, маса та збільшення опору протягування, яке прямо пропорційне довжині труби (екрана). Крім того, істотно впливає коефіцієнт зовнішнього тертя матеріалу труби (екрана) об ґрунт.

2.6 Аналіз процесу створення склепіння після проходження лемішної частини робочого органу

При проходженні робочого органу, який утворює порожнину для протягування протифільтраційного екрана, у верхній частині утвореної порожнини змінюється напружено-деформований стан ґрунту. При цьому, цілком ймовірно виникнення такого напруженого стану, за якого верхня частина утвореної порожнини залишається незруйнованою внаслідок виникнення напруженого стану, що характеризується

утворенням склепіння. Такі явища широко відомі в механіці сипучих середовищ, які є частковим випадком теорії пластичності. Як відомо, ґрунт може бути представлений як пластичне середовище, зокрема сипке зв'язане середовище. Це показали ще Хаар і Карман [93].

Тому якщо уявити ґрунт як сипке зв'язане середовище (окремий випадок теорії пластичності), то для нього може бути застосований критерій міцності k у вигляді [62]:

$$k = \frac{-3(\sigma \sin[\phi] + \tau_0 \cos[\phi])}{-3 + \sin[\phi]}, \quad (2.29)$$

де σ – гідростатичне напруження на поверхні можливого ковзання по лінії руйнування, ϕ – кут внутрішнього тертя ґрунту, τ_0 – початкове напруження зсуву (або часто вживаний термін «коефіцієнт зчеплення»).

Для плоского напруженого стану в площині zOy , перпендикулярній напрямку руху робочого органу, гідростатичне напруження матиме вигляд:

$$\sigma = \frac{\sigma_y + \sigma_z}{3}.$$

Величини компонент напружень σ_y, σ_z були визначені вище при аналізі взаємодії лемішної частини робочого органу з ґрунтом.

Дві інші складові критерію міцності є величинами, заданими механічними властивостями ґрунту, які залежать від типу ґрунту, його щільності та вологості.

Якщо взяти до уваги те, що після проходження робочого органу в ґрунті утворюється клиноподібне (лінії ковзання середовища спрямовані під кутом до вертикалі) розущільнене тіло, причому, як прийнято в загальному описі процесу обробки ґрунту, кут нахилу ліній ковзання становить кут, рівний куту внутрішнього тертя ϕ , а середовище, яке

знаходиться поза межами клиноподібного тіла, залишається у первісному стані, – то ґрунт всередині ліній ковзання можна розглядати як середовище, що знаходиться в ємності, обмеженій лініями ковзання. Беручи до уваги вищевикладене, до середовища, яке знаходиться у квазіємності з кутами нахилу стінок, рівними кутам нахилу ліній ковзання ϕ , можуть бути застосовані закони, що описують поведінку сипучого середовища (окремий випадок теорії пластичності) в ємності, обмеженій стінками (рис. 2.23).

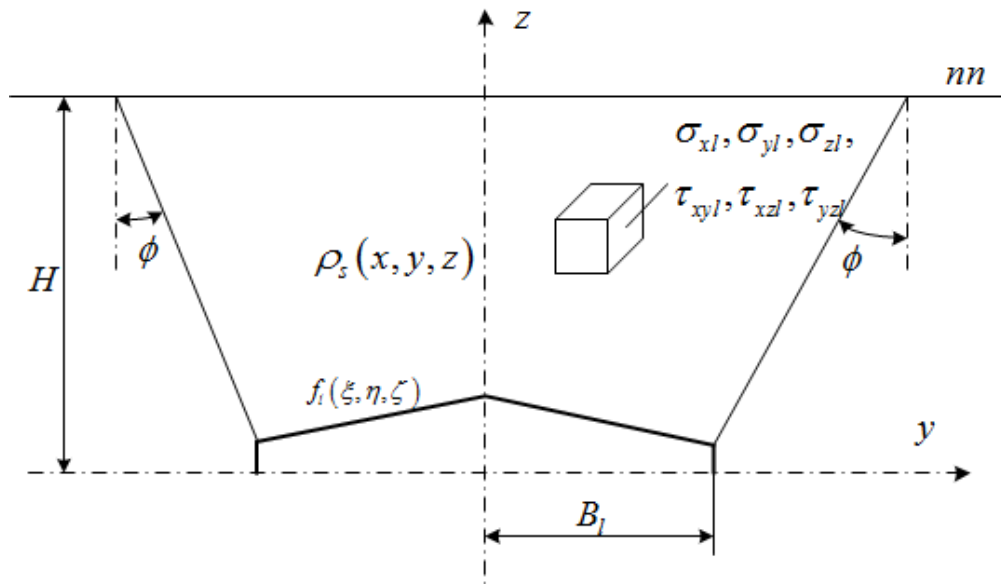


Рис. 2.23 Схема квазіємності з ґрунтом, яка створює напруження на верхню частину утвореної порожнини

У цьому випадку гідростатичне напруження в клиноподібному просторі може бути описане залежністю [41]:

$$\sigma = \frac{1}{3} b \rho g \left(1 + e^{\left(\frac{-z}{2\pi R} \right)} \operatorname{arctg} \left[\frac{R}{r + R} \right] \right) (\sin[\phi] - 3), \quad (2.30)$$

де b – якийсь експериментальний коефіцієнт, що залежить від типу матеріалу та знаходиться в межах 0.5—1.5; ρ – щільність матеріалу. Рівняння (2.30) записане в циліндричній системі координат за відсутності кручення, тому воно легко може бути трансформоване для плоскої

Декартової системи, якщо R – найбільший радіус ємності, в якій визначаються напруження, замінити на $(B_l + H \operatorname{tg}[\phi])$, де B_l – ширина леміша, H – глибина ходу робочого органу, z – поточне значення вертикальної координати, $r \rightarrow y$ – поточне значення поперечної координати, в якій визначаються напруження, то вираз матиме вигляд:

$$\sigma = \frac{1}{3} b g \rho \left(1 + e^{-\frac{z}{b+H \operatorname{tg}[\phi]}} \operatorname{arctg} \left[\frac{b + H \operatorname{tg}[\phi]}{b + y + H \operatorname{tg}[\phi]} \right] \right) (-3 + \sin[\phi]). \quad (2.31)$$

Згідно з [62], компоненти напружень на границі склепіння мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma - \frac{2}{3} k + 2k \cos[\alpha]^2; \quad \sigma_z = \sigma - \frac{2}{3} k + 2k \sin[\alpha]^2; \\ \tau_{zy} &= 2k \cos[\alpha] \sin[\alpha], \quad \alpha = \pi/2 + \sqrt{z/H} + \sqrt{y/B} \end{aligned} \quad (2.32)$$

З урахуванням вищевикладених залежностей (2.31) - (2.32), критичне напруження, при якому відбудеться руйнування ґрунту у склепінні утвореної порожнини, матиме вигляд:

$$k_{kr} = \frac{e^{-\frac{z}{b+H \operatorname{tg}[\phi]}} \left(-b g \rho \operatorname{arctg} \left[\frac{b + H \operatorname{tg}[\phi]}{b + y + H \operatorname{tg}[\phi]} \right] (-1 + \cos[2\phi] + 6 \sin[\phi]) - \right.}{(-3 + \sin[\phi])^2} \left. - e^{-\frac{z}{b+H \operatorname{tg}[\phi]}} (\tau_0 \cos[\phi] (-9 + \sin[\phi]) + b g \rho (-1 + \cos[2\phi] + 6 \sin[\phi])) \right) \quad (2.33)$$

Графічно залежність (2.33) представлена на рис. 2.24.

Якщо порівнювати значення критичного напруження руйнування ґрунту та максимальні зсувні напруження, які виникають в процесі взаємодії лемішної частини робочого органу з ґрунтом, то можна зробити висновок про те, що максимальні зсувні напруження, викликані лемішною частиною робочого органу k_l , не перевищують критичних напружень

Kkr , за яких можливе руйнування ґрунту в зоні утвореної робочим органом порожнини.

Таким чином, при правильному виборі раціональних геометричних параметрів і режимів роботи лемішної частини робочого органу в ґрунті може бути утворена стійка до руйнування порожнина, в якій простягається протифільтраційний екран без затиснення його обрушеним склепінням утвореної порожнини.

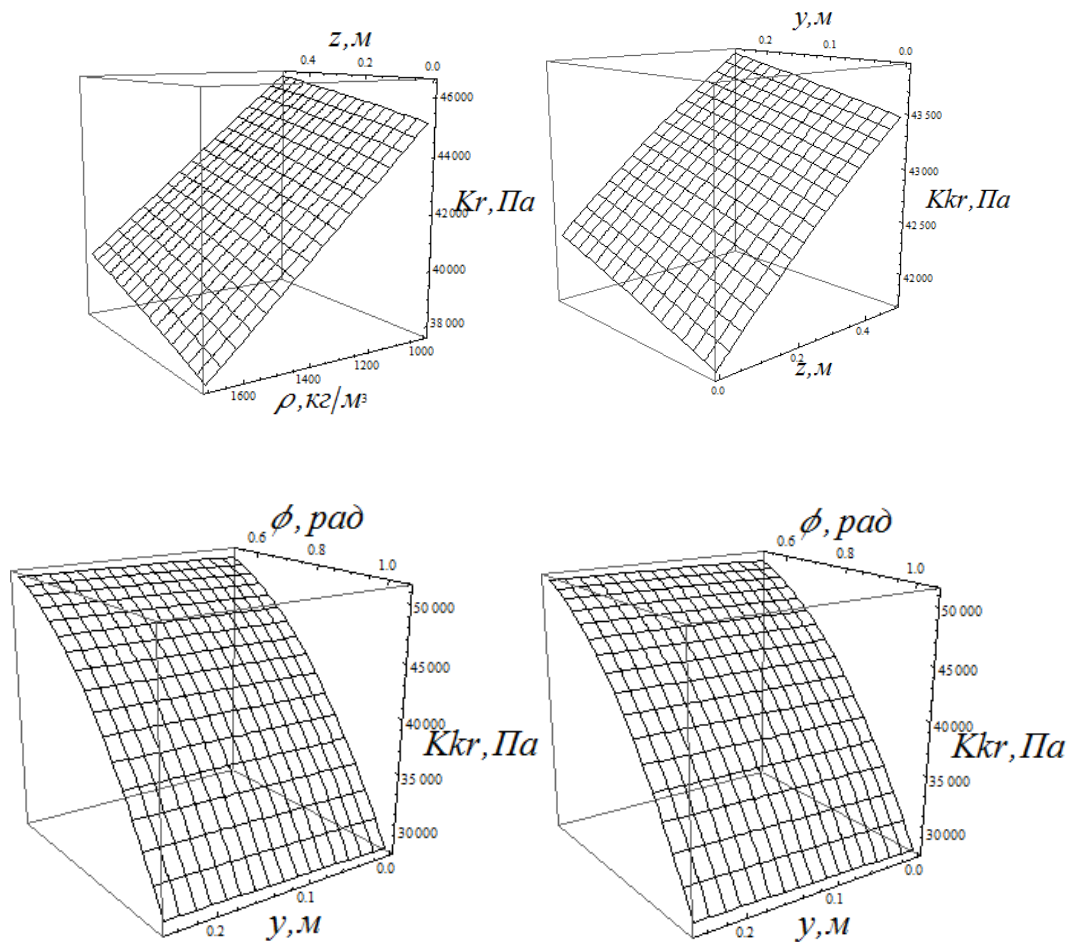


Рис. 2.24 Залежність критичного напруження руйнування ґрунту від координат порожнини та механічних властивостей ґрунту

За своєю суттю значення Kkr – критичне дотичне напруження, яке створюється у склепіння ґрунту силою ваги вище ґрунту, лежачого в

умовному конусі розуцільненого у верхній частині ґрунту та уцільненого в зоні проходу леміша.

За умовою міцності (залежність 2.29), лемішна частина створює величину критичного напруження, яка визначається з урахуванням залежностей (2.18), як $k_l = \frac{-3(\sigma_l \sin[\phi] + \tau_0 \cos[\phi])}{-3 + \sin[\phi]}$, та може бути графічно відображена на рис. 2.25.

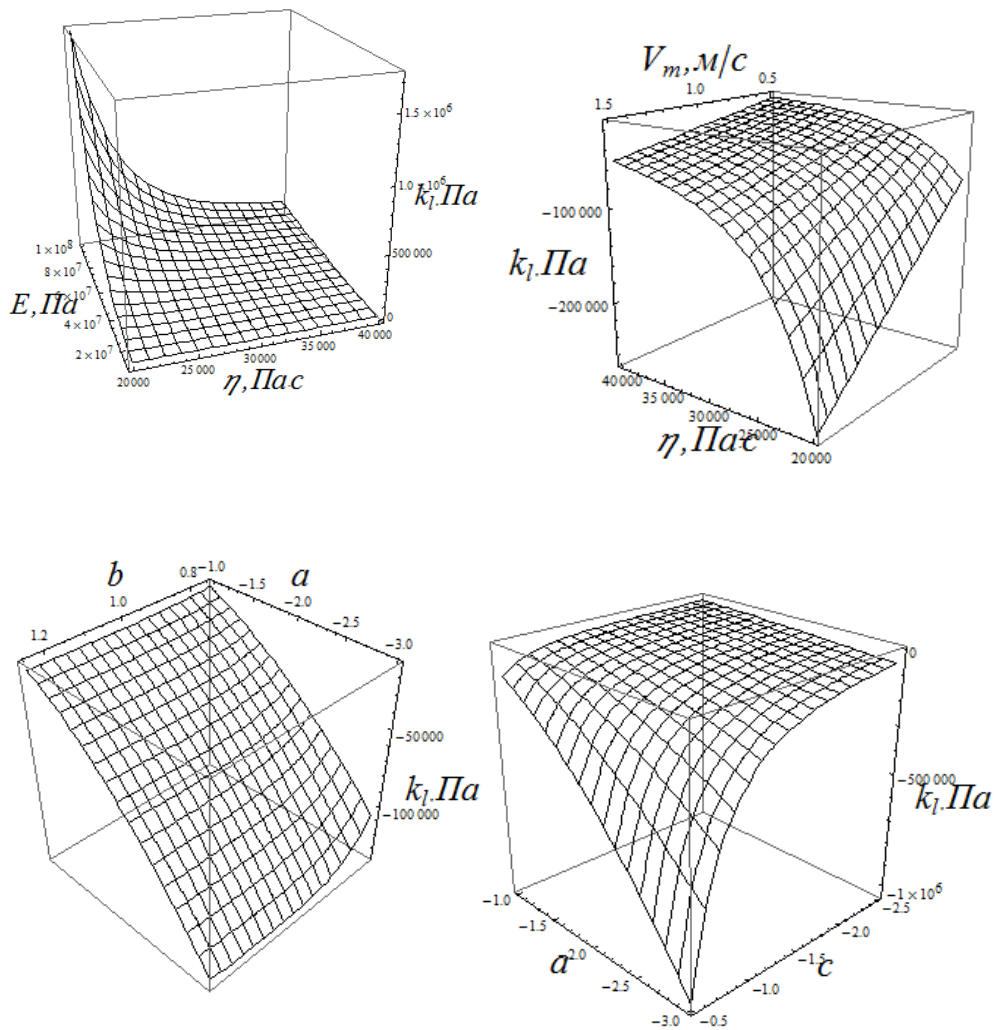


Рис. 2.25 Залежність критичних напружень, створюваних лемішною частиною робочого органу на поверхні контакту його з ґрунтом, тобто поверхні склепіння, від параметрів леміша, швидкості його руху та властивостей ґрунту

Аналізуючи величини критичних напружень Kkr , створених вагою клина ґрунту над порожниною (рис. 2.23) у верхній частині порожнини, утвореної лемішною частиною робочого органу, та критичними напруженнями k_l , створеними у верхній частині порожнини лемішною частиною робочого органу (рис. 2.24), за різних його параметрів і властивостей ґрунту, можна дійти до висновку, що критичні напруження, створені вагою ґрунту, не перевищують у переважній частині областей існування параметрів леміша та властивостей ґрунту критичних напружень, створених лемішем. Це дозволяє судити про те, що верхня частина порожнини є стійкою проти руйнування та не повинна перешкоджати протягненню протифільтраційного екрана.

