

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

АЛЬ-ХАЗААЛІ ХАЙДЕР РААД НАДІМ

УДК 631.3:631.674

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИСТРОЮ
ДЛЯ ПРОКЛАДАННЯ ЗРОШУВАЧІВ ПЛОДОВИХ НАСАДЖЕНЬ**

05.05.11 «Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертація є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Ковбаса Володимир Петрович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тищенко Сергій Сергійович,
Дніпропетровський державний
аграрно-економічний університет,
професор кафедри вищої математики

доктор технічних наук, професор
Налобіна Олена Олександрівна,
Національний університет водного господарства
та природокористування,
професор кафедри будівельних, дорожніх,
меліоративних, сільськогосподарських машин
та обладнання

Захист відбудеться «03» жовтня 2017 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.06 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «02» вересня 2017 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. Л. Роговський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час площа земель із зрошувальною мережею в Іраку становить 3,5 млн га, а площа перспективного іригаційного фонду в країні досягає приблизно 5,5 млн га. При цьому середня щорічно зрошена площа, яка найбільшою мірою схильна до засолення, становить 1,67 млн га. Зрошувані землі в основному розташовані в центральній і південній частинах Іраку. Проте, в даний час на значних площах сильне засолення ґрунтів є перешкодою для господарського використання земель і вимагає проведення дорогих меліоративних робіт.

Фактор дбайливої витрати поливної води є вирішальним в умовах дефіциту водних ресурсів Іраку. На сьогодні сільське господарство Іраку безпосередньо залежить від наявності води, використання якої для потреб сільськогосподарського виробництва чітко регламентовано.

Зрошення – один із найбільш дієвих факторів інтенсифікації як сільського господарства в цілому, так і плідівництва. Існуючі зрошувальні системи, поряд із загальним позитивним ефектом, мають тенденцію негативних впливів на навколишнє природне середовище, яка полягає в нераціональному використанні водних ресурсів, низькому ККД, підвищенні рівня ґрунтових вод, вторинному засоленні ґрунтів і т. д. Крім того, дані системи енергоємні й дорого обходяться землеробським господарствам. В умовах зростаючого дефіциту водних та енергетичних ресурсів виникає необхідність у розробленні нових локальних способів зрошення, які забезпечують рівномірність зволоження ґрунту, одержання високих врожаїв фруктів при значному зниженні енерговитрат, експлуатаційних витрат і зрошувальної води. Позитивно вирішити дане питання можна на основі впровадження у виробництво нових прогресивних способів поливу, і, насамперед, з локальним характером зволоження ґрунту (підґрунтове зрошення). Внаслідок великих капітальних витрат на будівництво систем підґрунтового зрошення виникає питання про розроблення способів і робочих органів для зниження енергоємності такого будівництва.

Одним із найбільш перспективних з точки зору будівництва зрошувачів для систем підґрунтового зрошення є безтраншейне їх прокладання. При цьому слід враховувати той факт, що для підвищення ефективності роботи таких зрошувачів необхідно знизити процеси фільтрації в зоні їхньої дії. Мінімізувати фільтраційні процеси, які виникають при повному вологонасиченні ґрунту можна за допомогою застосування протифільтраційних екранів.

Тому розроблення робочих органів для безтраншейної прокладки систем підґрунтового зрошення спільно з укладанням протифільтраційного екрана є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно з науково-дослідною тематикою Національного університету біоресурсів і природокористування України при виконанні теми «Обґрунтувати параметри технічного стану сільськогосподарської техніки і режими функціонування систем технологічного забезпечення» (номер державної реєстрації 0113U007633).

Мета та завдання дослідження. Мета дослідження – знизити енергомiсткiсть та пiдвищити продуктивнiсть прокладання зрошувачiв iз протифiльтрацiйним екраном для плодoвих насаджень шляхом розроблення та оптимiзацiї параметрiв i режимiв роботи пристрою для виконання процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- виконати аналіз сучасного стану та перспектив розвитку iснуючих способiв та технiчних засобiв, параметрiв i режимiв їх роботи для зрошення сiльськогосподарських культур та вивчити закономірності пересування й розподілу вологи в активному шарі ґрунту за підґрунтового зрошення;

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

- проаналізувати ущiльнення стiнок порожнини при взаємодії з ґрунтом робочого органу;

- виконати аналіз енергоємності процесу одночасного утворення порожнини в ґрунті й протягування труби зрошувача з протифiльтрацiйним екраном;

- виконати аналіз стійкості склепіння порожнини, утвореної робочим органом у ґрунті;

- експериментально пiдтвердити адекватність отриманих теоретичних залежностей.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії робочого органу для прокладання зрошувача з протифiльтрацiйним екраном iз ґрунтом.