2.7 Висновки по розділу

На підставі проведеного аналізу динаміки контактної взаємодії робочого органу з ґрунтом встановлені компоненти нормальних і зсувних напружень ґрунту на поверхні контакту. Визначено напрямки й величини ущільнення ґрунту залежно від його механічних властивостей, геометричних параметрів робочого органу та швидкості поступального переміщення. Визначено складові сил опору ґрунту руху робочого органу в ґрунті залежно від геометричних параметрів та швидкості поступального переміщення, а також механічних властивостей ґрунту.

Аналізуючи залежності ущільнення ґрунту в стінках утвореної кротовини та опір ґрунту пересуванню робочого органу, можна зробити висновок, що для більшості ґрунтів за механічними характеристиками найбільш раціональними будуть такі геометричні параметри конусної частини робочого органу: загострення $a \approx 0.02$, радіус основи конуса $r \approx 1.1r_t$, де r_t – радіус труби зрошувача, швидкість руху $V_m \approx 1 \text{ м/с}$.

На основі аналізу взаємодії лемішної частини робочого органу визначено функції зміни щільності ґрунту в стінках утвореної кротовини.

Отримано компоненти опору переміщенню лемішної частини робочого органу залежно від параметрів конуса та механічних властивостей ґрунту.

Таким чином, дослідження показали, що для забезпечення безперешкодного протягнення екрану (мінімальне тертя екрану об стінки щілини) леміш може бути виконаним у вигляді площини з мінімально можливими коефіцієнтами $b < 1$ та $c < -1$, при цьому коефіцієнт $a \rightarrow -2$, з урахуванням геометричних розмірів такої площини. За таких параметрів площину леміша забезпечить максимально можливе ущільнення ґрунту при найменш можливому опорі руху робочого органу.

Аналізуючи величини критичних напружень у верхній частині порожнини, утвореної лемішною частиною робочого органу, створених вагою клину ґрунту над порожниною, та критичними напруженнями, створеними у верхній частині порожнини лемішною частиною робочого органу, за різних його параметрів і властивостей ґрунту дозволяє судити про те, що верхня частина порожнини є стійкою проти руйнування й не повинна перешкоджати протягуванню протифільтраційного екрана.

Аналіз опору протягування зрошувальної труби та протифільтраційного екрана свідчить про те, що на зусилля протягування зрошувальної труби й екрану не впливають їхні геометричні розміри, а впливає питома, віднесена до одиниці довжини, маса й збільшення опору протягування, яке прямо пропорційне довжині труби (екрану). Крім того, істотно впливає коефіцієнт зовнішнього тертя матеріалу труби (екрану) об ґрунт.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Програмою експериментальних досліджень передбачалось:

- визначення механічних властивостей ґрунту, а саме щільності ρ , $г/см^3$, модуля пружності E , $Па$, коефіцієнта в'язкості μ , $Пас$, початкового напруження зсуву τ_0 , $Па$;
- перевірка адекватності отриманих теоретичних залежностей ущільнення ґрунту конусною і лемішною частинами робочого органу для утворення кротовини;
- перевірка адекватності отриманих теоретичних залежностей опору переміщенню робочого органу для утворення кротовини;
- перевірка адекватності отриманих теоретичних залежностей протягнення зволожувача з протифільтраційним екраном.

На підставі аналізу літературних даних і проведених теоретичних досліджень основними факторами, що впливають на виконання процесу утворення кротовин і протягнення зволожувача з протифільтраційним екраном, є стан ґрунтового середовища, тип і властивості ґрунтового середовища, геометричні параметри та режими роботи робочого органу для утворення кротовин.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися як стандартні методики, так і розроблені автором і його керівником.

3.2 Методика експериментальних досліджень

3.2.1 Методика визначення ущільнення ґрунту робочим органом для утворення кротовин

Щільність ґрунту визначали в польових умовах за природного складання й у зрізі утвореної кротовини буровим методом

М. О. Качинського [56], який заснований на відбиранні зразка ґрунту непорушеного складання з допомогою циліндра-бура певного об'єму. Для орних рихлих горизонтів використовуються циліндри об'ємом 500 см³, для нижчих щільних – 100-200 см³.

У наших дослідженнях циліндр-бур об'ємом 100 см³ забивали дерев'яним молотком у зріз ґрунту в площині, перпендикулярній осі утвореної кротовини. Ґрунт у верхній і нижній частинах циліндра підрізали ножом врівень із краями циліндра й поміщали у попередньо зважені металеві бюкси, після висушування яких при температурі 105 °С визначали вологість ґрунту.

Щільність складання розраховували за формулою:

$$d_v = \frac{P}{V},$$

де P – маса сухого ґрунту, г; V – об'єм циліндру, см³ ($V = \pi r^2 h$, де h – висота циліндра-бура, см; r – внутрішній радіус загостреного кінця циліндра, см).

$$P = 100 / (100 + W) \times a,$$

де a – маса вологого ґрунту, г; W – вологість ґрунту, %.

Дослідження проводили у 5-разовому повторенні.

3.2.2 Методика визначення механічних властивостей ґрунту

Для визначення таких властивостей ґрунту, як модуль поздовжньої пружності E , модуль зсуву G , коефіцієнт Пуассона ν , об'ємний модуль K , використана методика, запропонована В. П. Ковбасою, щодо визначення об'ємного модуля пружності та коефіцієнта в'язкості шляхом дослідження загасання коливань тягаря на поверхні ґрунту [59].

У фізичні рівняння зв'язку напружень із деформаціями входять такі реологічні показники ґрунту: модулі пружності об'ємних K та зсувних G деформацій, коефіцієнти в'язкості об'ємних μ та зсувних η деформацій.

Методика досліджень цих показників, яка розроблена А. С. Кушнар'євим [77], базувалася на вивченні коливань ґрунтових зразків.

Для вимірювання загасаючих коливань ґрунтового зразка нами було спроектовано та виготовлено прилад. Схема приладу та його зовнішній вигляд представлені на рисунках 3.1 та 3.2.

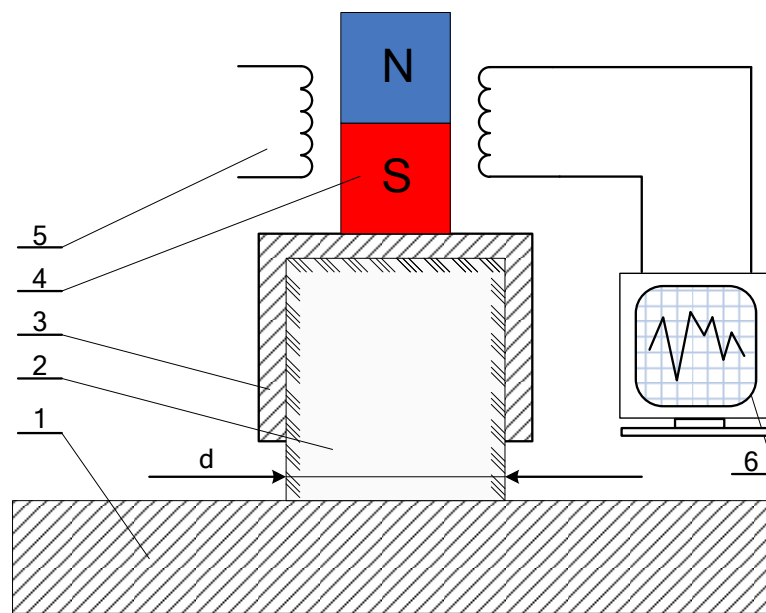


Рис. 3.1 Схема приладу для визначення модулів пружності та в'язкості ґрунту: 1 – станина; 2 – ґрунтовий зразок; 3 – стакан; 4 – постійний магніт; 5 – котушка (~ 35000 витків); 6 – комп'ютер з АЦП L-305

Прилад складається зі станини 1, на якій встановлений ґрунтовий зразок 2, склянки 3 з постійним магнітом 4, котушки 5, яка має 35000 витків дроту діаметром 0,1 мм. Склянка з постійним магнітом надівається на ґрунтовий зразок. Склянка має вигляд відрізка пластикової труби з зовнішнім діаметром 52 мм, товщина стінки 3 мм і висота 35 мм, один кінець якої запаяний кришкою з приклеєним постійним магнітом. Кінці обмотки котушки підключаються до входу комп'ютера зі встановленим аналого-цифровим перетворювачем (L – 305) і програмою ПОС-16. Для визначення маси зразка ґрунту використовувалися ваги ВТК – 500.

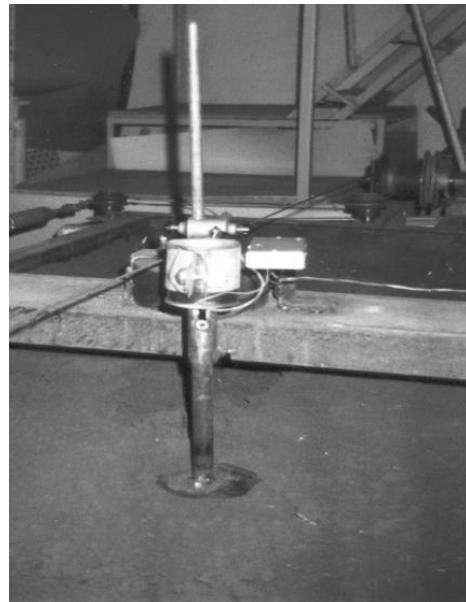
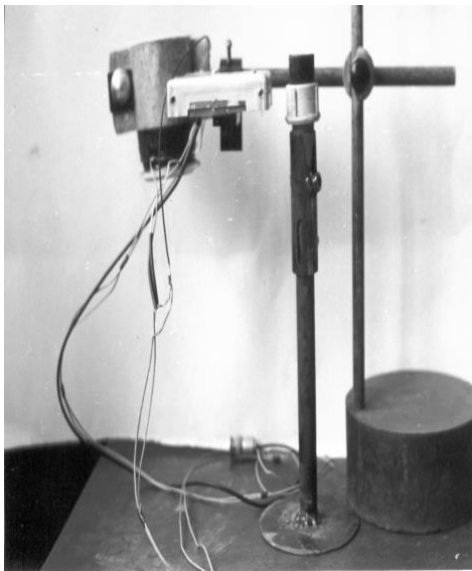


Рис. 3.2 Загальний вигляд приладу для визначення модулів пружності та в'язкості ґрунту

Як апаратуру для реєстрації використовували плату АЦП L-305 фірми «L-card». Цю плату можна використовувати як засіб для багатоканального збору інформації, а також завершену систему з власним процесором, яка дозволяє користувачеві реалізувати власні алгоритми обробки сигналів на рівні програмувань установленого на платах сигнального процесора американської фірми Analog Devices. До

комплекту поставки плати входило програмне забезпечення «Oscilloscope» з функцією прямого запису на диск. Програма OSCIL призначена для роботи з аналого-цифровими платами, які випускаються фірмою «L-card». Програма дозволяє здійснювати ввід-вивід аналогових сигналів, тестування плат за наявності спеціальної тестової заглушки, зберігати введені сигнали у файлі, а також виконувати спектральний аналіз сигналів, які вводяться, й роздруковувати графіки.

Комплект поставки плати дозволяє:

- здійснювати багатоканальне введення аналогових каналів із частотою до 300 кГц на канал;
- здійснювати асинхронне введення з різних аналогових каналів;
- керувати цифро-аналоговим перетворювачем водночас із аналоговим введенням;
- вводити в трьох режимах: програмному, безпосереднього доступу до пам'яті та генерації переривань IRQ;
- керувати цифровими лініями в асинхронному режимі.

Управління платою й обмін даними здійснювалися через двонаправлений порт даних з бітами готовності, що автоматично встановлюються й скидаються. Управління аналоговим вводом і виводом, частотою перетворення і т. п. здійснюється процесором ADSP-2105. За допомогою режиму порту й порту даних до процесора можна завантажити програму, яка буде здійснювати необхідні алгоритми вводу-виводу. Фірмовий драйвер Lbios працює за принципом команд, коли управління відбувається за двома лініями: через порт команд програми в процесорі передається номер команди, а через порт даних здійснюється передача параметрів і даних. При записуванні числа в порт команд число записується в порт даних і одночасно з цим у процесорі ADSP генерується переривання IRQ2.

Усіма периферійними пристроями на платі управляє процесор ADSP через власний простір адреси вводу-виводу. Комп'ютеру доступний лише реєстр даних, через який відбувається обмін даними між комп'ютером і процесором ADSP.

Вивчення послідовних амплітуд і періодів загасаючих коливань дозволило визначити властивості ґрунту. При цьому модуль пружності об'ємних та зсувних деформацій визначається за формулами:

$$K = \frac{4P_0 l \left[\left(\ln(A_1 / A_2) \right)^2 + 4\pi^2 \right]}{\pi g d^2 T^2 k^2}; \quad G = \frac{4P_0 l \left[\left(\ln(A_1 / A_2) \right)^2 + 4\pi^2 \right]}{\pi g d^2 T^2 \nu^2}, \quad (3.1)$$

де d, l, P_0 – діаметр, довжина та маса зразка ґрунту;

T, A_1, A_2 – період і амплітуди послідовних коливань зразків ґрунту;

k, ν – розв'язок відповідних трансцендентних рівнянь.

Залежності для визначення коефіцієнта в'язкості при об'ємних μ та зсувних η деформаціях мають вигляд:

$$\mu = \frac{8P_0 l \ln(A_1 / A_2)}{\pi g d^2 T}; \quad \eta = \frac{3P_0 \ln(A_1 / A_2)}{\pi g d T} \quad (3.2)$$

Характерна осцилограма коливань ґрунту наведена на рис. 3.3.

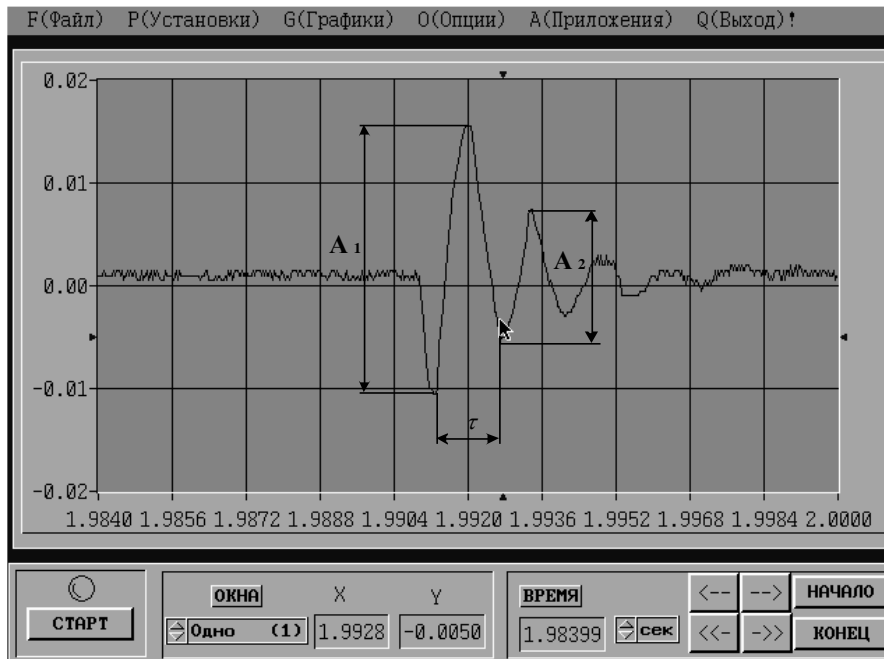


Рис. 3.3 Характерна осцилограма коливань ґрунту, записана з використанням програми ПОС-16 та АЦП L-305

3.2.3 Методика визначення тягового опору робочого органу для утворення кротовини при проході без протягування зволожувача та з протягуванням його разом із протифільтраційним екраном

Для визначення адекватності теоретичних залежностей опору руху робочого органу для утворення порожнини, в якій протягується зрошувач із протифільтраційним екраном, а також опору протягування зрошувача з екраном разом із одночасним утворенням порожнини був виготовлений експериментальний зразок робочого органу, загальний вигляд якого представлений на рис. 3.4.

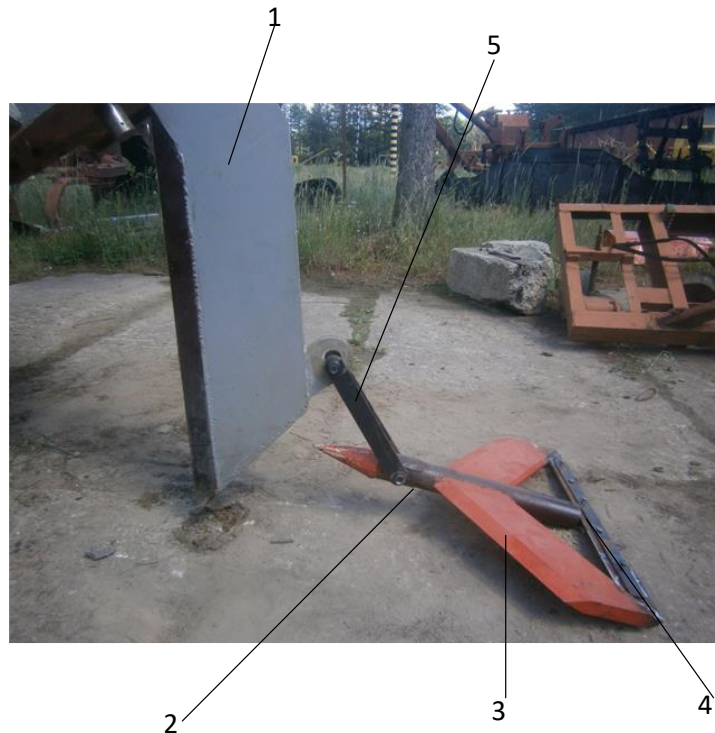


Рис. 3.4 Загальний вигляд робочого органу для протягнення зрошувача з протифільтраційним екраном, закріпленого до стійки щілинорізу, 1 – стійка щілинорізу, 2 – кротовиноутворювальна частина, 3 – лемішна частина, 4 – затискна частина для кріплення протифільтраційного екрану, 5 – тяговий повідок для самовстановлення робочого органу

Усі тензометричні дослідження проводилися на експериментальній базі кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин та обладнання Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне).

Вимірювання тягового опору руху робочого органу проводили за наступною методикою.

На першому етапі визначався тяговий опір руху стійки щілинорізу без закріпленого до неї робочого органу.

Далі визначався сумарний опір руху стійки P_c із закріпленим на ній робочим органом для утворення порожнини. При цьому опір руху

робочого органу для утворення порожнини визначався як різниця сумарного опору за виключенням опору стійки $P_{po} = P_s - P_c$, де P_t , P_{cc} – опір робочого органу і вимірний опір, відповідно.

На наступному етапі проводили динамометрування системи: стійка з робочим органом та закріпленою трубою зрошувача. При цьому зусилля протягування труби зрошувача визначалися як різниця $P_t = P_{cc} - P_c$, де P_t , P_{cc} – опір протягування труби зрошувача робочого органу й вимірний опір, відповідно.

На завершальному етапі тензометрування проводили протягнення всього комплексу, що складається зі стійки із закріпленим на ній робочим органом та прикріпленої до неї системи зрошувача у вигляді труби з протифільтраційним екраном. При цьому опір протягування протифільтраційного екрану визначався як різниця $P_e = P_{ccc} - P_{cc}$, де P_{ccc} , P_{cc} – опір протягуванню всієї системи й опір протягування, який отриманий у попередньому експерименті.

Усі вимірювання опорів проводили у триразовому, тобто мінімально допустимому, повторенні. Це пов'язано з великою трудомісткістю й затратністю проведення експериментальних досліджень.

Вимірювання тягових опорів проводилися з використанням електронного динамометра «Індикатор ІЕ-03-В», реєстрація сигналу з якого передавалася через АЦП в комп'ютер (рис. 3.5), у якому реєструвалася цифрова інформація про силу в реальному часі. Перед застосуванням вказаного вище індикатора сили проводилося попереднє грубе вимірювання сили тяги стрілочним динамометром.



Рис. 3.5 Агрегат, підготовлений до протягнення робочого органу без труби зрошувача та протифільтраційного екрана

Усі експерименти з тензометрування проводили з використанням двох тракторів, які були загретовані цугом. Між тракторами була встановлена тензометрична апаратура рис. (3.6 - 3.7).



Рис. 3.6 Агрегатування агрегата цугом для попереднього визначення тягового зусилля



Рис. 3.7 Агрегатування агрегату цугом із ввімкненою тензOMETричною апаратурою

При цьому тягове зусилля, необхідне для переміщення трактора, на якому встановлювався робочий орган, визначалося холостим його протягненням із реєстрацією зусиль.

Така схема вимірювань була викликана відсутністю тензометричної навісної системи трактора. При цьому передній трактор був чисто тяговим, а задній використовувався для агрегування навісного обладнання.

3.2.4 Методика статистичної обробки результатів експериментальних досліджень

При проведенні експериментальних досліджень, пов'язаних із істотними матеріальними витратами, реалізація необхідної кількості повторень із метою отримання достатньої вибірки практично нездійсненна. Тому при оцінюванні результатів малої вибірки величина генеральної дисперсії в розрахунках не використовується. Для визначення можливих меж помилки користуються критерієм Стьюдента:

$$t = \frac{\tilde{x} - \bar{x}}{m_{mv}}$$

де $m_{mv} = \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}$ – міра випадкових коливань вибіркової середньої в малій вибірці, \tilde{x} – вибіркова середня експерименту, \bar{x} – теоретичне значення.

Величина σ обчислюється на основі даних вибіркового спостереження:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \tilde{x})^2}{n}},$$

де x_i – спостережуване значення.

Гранична помилка малої вибірки розраховується аналогічно:

$$\Delta_{m\bar{x}} = tm_{m\bar{x}}$$

Незалежно від виду вибірки, на кінцевому етапі визначаються довірчі інтервали, в яких може перебувати генеральна середня (для кількісних ознак) або генеральна частка (для якісних ознак). Довірчі інтервали – це область значення генеральної середньої, вихід за межі якої має дуже малу ймовірність. Довірчі інтервали визначаються для малої вибірки:

$$\tilde{x} - \Delta_{m\bar{x}} < \bar{x} + \Delta_{m\bar{x}}.$$

Тут наведено принцип обробки результатів експериментальних досліджень та визначення їхньої адекватності за певного рівня надійної ймовірності. На практиці для обробки результатів застосовувався пакет статистичної обробки Statistica.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Результати експериментальних досліджень тягових зусиль для легкосуглинкового ґрунту

4.1.1 Результати визначення механічних властивостей ґрунту

При проведенні експериментальних досліджень з метою визначення адекватності одержаних теоретичних результатів необхідно було визначити механічні властивості ґрунту.

Визначення механічних властивостей проводилося згідно з методикою, описаною в п. 3.2.2.

Виходячи з раніше отриманих регресійних рівнянь [46], були отримані модуль пружності та модуль в'язкості об'ємних деформацій, а також значення початкового напруження зсуву ґрунту.

Обробка результатів експериментальних досліджень проводилася методами регресійного аналізу із застосуванням пакету статистичної обробки та аналізу даних "Statistica 6".

Ґрунт при проведенні експериментальних досліджень був визначений, як легкосуглинковий.

Вологість у горизонті проходження робочого органу (на глибині 0,5 м) становила $W = 16 \div 18 \%$, щільність ґрунту $\rho_s = 1350 \div 1400 \text{ кг} / \text{м}^3$.

У результаті використання даних експериментальних досліджень із застосуванням регресійних рівнянь зв'язку модуля пружності K_1 , коефіцієнта в'язкості η_1 та початкового напруження зсуву τ_{01} зі щільністю ρ_s та вологістю W для легкосуглинкового ґрунту рівняння регресії мають вигляд:

– модуль пружності об'ємних деформацій:

$$K_1 = 1,64 \cdot 10^7 + 255778W^2 - 6050W\rho_s + 29\rho_s^2. \quad (4.1)$$

З урахуванням зв'язку між пружними характеристиками, який виражається через коефіцієнт бокового розширення (в теорії пружності коефіцієнт Пуассона) ν модуль пружності лінійних деформацій $E = 3K_1(1 - 2\nu)$, тоді (4.1) можна записати у вигляді:

$$E = 3(1 - 2\nu)(1,64 \cdot 10^7 + 255778W^2 - 6050W\rho_s + 29\rho_s^2). \quad (4.1.a)$$

– модуль в'язкості об'ємних деформацій:

$$\mu_1 = 221382 - \frac{514862}{W} + 65,7\rho_s - 4,5W\rho_s \quad (4.2)$$

Аналогічно зв'язок зсувного модуля з об'ємним виражається залежністю $\eta_1 = \frac{3\mu_1(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$. Тому перехід до модулю в'язкості зсувних

деформацій призводить до залежності:

$$\eta_1 = \frac{3\mu_1(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \left(221382 - \frac{514862}{W} + 65,7\rho_s - 4,5W\rho_s \right). \quad (4.2.a)$$

Значення початкового напруження зсуву для легкосуглинкового ґрунту виражається залежністю:

$$\tau_{01} = 591.34 + 0.52W^2 + 0.0248W\rho_s + 0.0004\rho_s^2, \quad (4.3)$$

Графічно залежності (4.1.a), (4.2.a) і (4.3) представлені на рисунку 4.1.

Механічні властивості ґрунту, на якому проводилися експериментальні дослідження, що отримані за регресійними

залежностями (4.1) і (4.2), збігалися з визначеними за методикою п. 3.2. з надійною ймовірністю $P = 0.8$.

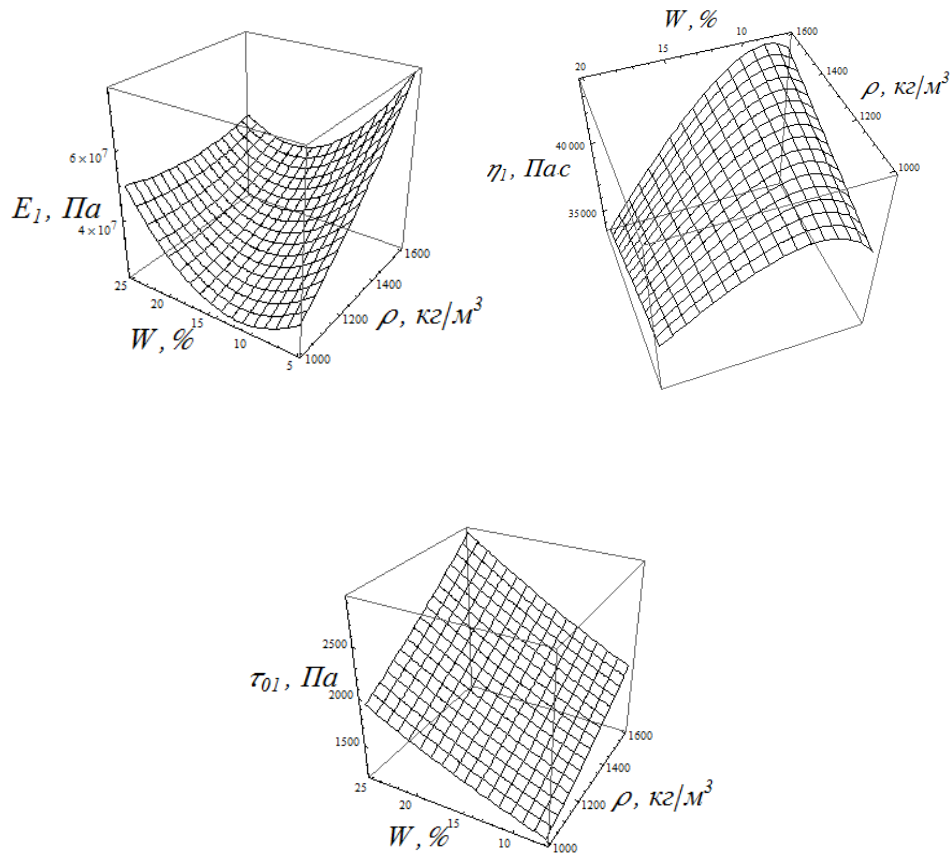


Рис. 4.1 Залежності модуля пружності лінійних деформацій E_1 , модуля в'язкості зсувних деформацій η_1 та початкового напруження зсуву ґрунту τ_{01} від щільності ρ_s й вологості W для легкосуглинистого ґрунту

При конкретних значеннях щільності й вологості, значення зазначених механічних величин дорівнювали:

$$E_1 = 3,626 \cdot 10^7 \text{ Па}, \quad \eta_1 = 37767 \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad \tau_{01} = 2077 \text{ Па}.$$

За таких механічних властивостей ґрунту проводилося тензометрування робочого органу й протягування зрошувальної труби разом із протифільтраційним екраном.

4.1.2 Результати визначення тягових зусиль для легкосуглинкового ґрунту

Експериментальні дослідження з визначення складових тягового зусилля для визначення адекватності теоретичних досліджень і перевірки працездатності пристрою проводилися на експериментальній базі Національного університету водного господарства та природокористування (с. Любомирка Рівненської області). На експериментальній базі були ділянки легкосуглинкового та середньосуглинкового ґрунту.

Методика проведення експериментальних досліджень описана вище. Процес протягування зрошувальної труби з протифільтраційним екраном і фрагмент розкопки покладеної труби з екраном наведені на рис. 4.2 і 4.3.

У результаті проведення експерименту були отримані чисельні значення тягових зусиль. На підставі цього, згідно з методикою, наведеною у п. 3.2.3, побудували осцилограми (рис. 4.4 - 4.7).



Рис. 4.2 Початок протягування труби зрошувача разом із протифільтраційним екраном



Рис. 4.3 Загальний вигляд укладеної труби зрошувача з протифільтраційним екраном

Результати обробки результатів динамометрування, проведені при експериментальних дослідженнях, показали адекватність отриманих теоретичних залежностей опору ґрунту переміщенню робочого органу (сума залежностей 2.14.а, 2.22) за рівня значущості $\alpha = 0.25$.

При цьому використовувався робочий орган із такими геометричними параметрами: $L_l = -B \text{Cos}[1/a]$, де $B = 0.3$ – ширина одного леміша, м; $h = 0.8$ – висота леміша в зоні зіткнення з конусною частиною, м; $a = -2$ – коефіцієнт нахилу нормалі до поверхні леміша до осі ox , $b = 0.75$, $c = -1.5$ – коефіцієнти нахилу нормалі до поверхні леміша до осей oy, oz , відповідно. При цьому властивості ґрунту були такими: напруження початкового зсуву – $\tau_0 = 2000 \text{ Па}$, коефіцієнт бокового розширення $\nu = 0.4$, щільність $\rho = 1400 \text{ кг} / \text{м}^3$, модуль в'язкості зсувних деформацій $\eta_1 = 3.8 \cdot 10^4 \text{ Па с}$, модуль пружності лінійних деформацій $E = 3.63 \cdot 10^7 \text{ Па}$, кут зовнішнього тертя по поверхні леміша $\psi = \pi/4$.