Предмет дослідження – взаємозв'язок параметрiв i режимiв роботи пристрою для прокладання зрошувача з властивостями ґрунту.

Методи дослідження. При проведенні теоретичних досліджень використовували методи механіки суцільних середовищ, зокрема механіки в'язко-пружності, механіки сипучих дискретних середовищ, математичної фізики, математичного аналізу. При проведенні експериментальних досліджень використовували як стандартні методи досліджень у галузі механізації сiльського господарства, так i розроблені автором оригінальні методики. Широке застосування знайшли методи електричних вимірювань неелектричних величин. При аналізі результатів теоретичних i експериментальних досліджень широко використовувалися прикладні комп'ютерні пакети, такі як Mathematica, Statistica.

Наукова новизна одержаних результатів. Набуло подальшого розвитку розв'язання задачі про взаємодію робочих органів різної геометричної форми в процесі утворення порожнини та ущiльнення її стiнок в ґрунті, який представлений у вигляді в'язко-пружного суцільного середовища.

Вперше визначено аналітичні функції зв'язку геометричних параметрiв i режимiв роботи робочого органу, а також механічних властивостей ґрунту зі змінами щiльності ґрунту в утвореній порожнині.

Розвинені аналітичні залежності визначення компонент сил опору руху робочого органу в ґрунті в залежності від його геометричних параметрiв i режимiв роботи, а також механічних властивостей ґрунту.

Отримала подальший розвиток умова створення стійкого склепіння в утвореній порожнині в залежності від параметрів самої порожнини та механічних властивостей ґрунту.

Практичне значення одержаних результатів полягає в науковому обґрунтуванні та експериментальному підтвердженні економічної доцільності та екологічної безпеки підґрунтового зрошення плодкових насаджень в умовах природно-кліматичних зон Іраку, що дозволяє знизити витрати поливної води, підвищити ефективність плодкових насаджень. Для забезпечення вищевикладеного ефекту розроблено робочий орган для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом і обґрунтовано його геометричні параметри та режими роботи в залежності від механічних властивостей ґрунту.

Окремі розроблення, моделі та залежності використовуються в навчальному процесі Національного університету біоресурсів і природокористування України при викладанні дисциплін «Механіка сільськогосподарських середовищ і матеріалів», «Механіка контактної взаємодії», «Теорія розрахунку сільськогосподарської техніки».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним дослідженням автора. Здобувачем самостійно проведено теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи, зокрема: проведено аналіз способів зрошення, відомих конструкцій машин для прокладання систем для підґрунтового зрошення; теоретично обґрунтовано методи формалізації процесів взаємодії робочого органу з ґрунтом; виконано теоретичні дослідження взаємодії робочого органу з ґрунтом; визначено залежності сил опору ґрунту руху робочого органу й переміщенню зрошувальної труби з протифільтраційним екраном; розроблено методику визначення раціональних параметрів і режимів роботи робочого органу; виготовлено експериментальну установку та проведено експериментальні дослідження для визначення адекватності отриманих теоретичних залежностей.

В опублікованій статті [1] автором виконано аналіз розповсюдження вологи у ґрунті при вирощуванні плодкових культур, зокрема винограду, проаналізовано застосовувані системи поливу цих насаджень. У статті [2] автором виконано аналіз способів поливу плодкових насаджень та технічних засобів для створення зрошувальних систем. В опублікованій статті [3] автором проаналізовано вплив параметрів та режимів роботи конусної частини робочого органу на кінематичні зміни у ґрунті, з яким взаємодіє частина робочого органу. У статті [4] автором виконано аналіз напружень, ущільнення та утворення кротовини у ґрунті конусною частиною робочого органу, визначено сили опору ґрунту переміщенню частини робочого органу. В опублікованій статті [5] автором виконано кінематичний аналіз змін швидкостей деформацій у ґрунті під дією лемішної частини робочого органу. У статті [6] автором виконано аналіз напружень, ущільнення та утворення порожнини у ґрунті лемішною частиною робочого органу, визначено сили опору ґрунту переміщенню частини робочого органу. В опублікованій статті [7] автором проаналізовано технічні засоби, що можуть використовуватись для