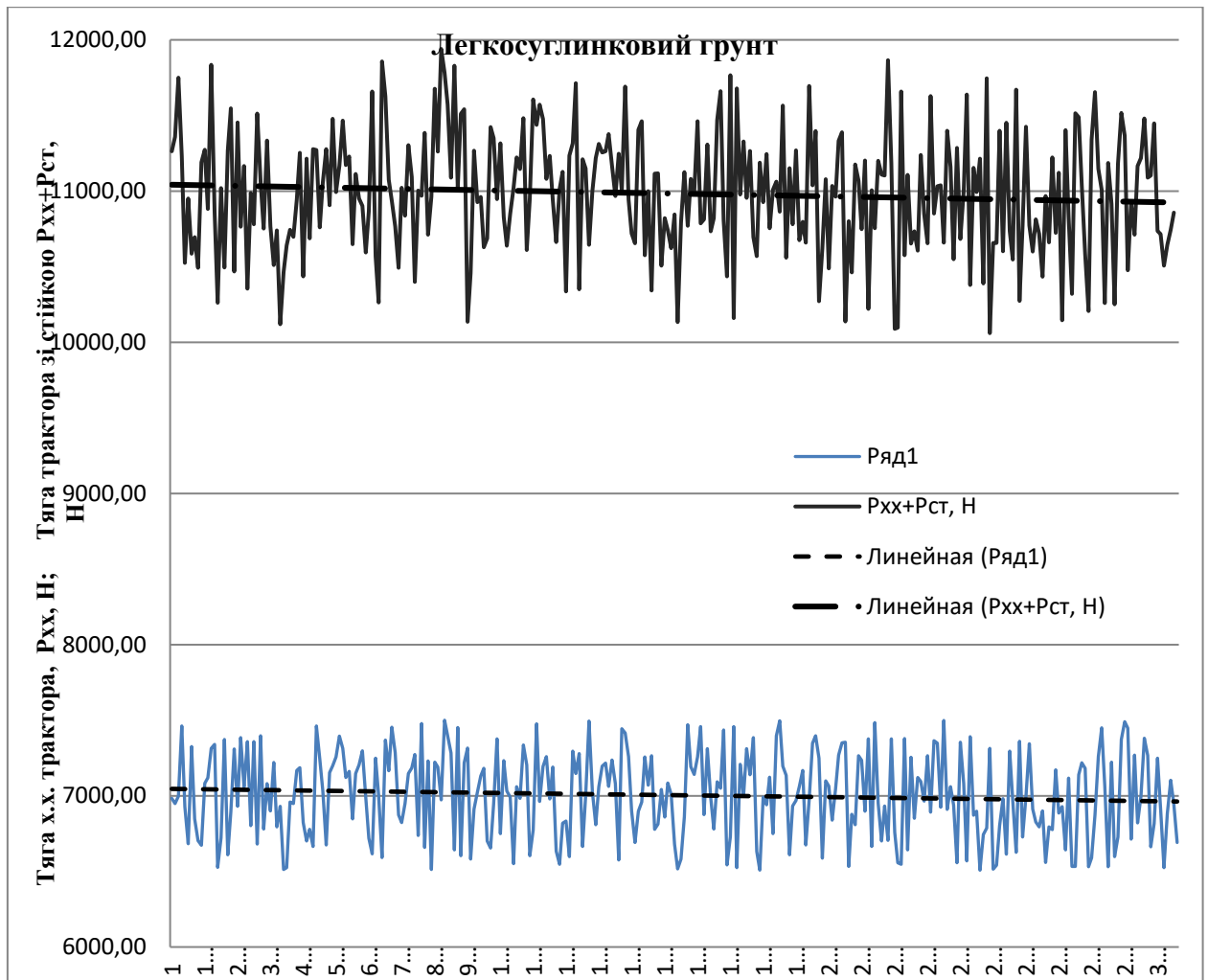


Рис. 4.4 Фрагмент характерних осцилограм тягового опору: ряд 1 – осцилограма тягового опору холостого ходу буксированого трактора, 2 – осцилограма тягового опору буксированого трактора зі стійкою кріплення робочого органу, ряди 3, 4 – лінійні апроксимації осцилограм (ряд 1 і ряд 2) для легкосуглинкового ґрунту

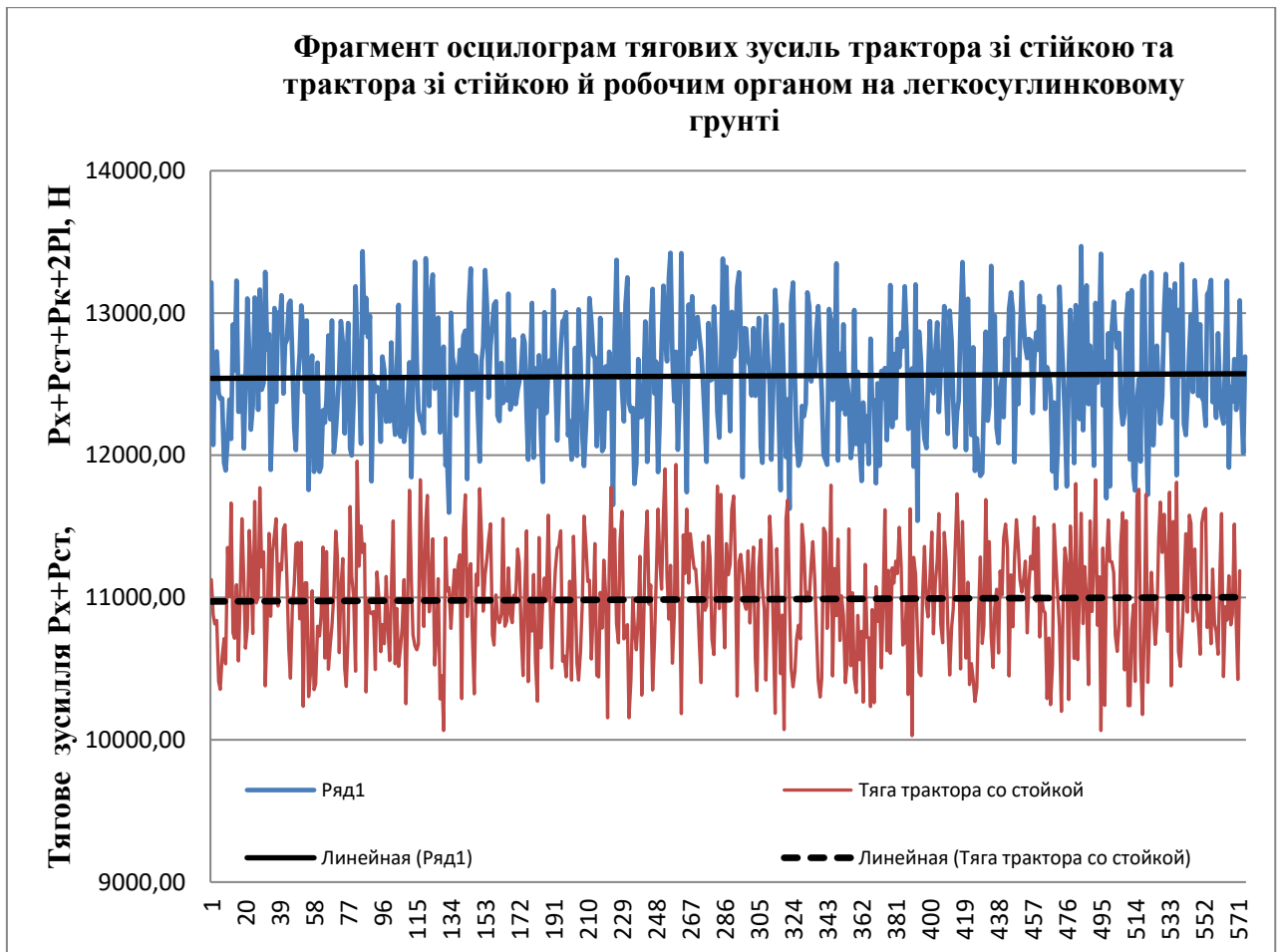


Рис. 4.5 Фрагмент характерних осцилограм тягового опору робочого органу (конусна і лемішна частина): ряд 1 – осцилограма тягового опору холостого ходу буксированого трактора зі стійкою та робочим органом (конусна і лемішна частини), 2 – осцилограма тягового опору буксированого трактора зі стійкою кріплення робочого органу, ряди 3, 4 – лінійні апроксимації осцилограм (ряд 1 і ряд 2) для легкосуглинкового ґрунту

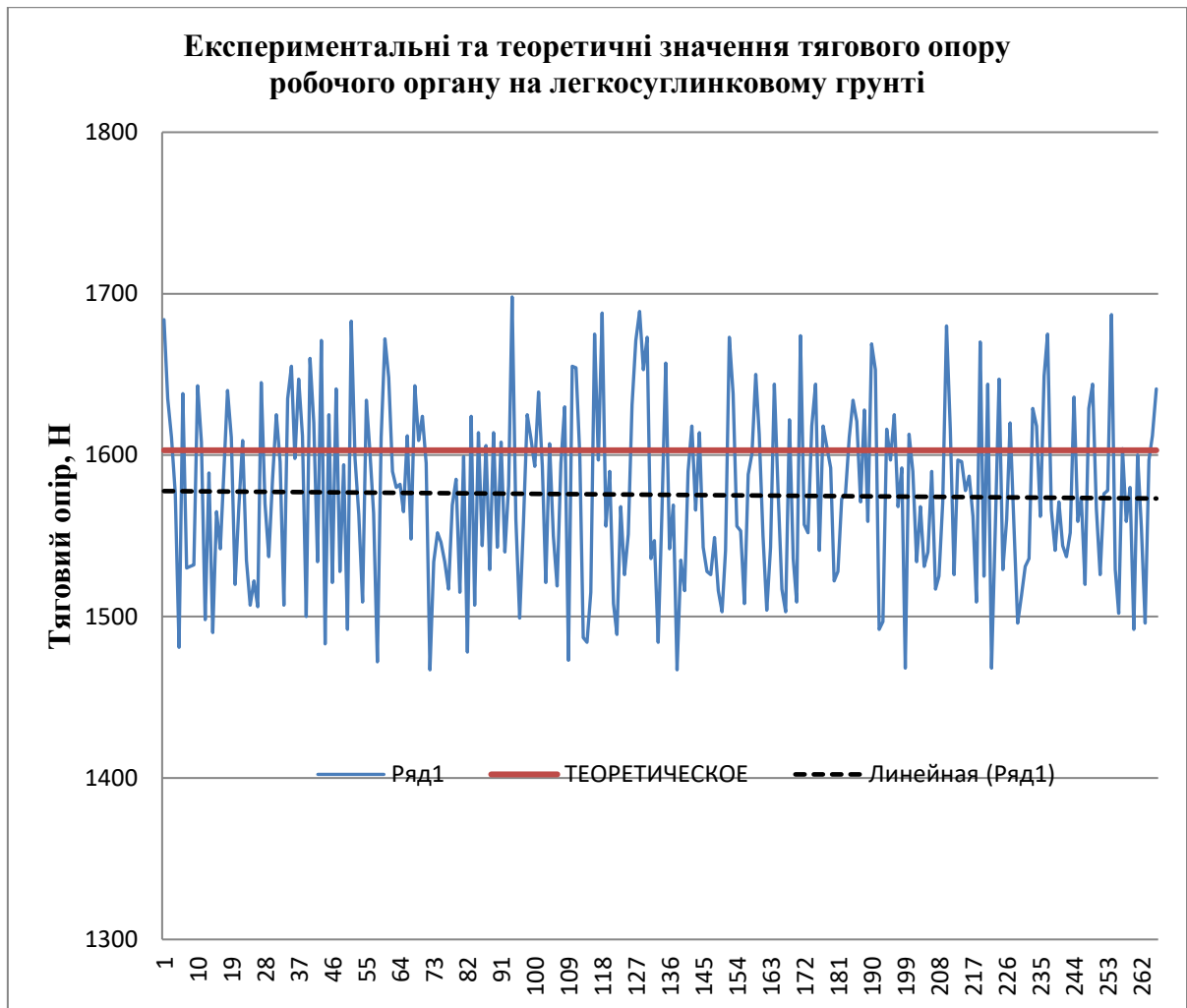


Рис. 4.6 Фрагмент характерної осцилограми тягового опору робочого органу (конусна й лемішна частини): ряд 1 – осцилограма тягового опору робочого органу (конусна й лемішна частини), 2 – теоретичне значення тягового опору робочого органу (конусна й лемішна частини), ряд 3 – лінійна апроксимація осцилограми (ряд 1) для легкосуглинкового ґрунту



Рис. 4.7 Повний запис тягового опору робочого органу з протягуванням зрошувальної труби та протифільтраційного екрана на довжині гону 50 м: ряд 1 – осцилограма, ряд 2 – теоретичне значення опору, ряд 3 – лінійна апроксимація осцилограми 1 для легкосуглинкового ґрунту

Результати визначення зусиль протягування зрошувальної труби разом з протифільтраційним екраном, які знаходили з теоретичних залежностей 2.27, 2.28 в сумі із залежностями 2.14.а та 2.22, зіставлялися з результатами повного зусилля протягування, за винятком опору перекочуванню трактора та опору руху стійки. Результати теоретичних досліджень адекватні за рівня значущості $\alpha = 0.15$.

4.2 Результати експериментальних досліджень тягових зусиль для середньосуглинкового ґрунту

4.2.1 Результати визначення механічних властивостей ґрунту

При проведенні експериментальних досліджень з метою визначення адекватності одержаних теоретичних результатів визначалися механічні властивості ґрунту, згідно з методикою, описаною в п. 3.2.5.

Виходячи з раніше одержаних регресійних рівнянь [46], були отримані модуль пружності та модуль в'язкості об'ємних деформацій, а також значення початкового напруження зсуву ґрунту.

Обробка результатів експериментальних досліджень проводилася методами регресійного аналізу із застосуванням пакету статистичної обробки та аналізу даних "Statistica 6".

Ґрунт при проведенні експериментальних досліджень був визначений як середньосуглинковий.

Вологість у горизонті проходження робочого органу (на глибині 0,5 м) становила $W = 19 \div 20 \%$, щільність ґрунту $\rho_s = 1480 \div 1520 \text{ кг} / \text{м}^3$.

У результаті використання даних експериментальних досліджень із застосуванням регресійних рівнянь зв'язку модуля пружності K_2 , коефіцієнта в'язкості η_2 та початкового напруження зсуву τ_{02} зі щільністю ρ_s та вологістю W для середньосуглинкового ґрунту рівняння регресії мають вигляд:

– модуль пружності об'ємних деформацій:

$$K_2 = 12.9 \cdot 10^7 + 183156W^2 - 5263W \rho_s + 32\rho_s^2. \quad (4.4)$$

З урахуванням зв'язку між пружними характеристиками, який виражається через коефіцієнт бокового розширення (в теорії пружності

коефіцієнт Пуассона) ν , модуль пружності лінійних деформацій $E_2 = 3K_2(1 - 2\nu)$, тоді (4.4) можна записати у вигляді:

$$E_2 = 3K_2(1 - 2\nu)(12.9 \cdot 10^7 + 183156W^2 - 5263W\rho_s + 32\rho_s^2) \quad (4.4.a)$$

– модуль в'язкості об'ємних деформацій:

$$\mu_2 = 178237 - \frac{445099}{W} + 49.3\rho_s - 0.64W\rho_s \quad (4.5)$$

Аналогічно зв'язок зсувного модуля з об'ємним виражається залежністю $\eta_2 = \frac{3\mu_2(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$. Тому перехід до модуля в'язкості зсувних деформацій призводить до залежності:

$$\eta_2 = \frac{3\mu_2(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \left(178237 - \frac{445099}{W} + 49.3\rho_s - 0.64W\rho_s \right) \quad (4.5.a)$$

Значення початкового напруження зсуву для середньосуглинкового ґрунту виражається такою залежністю:

$$\tau_{02} = 991.34 + 1.52W^2 + 0.0651W\rho_s + 0.0007\rho_s^2, \quad (4.6)$$

Графічно залежності (4.2.a), (4.5.a), (4.6) представлені на рис. 4.8.

Механічні властивості ґрунту, на якому проводилися експериментальні дослідження, отримані за регресійними залежностями (4.1) і (4.2), співпадали з визначеними за методикою п. 3.2.2 з надійною ймовірністю $P = 0.8$.

За конкретних значень щільності та вологості, значення вказаних механічних величини дорівнювали: $E_2 = 7.02743 \cdot 10^7$ Па, $\eta_2 = 45115$ Па с, $\tau_{02} = 4970$ Па.

За таких механічних властивостей ґрунту проводилося тензометрування робочого органу та тротягування зрошувальної труби з протифільтраційним екраном.

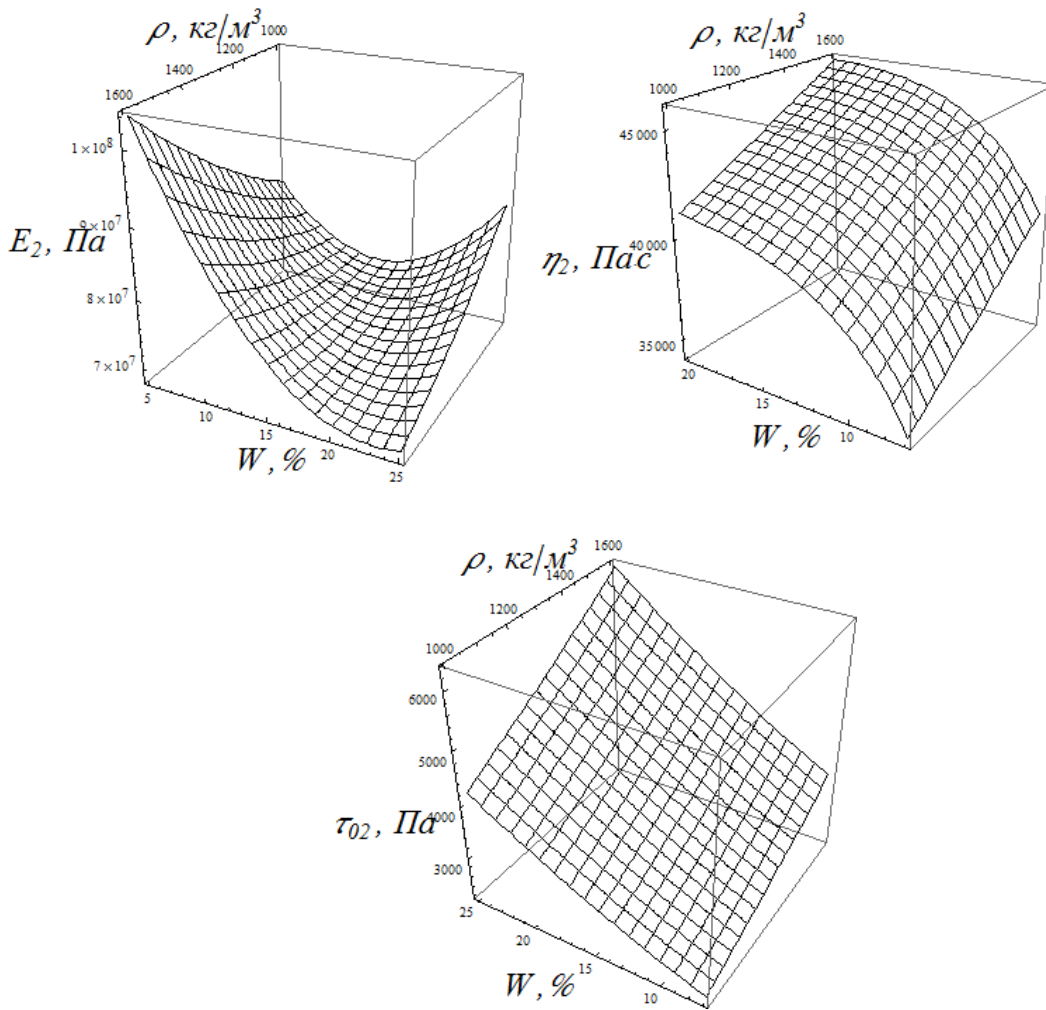


Рис. 4.8 Залежності модуля пружності лінійних деформацій E_2 , модуля в'язкості зсувних деформацій η_2 та початкового напруження зсуву ґрунту τ_{02} від щільності ρ_s та вологості W для середньосуглинкового ґрунту

4.2.2 Результати визначення тягових зусиль для середньосуглинкового ґрунту

Методика проведення експериментальних досліджень із визначення тягових зусиль описана вище.

У результаті проведення експерименту були отримані чисельні значення тягових зусиль для середньосуглинкового ґрунту. На підставі цього, згідно з методикою, наведеною у п. 3.2.3, побудували осцилограми (рис. 4.9 - 4.12).

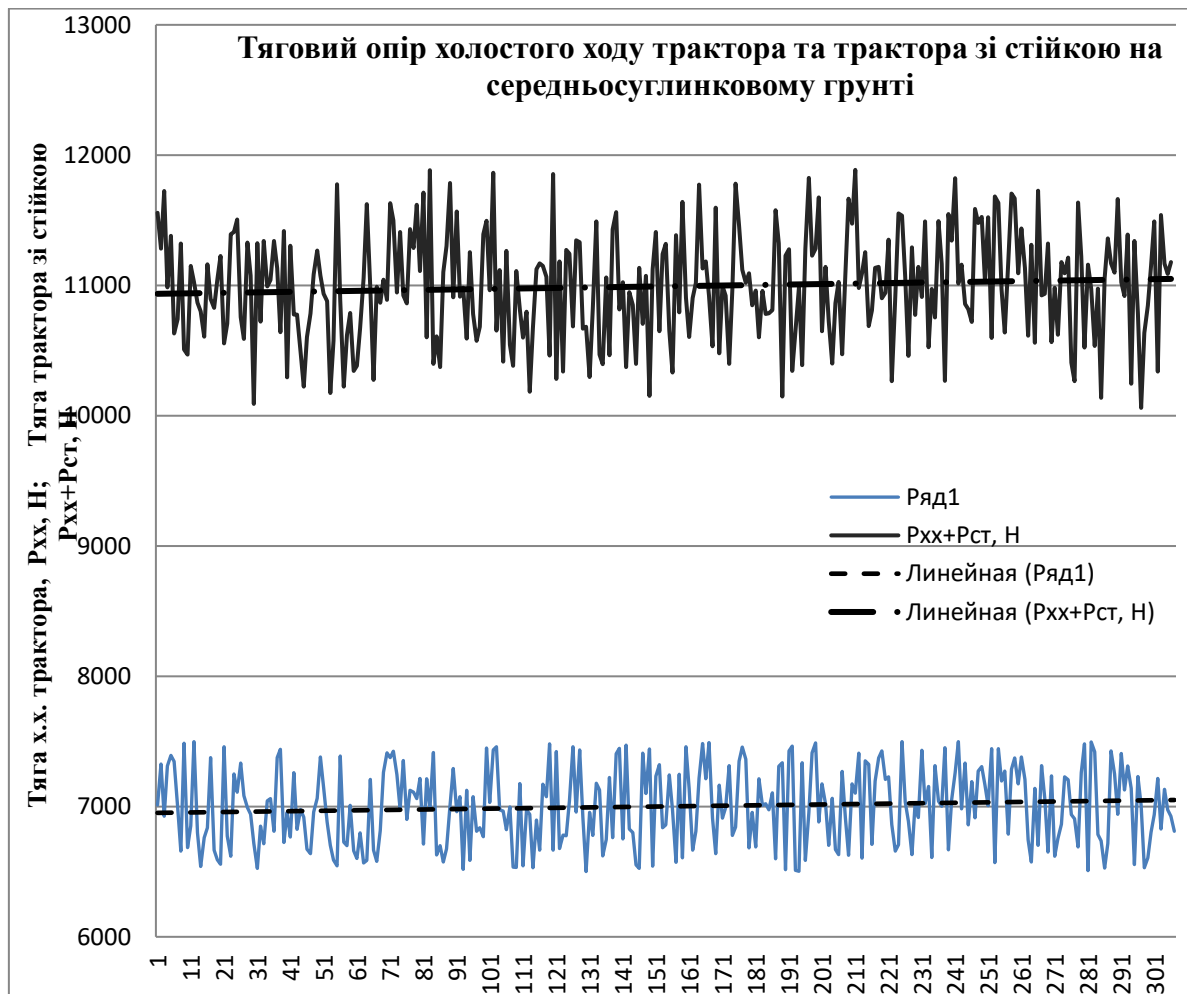


Рис. 4.9 Фрагмент характерних осцилограм тягового опору: ряд 1 – осцилограма тягового опору холостого ходу буксированого трактора, 2 – осцилограма тягового опору буксированого трактора зі стійкою

кріплення робочого органу, ряди 3, 4 – лінійні апроксимації осцилограм (ряд 1 і ряд 2) для середньосуглинкового ґрунту

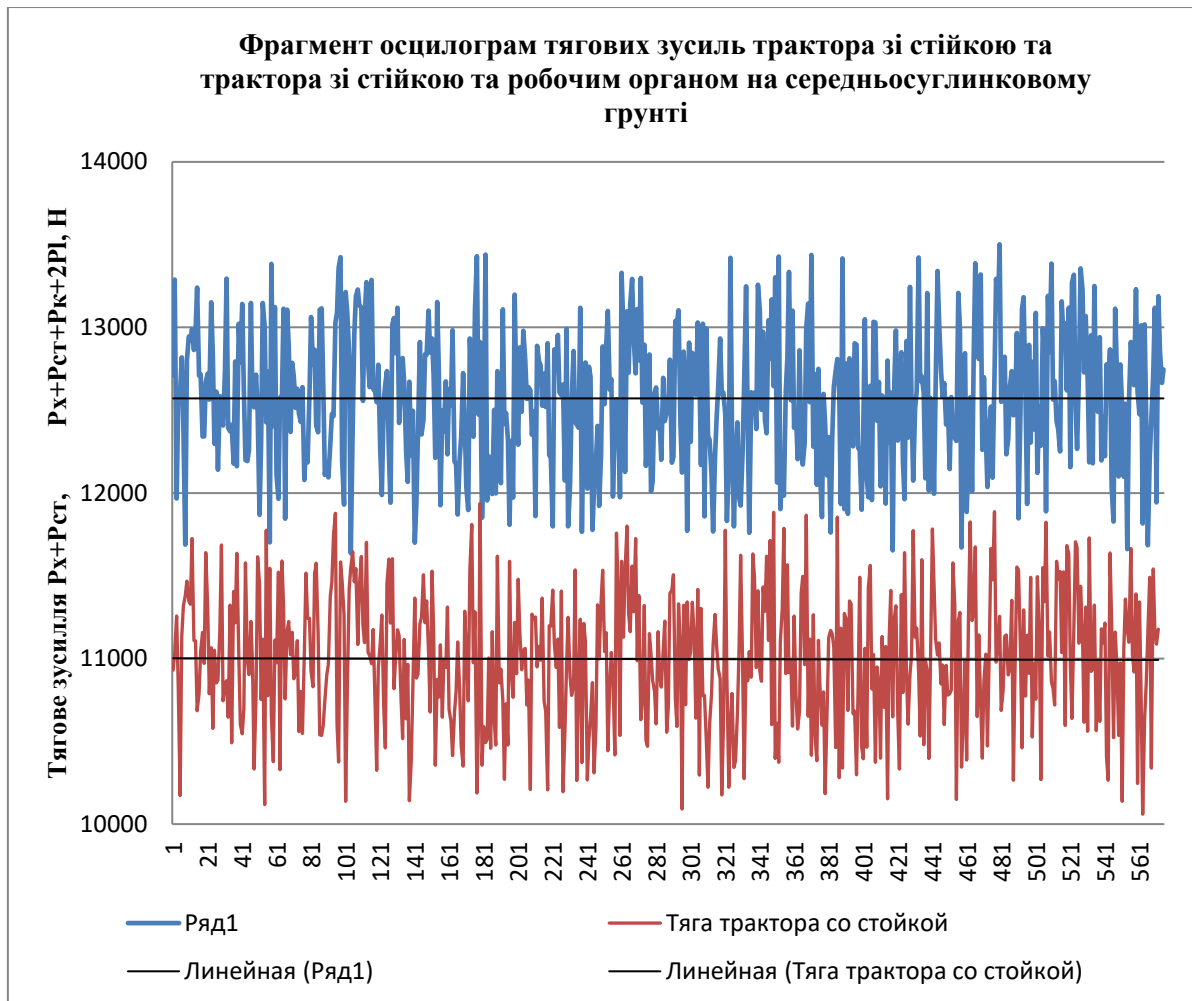


Рис. 4.10 Фрагмент характерних осцилограм тягового опору робочого органу (конусна і лемішна частини): ряд 1 – осцилограма тягового опору холостого ходу буксированого трактора зі стійкою та робочим органом (конусна і лемішна частини), 2 – осцилограма тягового опору буксированого трактора зі стійкою кріплення робочого органу, ряди 3, 4 – лінійні апроксимації осцилограм (ряд 1 і ряд 2) для середньосуглинкового ґрунту