забезпечення зрошування плодкових насаджень в умовах Іраку. У статті [8] автором виконано аналіз необхідності розроблення технічних засобів для поливу винограду та плодкових насаджень в умовах Іраку.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи заслухані, обговорені і отримали позитивну оцінку на: I Міжнародній науково-практичній конференції «Інженерія систем природокористування» в рамках роботи XII Міжнародної агропромислової виставки «Агрофорум-2015» (м. Київ, 2015 р.); XXXVI Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми и перспективы развития науки в начале третьего тысячелетия в странах Европы и Азии» (м. Переяслав-Хмельницький, 2017 р.); VI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК» (м. Луцьк, 2017 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 11 наукових працях, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових виданнях іншої держави та 3 тези наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (158 найменувань) і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 173 сторінок, вона містить 5 таблиць та 48 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз стану питання» проаналізовано результати досліджень умов застосування систем підґрунтового зрошення, проаналізовано умови фільтраційного руху поливної води та можливості його зниження. Визначено фактори, що впливають на дифузійний перенос вологи й зони поширення вологи при такому перенесенні. Проведено аналіз способів і технічних засобів для прокладання систем підґрунтового зрошення. Проведено аналіз літературних джерел щодо методів формалізації ґрунту й вирішення завдань взаємодії робочих органів із ґрунтом. Питанню перенесення вологи присвячено роботи таких вчених як С. Ф. Авер'янов, С. В. Долгов, О. В. Ликов, О. І. Будаговський, І. І. Судніцин, А. Ф. Лебедев, О. О. Роде, Е. Букінгем, Н. Эдлефсен, Дж. Філіпом, Л. А. Річардс, О. М. Глобус, О. Д. Воронін та ін. Питанням безтраншейного прокладання комунікацій присвячено роботи С. В. Кравця, О. Л. Романовського, М. Д. Касліна, В. М. Супонєва та ін. Методам формалізації процесів взаємодії робочих органів з ґрунтом, представленим у вигляді деформівного суцільного середовища, присвячено роботи А. С. Кушнар'ова, П. Н. Бурченка, В. П. Ковбаси, А. Кулена, Х. Куїперса, Д. І. Золотаревської, В. М. Панова.

Проведений аналіз показав, що найбільш раціональним є прокладання систем підґрунтового зрошення безтраншейним способом із одночасним укладанням протифільтраційного екрана. При формалізації ґрунту доцільно використовувати модель квазісуцільного деформівного середовища з властивостями пружності та в'язкості. Для визначення раціональних параметрів і режимів роботи робочих органів необхідно вирішити контактні задачі взаємодії абсолютно твердої поверхні робочого органу з деформівним середовищем.

У другому розділі «Теоретичні дослідження конструктивних параметрів і режимів роботи робочого органу для укладання зрошувачів» розглянуто вихідні рівняння формалізації ґрунту як суцільного деформівного середовища з властивостями пружності та в'язкості в просторовій постановці. Ці рівняння дозволили встановити зв'язок компонент швидкостей деформацій із компонентами напружень з урахуванням пружних і в'язких механічних властивостей ґрунту. Такі рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta_1(1+\nu)}} \eta_1(1+\nu)(6\dot{\epsilon}_x - 3(\dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{\eta_1(1+\nu)}(1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu}); \\ \sigma_y &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta_1(1+\nu)}} \eta_1(1+\nu)(-3(\dot{\epsilon}_x - 2\dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{\eta_1(1+\nu)}(1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu}); \\ \sigma_z &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta_1(1+\nu)}} \eta_1(1+\nu)(-3(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y - 2\dot{\epsilon}_z) - \frac{e^{\eta_1(1+\nu)}(1+\nu)(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z)}{-1+2\nu}); \\ \tau_{xy} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta_1(1+\nu)}} \eta_1(1+\nu)\dot{\gamma}_{xy}, \tau_{yz} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta_1(1+\nu)}} \eta_1(1+\nu)\dot{\gamma}_{yz}, \tau_{xz} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta_1(1+\nu)}} \eta_1(1+\nu)\dot{\gamma}_{xz}\end{aligned}\quad (1)$$