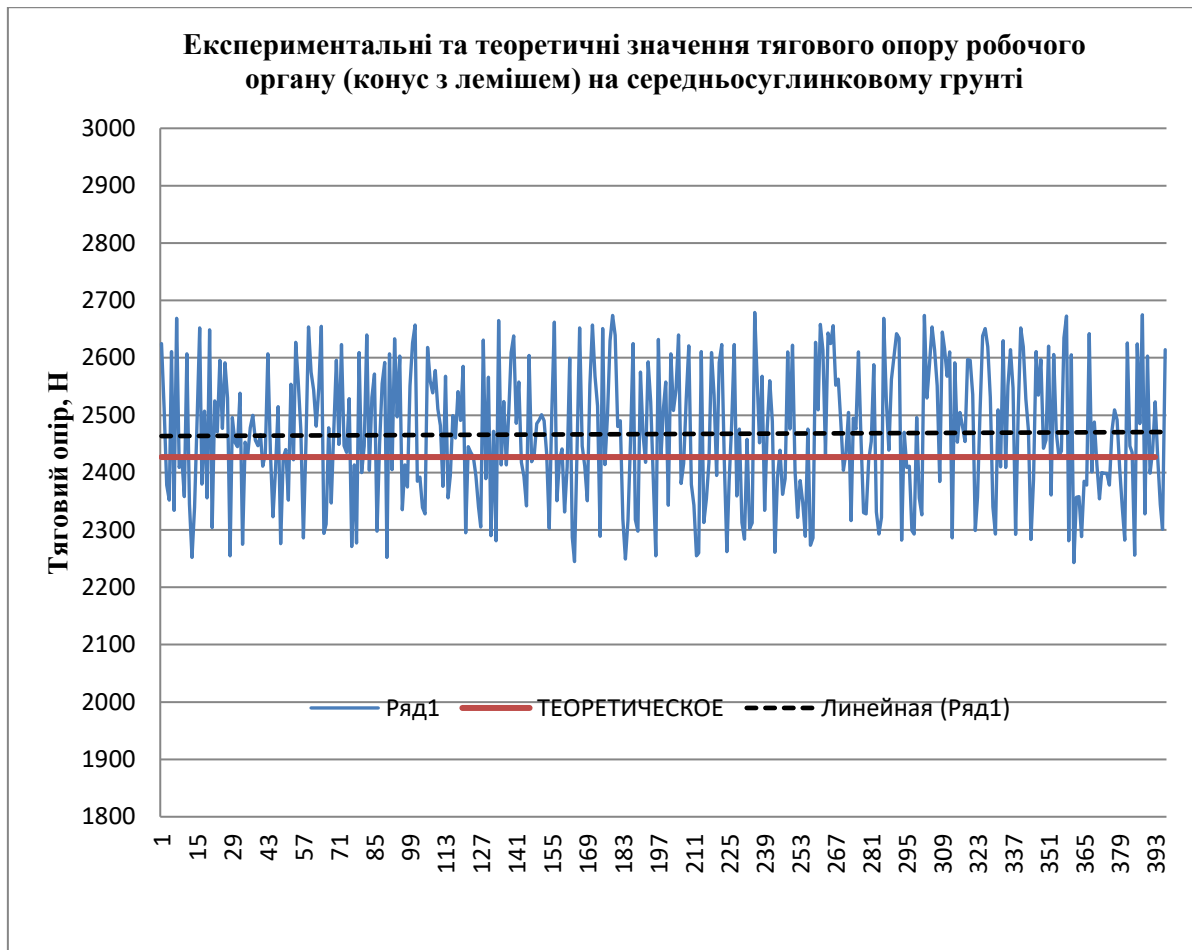


Рис. 4.11 Фрагмент характерної осцилограми тягового опору робочого органу (конусна і лемішна частини): ряд 1 – осцилограма тягового опору робочого органу (конусна і лемішна частини), 2 – теоретичне значення тягового опору робочого органу (конусна і лемішна частини), ряд 3 – лінійна апроксимація осцилограми (ряд 1) для середньосуглинкового ґрунту

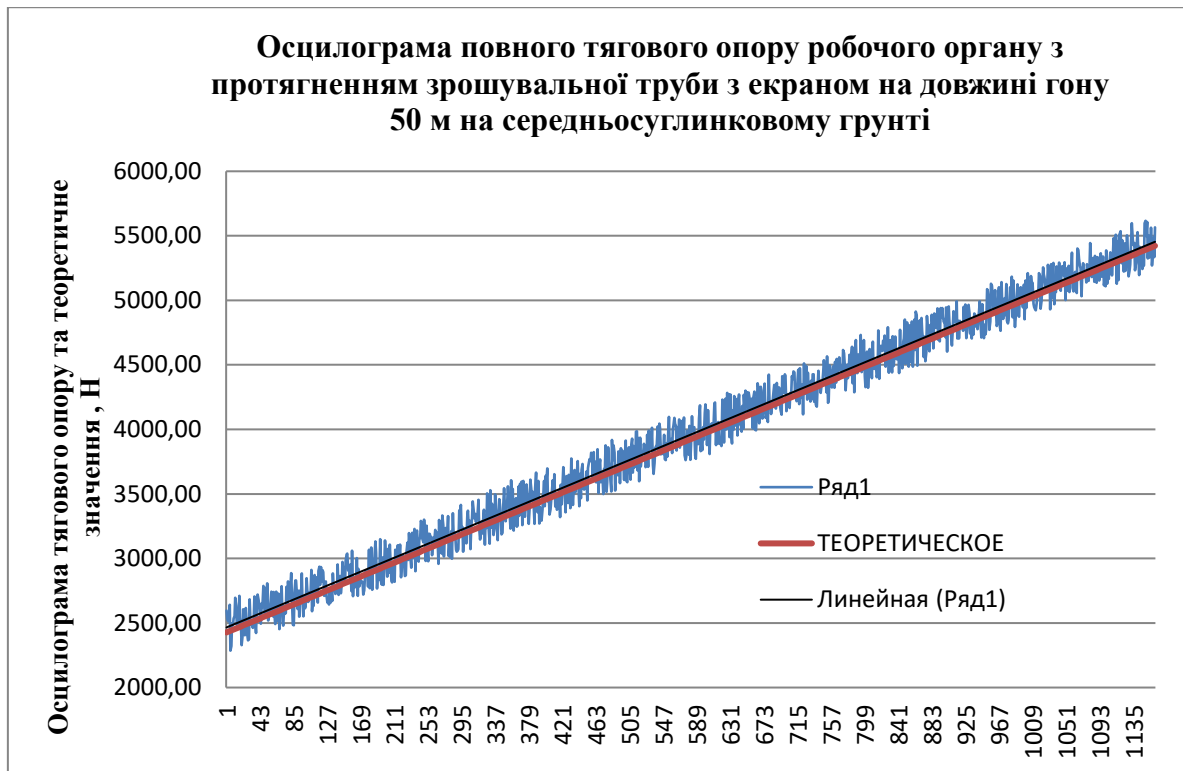


Рис. 4.12 Повний запис тягового опору робочого органу з протягненням зрошувальної труби та протифільтраційного екрана на довжині гону 50 м: ряд 1 – осцилограма, ряд 2 – теоретичне значення опору, ряд 3 – лінійна апроксимація осцилограми 1 для середньосуглинкового ґрунту

Обробка результатів динамометрування в експериментальних дослідженнях, проведених на середньосуглинковому ґрунті, показала адекватність отриманих теоретичних залежностей опору ґрунту переміщенню робочого органу (сума залежностей 2.14.а, та 2.22) за рівня значущості $\alpha = 0.15$.

При цьому використовувався робочий орган із такими геометричними параметрами: $L_1 = -B \cos[1/a]$, де $B = 0.3$ – ширина одного леміша, м; $h = 0.8$ – висота леміша в зоні зіткнення з конусною частиною, м; $a = -2$ – коефіцієнт нахилу нормалі до поверхні леміша до

осі ox , $b = 0.75$, $c = -1.5$ – коефіцієнти нахилу нормалі до поверхні леміша до осей oy, oz відповідно.

При цьому властивості ґрунту були такими: напруження початкового зсуву – $\tau_{02} = 4970$ Па, коефіцієнт бокового розширення – $\nu = 0.4$, щільність – $\rho = 1500 \text{ кг} / \text{м}^3$, модуль в'язкості зсувних деформацій – $\eta_2 = 45115$ Па с, модуль пружності лінійних деформацій – $E_2 = 7.02743 \cdot 10^7$ Па, кут зовнішнього тертя по поверхні леміша – $\psi = \pi/4$.

Результати визначення зусиль протягування зрошувальної труби разом з протифільтраційним екраном, які знаходили з теоретичних залежностей 2.27 та 2.28 в сумі із залежностями 2.14.а та 2.22, зіставлялися з результатами повного зусилля протягування, за винятком опору перекочуванню трактора та опору руху стійки. Результати теоретичних досліджень адекватні за рівня значущості $\alpha = 0.15$.

РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УКЛАДАННЯ ЗРОШУВАЛЬНОЇ ТРУБИ З ПРОТИФІЛЬТРАЦІЙНИМ ЕКРАНОМ

5.1. Вихідні дані для визначення техніко-економічної ефективності

Для визначення витрат енергії для безтраншейного прокладання зрошувальної труби з протифільтраційним екраном була визначена робота прокладання для ділянки довжиною 50 м за результатами тензометрування робочого органу та витрат енергії на протягування стійки робочого органу й перекочування трактора на полі.

Для порівняння обрані два варіанти укладання зрошувальної труби з протифільтраційним екраном: традиційне будівництво зрошувальної системи та з використанням розробленого пристрою.

Традиційне будівництво зрошувальної системи складається з послідовних операцій:

- відривання траншеї на глибину укладання зрошувача з плануванням поверхні дна траншеї, при цьому ширина відритої траншеї повинна дещо перевищувати ширину укладання протифільтраційного екрану;
- укладання нижньої протифільтраційної плівки екрану;
- укладання зрошувальної труби;
- накриття цієї труби верхньою частиною протифільтраційної плівки;
- закриття траншеї ґрунтом.

Другий варіант – з використанням розробленого пристрою, – передбачає виконання наступних операцій:

- агрегування пристрою з тяговим енергозасобом;
- закріплення труби зрошувача до пристрою;

- закріплення двох частин плівок протифільтраційного екрана до пристрою;
- утворення порожнини на глибині закладання зрошувача;
- протягування в ґрунті системи зрошувальної труби з частинами протифільтраційного екрана безтраншейним способом.

5.2. Порівняльний аналіз пропонованого пристрою з базовою технологією

Для порівняння енергетичних витрат застосування двох способів приймалися однакові умови за механічним складом ґрунту, а саме легкосуглинковий та середньосуглинковий ґрунт.

Умови проведення порівнянь та показники витрат енергії та палива для двох варіантів наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Порівняльний аналіз способів укладання зрошувальної труби з протифільтраційним екраном за витратами енергії та палива

№ п.п	Назва показника, одиниця вимірювання	Базова машина – екскаватор ковшовий ЕО 2621	Агрегат з пропонованим пристроєм – трактор ДТ 75м + пристрій
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	Глибина укладання зрошувальної труби (глибина траншеї), м	0,5	0,5
2	Ширина екрана (ширина траншеї), м	0,6	0,6
3	Довжина зрошувальної труби, м	50	50
4	Швидкість проходження, м/с	0,02	1
5	Питома витрата палива двигуном енергозасоба, г/кВт с	0,062	0,070

6	Модуль пружності ґрунту, Па (легкосугл./середньосугл.)	3,63 10 ⁷ / 7,00 10 ⁷	3,63 10 ⁷ / 7,00 10 ⁷
7	Модуль в'язкості ґрунту, Па с (легкосугл./середньосугл.)	3,8 10 ⁴ / 4,5 10 ⁴	3,8 10 ⁴ / 4,5 10 ⁴
8	Щільність ґрунту, кг/м ³ (легкосугл./середньосугл.)	1250 / 1400	1250 / 1400

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4
9	Витрата енергії, кДж (легкосугл./середньосугл.)		243 10 ³ / 344 10 ³
10	Максимальна споживана потужність, кВт (легкосугл./середньосугл.)		48,6 / 68,85
10	Витрата палива на укладання 50 м зрошувача, кг (легкосугл./середньосугл.)	4,65	1,150 / 1,630
11	Різниця за витратами палива (легкосугл./середньосугл.)		75 % / 65 %

Аналіз таблиці дає підстави зробити висновок, що ефективність використання запропонованого пристрою порівняно з традиційним укладанням зрошувальної системи з використанням екскаватора залежно від властивостей ґрунту складає 65 % – 75 % лише за економією палива.

ВИСНОВКИ

У представлених матеріалах проаналізовані оптимальні способи укладання підґрунтових зрошувальних систем. Це дозволило розробити раціональне технічне рішення для їх створення. Вирішено завдання, пов'язані зі знаходженням раціональних параметрів і режимів роботи робочого органу для безтраншейного укладання зрошувальної труби разом із протифільтраційним екраном.

1. Аналіз результатів досліджень поширення рідини в ґрунті за умови загрози засолення ґрунту та в умовах підвищеного випаровування вологи з поверхні ґрунту дозволив зробити висновок про найбільш раціональний спосіб створення зрошувальних мереж. При цьому на основі проведеного аналізу внутрішньогрунтового поливу можна зробити висновок про те, що зрошувачі для багаторічних плодових насаджень можуть укладатися з кроком до 2 метрів на глибину близько 0,5 метра.

2. Результати вивчення закономірностей пересування вологи в ґрунті за внутрішньогрунтового зрошення дозволяють зробити висновок про те, що найбільше поширення вологи в перпендикулярному напрямку від осі зрошувача забезпечуватиметься за рахунок дифузійного переносу вологи за мінімально можливих процесів фільтрації, які можливі при повному вологонасиченні. Це зумовлює необхідність використання протифільтраційного екрана.

3. Аналіз способів укладання підґрунтових зрошувальних систем із протифільтраційним екраном дозволив зробити висновок про відсутність технічних засобів для виконання такої операції безтраншейним способом.

4. З погляду формалізації взаємодії робочого органу для безтраншейного укладання зрошувальної труби разом із протифільтраційним екраном, бажано представити ґрунт як квазісуцільне ізотропне середовище з властивостями пружності та в'язкості.

5. На основі рішення контактної задачі взаємодії конусної частини робочого органу визначено раціональні геометричні параметри, завдяки яким максимально ущільнюються стінки утворюваної порожнини та забезпечується мінімум опору ґрунту його переміщенню. Так, для більшості ґрунтів за механічними характеристиками найбільш раціональними будуть такі геометричні параметри конусної частини робочого органу: загострення $a \approx 0.02$, радіус основи конуса $r \approx 1.1r_t$, де r_t – радіус труби зрошувача, швидкість руху $V_m \approx 1 \text{ м/с}$.

6. На основі рішення контактної задачі взаємодії лемішної частини робочого органу визначено раціональні геометричні параметри, завдяки яким максимально ущільнюються стінки утворюваної порожнини та забезпечується мінімум опору ґрунту його переміщенню. Для більшості ґрунтів за механічними характеристиками найбільш раціональними є такі геометричні параметри лемішної частини робочого органу:

– леміш може бути виконаний у вигляді площини з мінімально можливими коефіцієнтами нахилів нормалі до поверхні до осей координат: $oy - b < 1$, $oz - c < -1$, $ox - a \rightarrow -2-$;

– геометричний розмір леміша повинен дещо перевищувати напівширину протифільтраційного екрана 0,25 метра, при цьому висота проєкції леміша на вертикально-поперечну площину в зоні зіткнення з конусною частиною становить величину $r \approx 1.1r_t$.

7. У результаті проведених теоретичних досліджень отримано аналітичні залежності сил опору ґрунту пересуванню робочого органу, які залежать від геометричних параметрів робочого органу, швидкості його переміщення та механічних властивостей ґрунту.

8. Аналізуючи величини критичних напружень Kkr у верхній частині порожнини, утвореної лемішною частиною робочого органу, створених вагою клину ґрунту над порожниною, й критичними

напруженнями k_l , створеними у верхній частині порожнини лемішною частиною робочого органу за різних його параметрів і властивостей ґрунту, можна зробити висновок про те, що верхня частина порожнини є стійкою проти руйнування й не повинна перешкоджати протягуванню протифільтраційного екрана.

9. Зіставлення отриманих теоретичних залежностей опору переміщенню робочого органу в ґрунті та опорів протягуванню зрошувальної труби разом із протифільтраційним екраном із результатами експериментальних досліджень на двох типах ґрунтів дозволяє судити про адекватність теоретичних результатів на статистичному рівні значущості $\alpha = 0.25$.