де $\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\epsilon}_z$ – компоненти швидкостей лінійних деформацій, 1/с; $\dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{xz}, \dot{\gamma}_{yz}$ – компоненти зсувних деформацій, 1/с; G – модуль зсуву, Па; η_1 – модуль в'язкості зсувних деформацій, Пас; t – час деформування, с; ν – коефіцієнт бокового розширення (аналог коефіцієнта Пуассона для пружних деформацій). Для визначення компонент напружень (1) вирішувалася

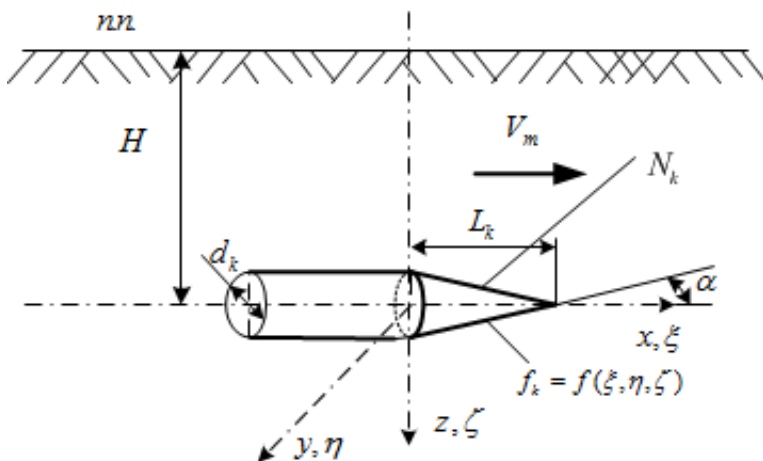


Рис. 1. Конусний робочий орган для утворення кротовини

контактна задача з кінематичними початковими умовами. Схема конусної частини робочого органу представлена на рис. 1.

Форма поверхні конуса в системі координат ξ, η, ζ , яка збігається з 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 осової симетрії відносно осі $O\xi$ коефіцієнти $a = b = r$, а коефіцієнт $\alpha = 1/\operatorname{tg}\alpha$, де α – кут нахилу твірної до

осі $o\xi$. У цьому випадку, з урахуванням зміщення вістря конуса на величину L_k , рівняння конуса 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 конуса біля основи.

Косинуси кутів нахилу нормалі до поверхні конуса до осей координат $o\xi, o\eta, o\zeta$ будуть виражені 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 потім цю нормальну складову спроектувати на осі координат $o\xi, o\eta, o\zeta$, то можна отримати компоненти швидкостей переміщень на осі координат у вигляді:

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

Ці вирази будуть вихідними для вирішення контактної задачі взаємодії конуса з ґрунтом в 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 подстановках геометричних рівнянь у фізичні рівняння зв'язку напружень із деформаціями та подальшою підстановкою 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) і 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 їх початковим значенням.

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

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

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

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

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

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

де $\xi_{k0}, \eta_{k0}, \zeta_{k0}, \xi_{kk}, \eta_{kk}, \zeta_{kk}$ – початкові та кінцеві значення координат конуса; $a_0 = 4/\pi \left(\text{Log}[-\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}] - \text{Log}[\delta + \sqrt{3}\sqrt{\delta^2}] \right)$ – коефіцієнт, що забезпечує виконання початкових умов при введенні малої величини δ , яка усуває сингулярність виразів.

У зв'язку зі складністю інтегрування рівнянь (2), 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. П. Ковбасою. В цьому випадку з використанням геометричних рівнянь Коші диференціальні складові компонент швидкостей деформацій матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} d\dot{t}_{xk} &= \frac{d}{dx} du_k = \frac{a_0 V_m ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 - 2(x + \delta - \xi_k)^2)}{((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2}}; \\ d\dot{\gamma}_{yzk} &= \frac{d}{dz} dv_k + \frac{d}{dy} dw_k = \frac{3a_0 r^2 V_m (z + \delta - \zeta_k)(y + \delta - \eta_k)(\zeta_k + \eta_k)}{a^2 ((z + \delta - \zeta_k)^2 + (y + \delta - \eta_k)^2 + (x + \delta - \xi_k)^2)^{5/2} (-L_k + \xi_k)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Враховуючи те, що аналізу підлягає зона безпосереднього контакту, а саме умови: $\{\zeta_k - z = 0, \eta_k - y = 0, \xi_k - x = 0\}$, вирази (3) істотно спрощуються.