10. Ефективність використання запропонованого пристрою порівняно з традиційним укладанням зрошувальної системи з використанням екскаватора залежно від властивостей ґрунту складає 65 % – 75 % лише за економією палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Трускавецкий Р.С. Буферна здатність ґрунтів та їх основні функції. Харків: ННЦІГА. ППВ „Нове слово”. 2003. 220 с.
2. Гридасов В.Ф. Агрогидрологические свойства осушаемых земель. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. 175 с.
3. Акутнєва, О. В. Применение внутрпочвенного орошения в плодоводстве / О. В. Акутнєва. *International Scientific Journal Theoretical & Applied Science*. 2014. Issue: 10. Vol. 18. Published: 30.10.2014. <http://www.T-Science.org>.
4. Солоня О. В., Ковбаса В. П. Вплив геометричних параметрів лемеха кротователя на деформаційних характеристик ґрунту при створенні порожнини для протифільтраційного екрана. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. №3(94). С. 75–82.
5. Солоня О. В., Ковбаса В. П., Мельник О. С. Динамика контактного взаємодія лемеха кротователя с почвой при образовании полости. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №1(96). С. 44–52.
6. Аграрна політика та земельні відносини: підручник / Г. М. Калетнік, І. В. Гончарук, Т. В. Ємчик, С. М. Лутковська – Вінн. нац. аграр. ун-т. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 307 с.
7. Артем'єва, З. Н. Техничко-економическая оценка строительства пластмассового дренажа бестраншейным способом / З. Н. Артем'єва, Р. А. Неврова. *Зб. наук. пр. Сев.НІІГіМ-Л*. 1982. С. 145–151.
8. Артюхін, Ю. Н. Строительство бестраншейного дренажа / Ю. Н. Артюхін, О. М. Смирнов, М. М. Ковальчук. Москва : Агропромвидат, 1987. 84 с.
9. Solona O., Kovbasa V., Kupchuk I. The contact interaction dynamics of the working tool of the mole plowshare with the soil during

forming process a channel for an antifiltration screen. *Vibrations in engineering and technology*. 2020. №2(97). С. 81–89.

10. А. с. 1678989 СССР, МКИЗ Е 02 F 5/10. Рабочий орган бестраншейного дренаукладчика / О. Л. Романовский, С. В. Кравець, В. Ф. Ткачук, Л. Б. Кравець и др. (СССР). № 3704028/03; заявл. 19.12.83; опубл. 23.09.91, Бюл. № 35.

11. А. с. 1694792 СССР, МКИЗ Е 02 F 5/10. Землеройный рабочий орган бестраншейного дренаукладчика / О. Л. Романовский, С. В. Кравець, В. Ф. Ткачук и др. (СССР). № 4018607/03; заявл. 24.12.85; опубл. 30.11.91, Бюл. № 44.

12. Астапов, С. В. Подпочвенно-кротовый способ полива в Центральной черноземной зоне / С. В. Астапов, В. И. Бобченко. *Гидротехника и мелиорация*. 1950. № 9. С. 41–52.

13. Ахмедов, Аскар Джангир – огли. Технология внутрипочвенного орошения люцерны на зеленый корм в Волго-Ахтубинской пойме: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. / Аскар Джангир – огли Ахмедов. Москва, 1996. 23 с.

14. Ахмедов, А. Д. Аналитический подход к определению некоторых водно-физических характеристик почвогрунтов / А. Д. Ахмедов. *Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов: Материалы международной научно-практической конференции*. Москва, 2008. – С. 105-109.

15. Багіров, І. З. Исследование деформации и сопротивлений грунта с клином при различных скоростях / І. З. Багіров. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11. Мінськ: ВНІ землеробства, 1963. 24 с.

16. Багров, М. Н. Прогрессивная технология орошения сельскохозяйственных культур / М. Н. Багров, И. О. Кружилін. Москва: Колос, 1980. С. 20–42.

17. Барашков, В. И. Исследования техники подпочвенного орошения по трубчатым увлажнителям на светло-каштановых почвах: дис. ... канд. тех. наук: 06.01.02. / В. И. Барашков. Волгоград, 1980. С. 40–86.
18. Бердишев, В. Д. Развитие научных работ в области подпочвенного орошения / В. Д. Бердишев, А. Ф. Радько, Г. Ю. Шейкин. Оглядова інформація. Москва: ЦБНТИ Мінводгоспу, 1976. 48 с.
19. Бестраншейные дренажники в СССР и за рубежом / С. Д. Томін, О. М. Єфремов, Б. И. Люлькин, В. Н. Буравцев. Москва: ЦБНТИ Мінводгосп СРСР, 1983. №13. С. 84.
20. Бірюков, Н. С. Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов / Бірюков Н. С., Козарновський В. Д., Мотильов Ю. Л. Москва : Недра, 1975. 177 с.
21. Бледних, В. В. Математическая модель рабочей поверхности корпуса плуга / В. В. Бледних, С. Я. Худяков. *Техника в сельском хозяйстве*. 1989. № 2. С. 10–12.
22. Бобченко, В. И. Подпочвенное орошение / В. И. Бобченко. Москва: Держ. вид. с.-г. літ, 1957. 127 с.
23. Богушевський, О. О. Подпочвенное орошение: дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / О. О. Богушевський. Москва, 1955. С. 37–143.
24. Боровой, Є. П. Научное обоснование техники и технологии внутрипочвенного орошения кормовых культур: дис канд. с.-г. наук: 06.01.02 / Є. П. Боровой. Волгоград, 1999. 413 с.
25. Боровой, Є. П. Зависимость расхода воды в увлажнителях от напора и конструкции при внутрипочвенном орошении / Є. П. Боровой. Тези доп. наук.-практ. конф. Саратовського СГІ, Саратов, 1989. С. 73–78.
26. Боровой, Є. П. Формирование контура увлажнения в зависимости от конструкции увлажнителя и поливной нормы /

Є. П. Боровой. *Матеріали конференції молодих вчених: Волгоградський СГП*. Волгоград, 1986. С. 154–155.

27. Будаговський, О. І. Впитывание воды в почву / О. І. Будаговський. Москва: Изд. АН СССР, 1955. С. 25–85.

28. Веприков, В. І. Математическая модель технологии обеспечения радиационной безопасности при поливе почвы малыми дифференцированными нормами в санитарно-защитной зоне АЭС / В. І. Веприков, Ю. В. Веприков, Ю. В. Веприкова. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015. № 3 (16), С. 9.

29. Ветренко, О. А. Расчет влагопереноса при ВПО с учетом влагоотбора корнями растений / О. А. Ветренко. *Актуальные проблемы экологии в условиях современного мира: Матеріали II Міжнар. наук-практич. конференції*. Майкоп, 2002. С. 67–69.

30. Ветренко, О. А. Научно-экспериментальное обоснование внутрипочвенного орошения яблоневого сада: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. / О. А. Ветренко. Волгоград, 2003. 23 с.

31. Ветров Ю. А. Машины для специальных земляных работ / Ю. А. Ветров, В. Л. Баладинський. Київ : Вища школа, 1980. 190 с.

32. Воронін, А. Д. Основы физики почв / А. Д. Воронін. Москва: Вид-во Моск. Ун-та, 1986. 244 с.

33. Вороніна, Г. І. О распределении влаги в контуре увлажнения при подпочвенном орошении / Г. і. Воронина. *Вопросы водного хозяйства (орошение)*. Фрунзе, 1973. Вип. 31. С. 43–46.

34. В'ялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. В'ялов. Москва: Вищ. школа, 1978. 447 с.

35. Глобус, А. М. Экспериментальная гидрофизика почв / А. М. Глобус. Ленинград: Гідрометеовидат, 1969. 357 с.

36. Гостіщев, Д. П. Математическое моделирование влагопереноса при внутрипочвенном орошении / Д. П. Гостіщев, Ю. С.

Рогозина. *Оглядова інформація*. Москва: ЦБНТІ Мінводбуд. СРСР, 1990. С. 43–46.

37. Григоров, М. С. Внутрипочвенное орошение / М. С. Григоров. Москва: Колос, 1983. 128 с.

38. Григоров, М. С. Особенности передвижения влаги в почве при внутрипочвенном орошении / М. С. Григоров, Е. П. Боровой. *Зб. наук. пр. Прогрессивные технологии орошения сельскохозяйственных культур*. Волгоградський СГІ: Волгоград, 1989. С. 15–23.

39. Григоров, М. С. Заиляемость увлажнительной сети при внутрипочвенном орошении / М. С. Григоров, Е. П. Боровой, Є. А. Ходяков. *Гидротехническое строительство, водное хозяйство и мелиорация земель на современном этапе. Международная научно-практич. конф.*: Пенза, 1999. С. 19–26.

40. Декруа, М. Различные методы локального орошения, применяемые во Франции / М. Декруа. *Зб. «Прогрессивные способы орошения, включая машинное орошение»*. Москва: Мінводгосп СРСР, 1975. С. 58–76.

41. Дженіке, Е. В. Складирование и выпуск сыпучих материалов / Е. В. Дженіке. Москва: Мир, 1968. 164 с.

42. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. Пер. з англ. Москва: Машиностроение, 1979. 568 с.

43. Долгов, С. І. Исследования подвижности почвенной влаги и ее доступности для растений / С. І. Долгов. М.–Д.: Изд. АН СССР, 1948. С. 144–197.

44. Долматов, Б. І. Механика грунтов, основания и фундаменты / Б.І. Долматов. Ленинград: Стройиздат, 1988. 415 с.

45. Дубровін, В. Состояние проблемы и необходимость разработки комплекса оборудования для полива винограда при

выращивании в природно-климатических зонах Ирака / В. Дубровін, О. Броварець, Аль-Хазаалі Хайдер Раад Надім. *Motrol Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 16. №3. 2014. P. 202–207.

46. Духовний, В. А. Горизонтальный дренаж орошаемых земель / В. А. Духовний, М. Б. Беклушин, Е. Д. Томін, Ф. В. Серебренніков. Москва: Колос, 1979. 255 с.

47. Єрмилов, А. Б. Математическая модель усилия глубокого резания грунта узкими ножами / А. Б. Єрмилов, А. Н. Шаламов. Моск. автомоб.-дорожн. ін-т. Москва, 1983. 21 с.

48. Зав'ялов, А. М. Основы теории взаимодействия рабочих органов дорожно-строительных машин с грунтом / А. М. Зав'ялов. СіБАДІ. Омск, 1992. 192 с.

49. Зеленін, О. М. Косое резание и копание грунта / О. М. Зеленін, Л. В. Красильніков. *Строительные и дорожные машины*. Москва: Машиностроение, 1967. №4. С. 15–22.

50. Зеленін, О. М. Машины для земляных работ / О. М. Зеленін, В. І. Баловнев, І. П. Керов. Москва: Машиностроение, 1975. 424 с.

51. Золотаревська, Д. І. Основы теории и методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей мобильной сельскохозяйственной техники: дис доктора техн. наук: 05.20.01. / Д. І. Золотаревська. Москва, 1997. 432 с.

52. Ігнатенко, І. В. Обобщение динамической модели взаимодействия рабочего органа с почвой / І. В. Ігнатенко. *Комплексная механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства*. Ростов-на-Дону: РІСГМ, 1985. С. 57–66.

53. Казаков, В. С. Бестраншейные дренажники / В. С. Казаков. Москва: Россельхозиздат, 1974. 62 с.

54. Казаков, В. С. Бестраншейный и узкотраншейный дренаж / В. С. Казаков. Москва: Россельхозиздат, 1986. 70 с.

55. Каслін, Н. Д. Механизация работ при прокладке распределительных трубопроводов / Н. Д. Каслін, В. Н. Супонев. *Вестник ХНАДУ*. Харків, 2007. Вип 38. С. 107–110.
56. Качинський, М. О. Влияние тракторной обработки на физические свойства почвы / Качинський М. О. *Праці Держ. Грунт. Ін-та, окремий відбиток із вип. №1*. Москва, 1927. С. 32–38.
57. Кичигін, В. М. Подпочвенное орошение (классификационная схема и характеристика систем подпочвенного орошения) / В. М. Кичигін. Кишинів: Парт. вид. ЦК КП Молдови, 1962. 31 с.
58. Кленін, М. І. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / М. І. Кленін, В. А. Саун. Москва: Колос, 1980. 671 с.
59. Ковбаса, В. П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з ґрунтом: дис.... докт. техн. наук: 05.05.11 / В. П. Ковбаса. Київ, 2006. 299 с.
60. Ковбаса, В. П. Моделирование распределения напряжений в почве под действием деформаторов / В. П. Ковбаса. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Мелітополь: ТДАТА. 2001. Вип. 2. Т. 16. С. 123–127.
61. Ковбаса, В. П. Залежності реологічних властивостей ґрунту від параметрів його стану / В. П. Ковбаса, Д. Г. Войтюк, Ю. О. Гуменюк. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2005. № 8. С. 25–28.
62. Ковбаса, В. П. Розподіл напружень у сипкому середовищі, обмеженому стінками споруди силосного типу / В. П. Ковбаса, В. В. Ярошенко. *Науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»*. Кіровоград, 2010. Вип. 40. Ч. 1. С. 314–324.
63. Ковбаса, В. П. Критерій міцності і співвідношення між компонентами напружень сипучого середовища / В. П. Ковбаса, В. П. Курка, Али Ахмед Кадем. *Науковий вісник Національного*

університету біоресурсів і природокористування України. Серія: «Техніка та енергетика АПК». Київ, 2015. Вип. 212. ч. 1. С. 196–203.

64. Ковбаса, В. П. Про подолання труднощів при вирішенні контактних задач пружності / В. П. Ковбаса, В. П. Курка, Алі Ахмед Кадем. *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.* Вип. 32. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 79–86.

65. Козішкурт, М. Є. Об'ємна щільність – індикатор агрофізичного стану та аргумент функції агрогідрологічних властивостей ґрунтів / М. Є. Козішкурт, С. М. Козішкурт, Л. М. Голота. *Вісник Національного університету водного господарства і природокористування : зб. наук. пр.* Рівне, 2011. Вип. 2 (47), ч. 1. С. 300–308.

66. Коп'єв, Є. І. Гидравлический расчет работы поливных кротовин / Є. І. Коп'єв. *Сб. научн. тр. ВНИИГиМ.* Москва, 1960. Т. 35. С. 120–129.

67. Корнєв, В. Г. Подпочвенное орошение / В. Г. Корнєв. М. - Л.: Сельхозгиз, 1935. С. 13–83.

68. Кострицин, О. К. Основные закономерности сопротивления почвы деформации и разрушению и их исследование для обоснования типа и параметров почвообрабатывающих противоэрозионных рабочих органов / О. К. Кострицин. – дис... докт. техн. наук: 05.20.01. Москва, 1986. 356 с.

69. Костяков, О. М. Основы мелиорации / О. М. Костяков. Москва: Госсельхозиздат, 1960. 622 с.

70. Кравець, С. В. Аналітичний метод визначення продольного профіля режущей части двухступенчатого ґрунторозробляючого органа / С. В. Кравець, А. А. Нечидюк. *Горн., строит., дор. и мелиорат. машины: Респ. міжвід. наук.-техн. зб.* Київ: Техніка, 1991. Вип. 44. С. 39–45.

71. Кравець, С. В. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / С. В. Кравець, М. Д. Каслін, В. К. Руднев, В. М. Супонев. Харків: ООО “Фавор”, 2008. 256 с.
72. Кравець, С. В. Вплив багатоярусного розпушення на водно-фізичні властивості ґрунтів / С. В. Кравець, В. Ф. Ткачук, О. П. Рижий. *Зб. статей за мат. III наук.-техн. конференції. ч. 4; «Механізація і автоматизація»*. Рівне: УДАВГ, 1997. С. 16–17.
73. Кравець, С. В. Раціональні параметри ножових бестраншейних укладачів / С. В. Кравець, О. Л. Романовський, О. Ю. Васильчук. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха. 2014. Вип. 99. Том 1. С. 194–203.
74. Красніков, М. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения / М. Д. Красніков. Ленинград: Стройиздат, 1970. 240 с.
75. Кулен, А. Современная земледельческая механика / А. Кулен, Х. Куїперс. Москва: Агропромвидат, 1986. 349 с.
76. Кульчицький, В. О. Двухмерная эволюционная математическая модель тепловлагопереноса в грунтовом основании / В. О. Кульчицький, В. А. Макагонов. *Реконструкція городов и геотехническое строительство*. № 8. 2004. С. 150–155.
77. Кушнар'ов, А. С. Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву: дис ...докт. техн. наук: 05.20.01 / А. С. Кушнар'ов. Мелитополь, 1980. 329 с.
78. Лабода, В. Г. Подпочвенное орошение в условиях Крыма / В. Г. Лабода. *Вопросы орошения*. Київ: Урожай, 1964. С. 55–63.
79. Лабода, В. Г. Подпочвенное орошение виноградников на крутых склонах / В. Г. Лабода, Н. І. Подлесная. *Гидротехника и мелиорация*. 1968. № 11. С. 57–64.

80. Лебедев, А. Ф. Почвенные и грунтовые воды / А. Ф. Лебедев. М. - Л.: Вид. АН СРСР, 1955. С. 25–85.
81. Лебедев, Г. В. Импульсное дождевание и водный обмен растений / Г. В. Лебедев. Москва, 1969. 109 с.
82. Лур'є, А. І. Пространственные задачи теории упругости / А. І. Лур'є. Москва: Держтехвидат, 1955. 492 с.
83. Ликов, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Ликов. Москва: Держ. вид. техн. - теор. літ., 1954. С. 31–130.
84. Мазепа, М. В. Распределение поливной воды в почвенном профиле при внутрпочвенном орошении на крутых склонах / М. В. Мазепа, Є. П. Боровой. *Зб. наук. пр. Волгоградського СГІ*. Волгоград, 1991. С. 28–32.
85. Марков, Ю. А. Проблемы оптимизации орошения садов / Ю. А. Марков. *Садоводство*. № 6. 1985. С. 27–28.
86. Мацепуро, В. М. Рациональная формула В. П. Горячкина и характер зависимости ее коэффициентов от основных факторов, влияющих на сопротивление почв / В. М. Мацепуро. *Праці ВІМ*. Москва. 1975. Т. 69. С. 11–58.
87. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: Справочник / Б. Б. Шумаков, под ред. Москва: Агропромвидат, 1990. 415 с.
88. Мельніков, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельніков. Ленинград: Колос, 1980. 168 с.
89. Мер, І. І. Мелиоративные машины / І. І. Мер. Москва: Колос, 1980. 351 с.
90. Мертін, В. Результаты подпочвенного орошения по методу Нидервеммера / В. Мертін. *Труды ІХ Международного конгресса по ирригации и дренажу, вопрос 32*. Москва: ВНИИТЕИСГ. 1975. С. 89–99.

91. Mehdi, El-Sahaf. Современное состояние ирригации в бассейне Евфрата (Ирак) / El-Sahaf Mehdi, I. S. Zonn. *Гидротехника и мелиорация*. 1967. №2. С. 17–24.
92. Муромцев, М. О. Использование тензиометров в гидрофизике почв / М. О. Муромцев. Д.: Гідрометеовидат, 1979. С. 19–10.
93. Надаї, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаї. Москва: Мир, 1968. 863 с.
94. Нерпін, С. В. Физика почвы / С. В. Нерпін, А. Ф. Чудновський. Москва: Наука, 1967. С. 9–348.
95. Нечидюк, А. А. Розробка і дослідження двох`ярусного безтраншейного укладача підземних комунікацій : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.05.04 / А. А. Нечидюк. Дніпропетровськ. 2002. 20 с.
96. Новожилов, В. В. Вопросы механики сплошной среды / В. В. Новожилов. Ленинград: Судостроение, 1989. 400 с.
97. Новые способы орошения садов и виноградников / В. І. Водяницький, П. В. Клочко, А. Д. Ляний и др.; Под ред. В. І. Водяницького. Київ: Урожай, 1987. 216 с.
98. Новые технологии проектирования, обоснования строительства, эксплуатации и управления мелиоративными системами: монография / Л. В. Кірейчева, Н. П. Карпенко, О. Б. Хохлов, Ю. А. Гольцов. Москва: ДНУ ВНІГіМ, 2010. С. 114–122.
99. Остапчик, В. П. Опытное обоснование техники трубчатого подпочвенного орошения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. / В. П. Остапчик. Москва, 1962. С. 5–19.
100. Панов, І. М. Физические основы механики почв / І. М. Панов, В. И. Вєтохін. Київ: Фенікс, 2008. 266 с.
101. Партон, В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. Москва: Наука, 1985. 504 с.

102. Патент 2032031 RU, МКИЗ E02F 5/10 Землеройный рабочий орган для бестраншейной укладки труб / С. В. Кравець, А. А. Нечидюк, В. Ф. Ткачук (Україна), А. Е. Калмиков (Росія), С. В. Ковальов (Україна). №4902864/03; заявл. 26.11.90; опубл. 27.03.95, Бюл. №9.

103. Патент на полезную модель 38342 RU, МКИЗ E02F 5/10 Землеройный рабочий орган для бестраншейного укладчика труб / Н. А. Єрмошин, С. Б. Норишев. № 2004106468/20; заявл. 27.02.2004; опубл. 10.06.2004.

104. Патент 101524 UA МПК A01V 13/00 Землерийний робочий орган / С. В. Кравець, О. Л. Романовський, О. Ю. Васильчук; заявник і власник патенту НУВГП – № а201105496; заявл. 29.04.2011; опубл. 10.04.2013; Бюл. № 7.

105. Патент на корисну модель 84266 UA, МПК E02F 5/10 Робочий орган трубоукладача / С. В. Кравець, О. Ю. Васильчук О. Л. Романовський, та ін.; заявник і власник патенту НУВГП – № u201306196; заявл. 20.05.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19.

106. Петров, Г. А. Гидравлика переменной массы (движение жидкости с изменением расхода вдоль пути) / Г. А. Петров. Харьков: ХГУ, 1964. С. 3–59.

107. Полянін, О. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / О. Д. Полянін. Москва, Фізматліт. 2001. 576 с.

108. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения / В. Л. Попов. Москва: ФІЗМАТЛІТ, 2013. 352 с.

109. Почвоведение. Учеб. Для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В. О. Ковди, Б. Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г. Д. Беліцина, В. Д. Василевська, Л. А. Гришина и др. Москва: Вищ. шк. 1988. С. 235–246.

110. Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. Москва: Наука, 1977. 664 с.

111. Проспект компанії «РосПайп». – Режим доступу: [http://ros-pipe.ru/clauses/stroitelstvo-remont-truboprovodov/klassifikatsiya-bestransheynykh-metodov-prokladki/-/](http://ros-pipe.ru/clauses/stroitelstvo-remont-truboprovodov/klassifikatsiya-bestransheynykh-metodov-prokladki/)
112. Проспект фірми «GOUCH ENGINEERING». – Режим доступу: <http://fieldchief.co.nz>
113. Проспект фірми «Михнєвський ремонтно – механічний завод». – Режим доступу: <http://www.cdminfo.ru>
114. Райхман, Д. Б. Анализ способов орошения в сельском хозяйстве / Д. Б. Райхман, Д. В. Зубоченко // Наук Праці ПФ НУБіП України «Кримський агротехнологічний університет», серія «Технічні науки», 2013. – №153. – С. 194-203.
115. Ребіндер, П. О. Избранные труды. Физико-химическая механика / П. О. Ребіндер. Москва: Наука, 1979. – 342 с.
116. Рекс, Л. М. Методика расчета тепловлагосолепереноса в насыщенных и ненасыщенных грунтах с помощью ЭВМ. Моделирование гидрогеохимических процессов и научные основы гидрогеохимических прогнозов. Москва: Наука, 1985. 152 с.
117. Ридигер, В. Р. Подпочвенное орошение по кротовым дренам / В. Р. Ридигер. Москва: Колос, 1965. 69 с.
118. Роде, О. О. Методы изучения водного режима почв / О. О. Роде. Москва: Вид. АН СРСР, 1960. 244 с.
119. Роде, О. О. Основы учения о почвенной влаге. Водные свойства почв и передвижение почвенной влаги / О. О. Роде. Ленинград: Гідрометеовидат, 1965. Т. 1. С. 362–621, 663.
120. Романовський, О. Л. К вопросу скольжения частицы грунта по клину в фазе уплотнения / О. Л. Романовський. *Тез. докл. наук. – техн. конф. Достижения научно-технического прогресса – в практику мелиоративного строительства*. Рівне, 1990. С. 21.

121. Романовський, О. Л. До питання про тиск ґрунту на лемеші багатоярусного землерийного робочого органа агромеліоративного агрегату / О. Л. Романовський. *Тез. наук. конф. УІВГ. 70 років, 1992.* С. 32.
122. Романовський, О. Л. Дослідження технологічного процесу роботи та обґрунтування параметрів багатоярусного робочого органа безтраншейного дреноукладача : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / О. Л. Романовський. Луцьк, 1996. 16 с.
123. Ромащенко, М. І. Системи крапельного зрошення: навчальний посібник / М. І. Ромащенко, В. І. Доценко, Д. М. Онопрієнко, О. І. Шевелєв. Дніпропетровськ, 2007. 175 с.
124. Ромащенко, М. І. Крапельне зрошення овочевих культур і картоплі в умовах Степу України / М. І. Ромащенко, А. П. Шатковський, С. В. Рябков. Київ: «ДІА», 2012. 248 с.
125. Садик Обейд Хасун. Влияние предшественников и азотных удобрений на свойства аллювиальных почв и продуктивность яровой пшеницы при орошении в условиях Центрального Ирака: автореф. дис.... канд. с.-г. н.: 06.01.01 / Обейд Хасун Садик. Москва, 2011. 14 с.
126. Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации / Є. С. Марков, ред. Москва, 1981. 89 с.
127. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Є. Листопад, под ред. Москва: Агропромвидат, 1986. 688 с.
128. Сінеоков, Г. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. М. Сінеоков, М. М. Панов. Москва: Машиностр., 1979. 328 с.
129. Смирнов, В. М. Повышение эффективности рабочих органов землеройных машин / В. М. Смирнов. Київ: Поліекс, 1993. 144 с.
130. Соколовский, В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовський. Москва: Вид-во фіз.- мат. літератури, 1960. 240 с.

131. Сорочкін, В. М. Изменение структуры почвы при уплотнении / В. М. Сорочкін, В. Н. Шептухов. *Праці Горьковського СГІ*. 1978. Т. 24. С. 49–54.
132. Справочник по орошаемому садоводству / В. І. Сенін, В. І. Водяницький, М. О. Барабаш и др.; Под. ред. В. І. Сеніна. Київ: Урожай, 1992. 192 с.
133. Судніцин, І. І. Закономерности передвижения почвенной влаги / І. І. Судніцин. Москва: Наука, 1964. С. 64–116.
134. Сукач, М. К. Модель пластической деформации грунта при щелевом резании / М. К. Сукач, Ю. П. Філонов, Р. Ю. Новіков. *Гірничі будівельні, дорожні і меліоративні машини. Всеукр. наук. зб. пр.* Київ: Техніка, 2011. № 77. С. 3–11.
135. Супонев, В. М. Определение параметров рабочего оборудования трубозаглубителей / В. М. Супонев. *Энергосбережение. Энергоаудит. Общегосударственный научно-производительный информационный журнал*. Харків: СВЕКО, 2006. Вип. 10. С. 23–30.
136. Томін, Є. Д. Бестраншейные дренажники в СССР и за рубежом / Є. Д. Томін, А. М. Єфремов, Б. І. Люлькін, В. М. Буравцев. *Обзорна інформація*. Москва: ЦБНТІ Мінводхоз СРСР, 1983. №13. С. 84.
137. Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі. О взаимодействии рабочего органа с почвой для образования кротовины / Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі, В. П. Ковбаса. *Науковий вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць*. Львів: РВВ НЛТУ України. 2016. Вип. 26.8. С. 347–355.
138. Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі. О динамических характеристиках и уплотнении почвы под воздействием кротователя / Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі, В. П. Ковбаса. *Науковий вісник НЛТУ України: Зб. наук.-техн. праць*. Львів: РВВ НЛТУ України. 2017. Вип. 27.1. С. 206–211.

139. Хайзерук, Є. М. Машины и механизмы для прокладки кабеля. Москва: Машиностроение, 1991. 352 с.
140. Хайліс, Г. А. О смещении дренажа при движении в неоднородном грунте / Г. А. Хайліс, Д. А. Вехалевський, В. В. Кованько. *Конструирование и технология производства сельскохозяйственных машин. Респ. міжвід. наук.-техн. зб.* Київ: Техніка, 1988. Вип. 18. С. 71–76.
141. Хархута, М. Я. Реологические свойства грунтов / М. Я. Хархута, В. М. Івлєв. Москва: НТІ Мінавтотранса и шос. доріг РСФСР, 1961. 64 с.
142. Цитович, М. О. Механика грунтов / М. О. Цитович Москва: Высшая школа, 1983. 288 с.
143. Черкасов, О. О. Мелиорация и сельскохозяйственное водоснабжение / О. О. Черкасов. Москва, 1958. 164 с.
144. Чернов, Г. І. Разработать режимы и технологию поверхностного орошения садов / Г. І. Чернов – Алма-Ата: Звіт КазНІПіВ. 1981. 170 с.
145. Шейнкін, Г. Ю. Техника и организация орошения в Таджикистане / Г. Ю. Шейнкін. Душанбе: "ІРФОН", 1970. 446 с.
146. Шелудченко, Б. А. Обоснование рабочего процесса и параметров глубоководных рабочих органов объемного типа: дисс.... к. т. н.: 05.20.01. / Б. А. Шелудченко. Глеваха, 1990. 207 с.
147. Шелудченко Б. А. Агротехніка ґрунтів / Б. А. Шелудченко. Житомир: Полісся, 1993. 290 с.
148. Шукле, Л. Реологические проблемы механики грунтов / Л. Шукле. Москва: Стройиздат, 1976. 486 с.
149. Шумаков, Б. Б. Методика расчета элементов техники и режима внутріпочвенного орошения / Б. Б. Шумаков, О. О. Алексащенко, Д. П. Гостіщев. *Гидротехника и мелиорация.* 1985. № 8. С. 41–43.

150. Buckingham, E. Studies on the movement of soil moisture / E. Buckingham. *VS. Dep. Agr. Bur. of soil. Bull.* 38. W., 1907. P. 44–51.
151. Boels, D. Effect of soil deformation in trenchless drain laying./ D. Boels. Research digest. ICW, Technical Bulletin 117, Institute for Land and Water Management, Wageningen. The Netherlands, 1980. P. 154–159.
152. Edlefsen, N. and Andersen A. Thermodynamics of soil moisture / N. Edlefsen, A. Andersen. *Hilgardia*. V. 15, 1943. P. 74–81.
153. Listopad, G. E. Technology Guide programmed cultivation of grain and forage crops on irrigated lands of the Lower Volga / G. E. Listopad, A. F. Ivanov, A. A. Klimov, V. I. Filin. Volgograd Agricultural Institute, 1979. P. 15–17.
154. Field testing of a Soil compaction model / S. C. Gupta, A. Hadas, D. Wolf, W. E. Larson, E. S. Schneder. *International conference on Soil Dynamics, Proceeding*. Auburn, Alabama, 1985. V. 5. P. 979–994.
155. Koefed, S. S. Kinematics and Power Requirement of Oscillation Tillage Tools / S. S. Koefed. *Journ. Agriculture Engineering Research*. 1969. 14 (1). P. 54–73.
156. Philip, J. The physical principles of Soil water movement during the irrigation cycle / J. Philip. *Aoc. 3rd Intern. Congr. Irrig. Drainage*. 8, 1957. P. 125–154.
157. Roce, C. Agricultural Physics / C. Roce. Oxford. Pergamen Press Ltd., 1966. 124 p.
158. Richards, L. E. Capillary condition of liquids through porous medium / L. E. Richards. *Physics*, 1931. V. 1. №5. P. 318–322.
159. Wikipedia. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>