Час деформування t , який входить до залежностей зв'язку напружень зі швидкостями деформацій, може бути визначений за часом поширення хвилі напружень. Швидкість поширення хвилі напружень: $c = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}$, де λ – коефіцієнт Ляме; ρ – щільність ґрунту; $\lambda = k - 2/3G$; $k = 2/3((1+\nu)/(1-2\nu))G$. Тоді час поширення хвилі:

$$\begin{aligned} t &= l/c = l/\sqrt{(E(-1+\nu)/(-1+\nu+2\nu^2))\rho} = \\ &= \sqrt{2}l/\sqrt{(G(-1+\nu))/((1+\nu)^2(-1+2\nu)\rho)}, \end{aligned}$$

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

З урахуванням викладеного вище шляхом інтегрування за границями, що представлені в рівняннях (3) виразів (1), в яких замість $\dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y, \dot{\varepsilon}_z$ та $\dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{xz}, \dot{\gamma}_{yz}$, підставлені значення $d\dot{\tau}_{xk}, d\dot{\tau}_{yk}, d\dot{\tau}_{zk}, d\dot{\gamma}_{xyk}, d\dot{\gamma}_{yzk}, d\dot{\gamma}_{xzk}$, отримаємо вирази зв'язку компонент напружень зі швидкістю переміщення робочого органу V_m , геометричними параметрами робочого органу та механічними властивостями ґрунту.

Використання регресійного рівняння зв'язку зміни щільності ґрунту зі зміною напружень у вигляді:

$$\rho_k = \rho_0 + b \ln[\sigma_m (1 + \tau_{\max})], \quad (4)$$

де ρ_k – кінцева щільність ґрунту $[\text{кг}/\text{м}^3]$; ρ_0 – початкова щільність ґрунту; σ_m – середнє або гідростатичне напруження в аналізованому обсязі; τ_{\max} – максимальне дотичне напруження в аналізованому обсязі; b – емпіричний коефіцієнт, який характерний для певного типу ґрунту за різної вологості, та підлягає експериментальному визначенню. Величина гідростатичного напруження визначається як: $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$, а величина максимального дотичного напруження для прикладних рішень, згідно з результатами досліджень В. В. Новожилова, може бути представлена середньоквадратичним компонент дотичних напружень у вигляді:

$\tau_{\max} = \sqrt{(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}/3$. Використовуючи вираз (4) та враховуючи те, що для конкретного ґрунту за певного стану величина $b = \text{const}$, з використанням вищевикладених результатів можна побудувати залежності зміни щільності ґрунту від його механічних властивостей, геометричних параметрів робочого органу та швидкості його руху. Самі залежності в кінцевому вигляді не можуть бути приведені в межах автореферату, графічна інтерпретація цих залежностей представлена на рис 2.

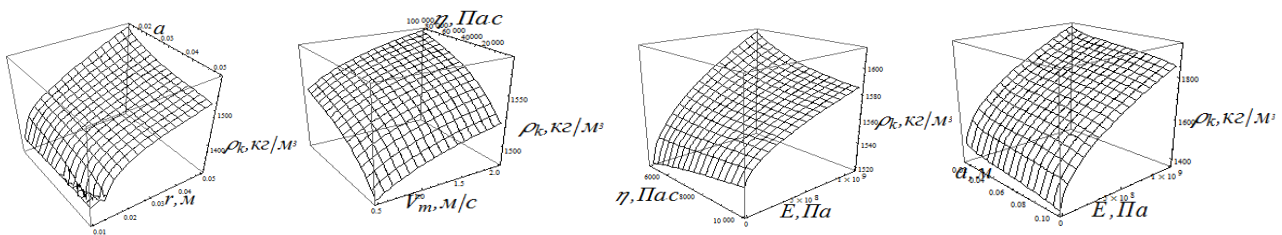


Рис. 2. Характерні графіки зміни щільності ґрунту ρ_k в залежності від модулів в'язкості η та пружності E ґрунту, радіуса r основи конуса, коефіцієнта, що характеризує його гостроту a , та швидкості його переміщення V_m

Для визначення сил опору ґрунту руху робочого органу використовували умови рівноваги на поверхні:

$$\begin{aligned} dF_x &= \sigma_x l_k + \tau_{xy} m_k + \tau_{xz} n_k; & dF_y &= \sigma_y m_k + \tau_{xy} l_k + \tau_{yz} n_k; \\ dF_z &= \sigma_z n_k + \tau_{xz} l_k + \tau_{yz} m_k, \end{aligned} \quad (5)$$

де dF_x, dF_y, dF_z – проекції на відповідні осі координат компонент тиску ґрунту на поверхню робочого органу.

Інтегрування виразів (5) за проекціями, перпендикулярними відповідним індексам компонент тисків, дає величини сил опору руху робочого органу в ґрунті:

$$F_x = \int_{-r}^r \int_{-r}^r dF_x d\eta d\zeta;$$

$$F_y = \int_{-r}^r \int_{-r}^0 dF_y d\xi d\zeta;$$

$$F_z = \int_{-r}^r \int_{-r}^0 dF_z d\xi d\eta.$$

Сумарний опір переміщенню конусної частини робочого органу в ґрунті складається зі складової опору ґрунту F_x та сил тертя по поверхні конуса, спроектованих на напрямку руху. Тоді загальна сила опору руху буде виражена так:

$$F_{xTk} = F_x - \left(\sqrt{(F_y m_k)^2 + (F_z n_k)^2} \right) \operatorname{tg}\psi, \quad (6)$$

де ψ – кут тертя ґрунту по матеріалу поверхні конуса.

Аналіз ущільнюючої дії лемішної частини робочого органу (рис. 3) проводився аналогічно аналізу для конусної частини. При цьому форма поверхні леміша була представлена рівнянням: $f_l = \frac{\xi}{a} + \frac{r-\eta}{b} + \frac{(r/2)-\zeta}{c} = 0$, де a, b, c – коефіцієнти, що визначають нахил нормалі до поверхні 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 виражаться залежностями:

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

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

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

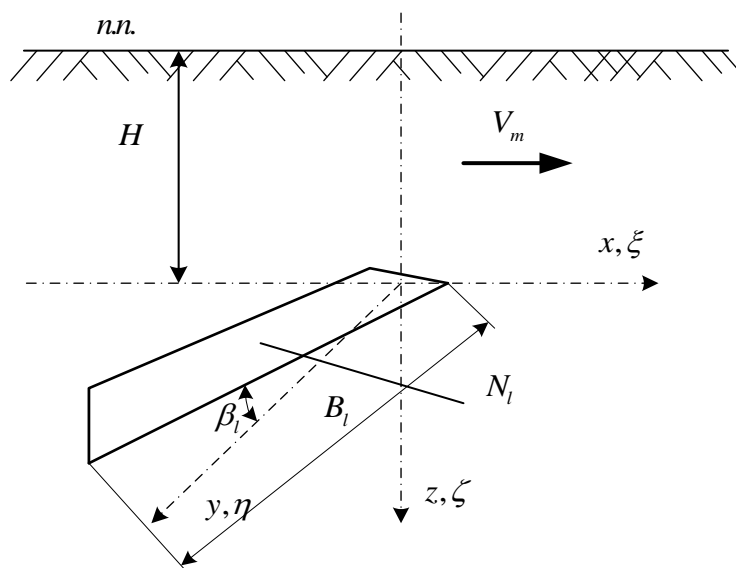


Рис. 3. Схема руху леміша

Швидкості переміщень ґрунту на поверхні леміша визначаються аналогічно тому, як це проводилося для конусного робочого органу, на підставі того, що проекція швидкості на нормаль до поверхні леміша має вигляд: $V_{Nl} = V_m / l_l$; $v_{l0} = V_{nl} m_l = -aV_m / b$; $w_{l0} = V_{nl} n_l = -aV_m / c$; $u_{l0} = V_{nl} l_l = V_m$.

Аналогічно до того, як було отримано зміни щільності для конусної частини робочого органу, визначалися функції зміни щільності ґрунту від впливу лемішної частини.

Аналогічно одержанню величини опору переміщенню конусної частини, отримано залежності опору руху лемішної частини робочого органу, які графічно представлено на рис. 4. 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 й складові опору ґрунту руху робочого органу в залежності від геометричних параметрів і режимів руху робочого органу, а також механічних властивостей ґрунту.

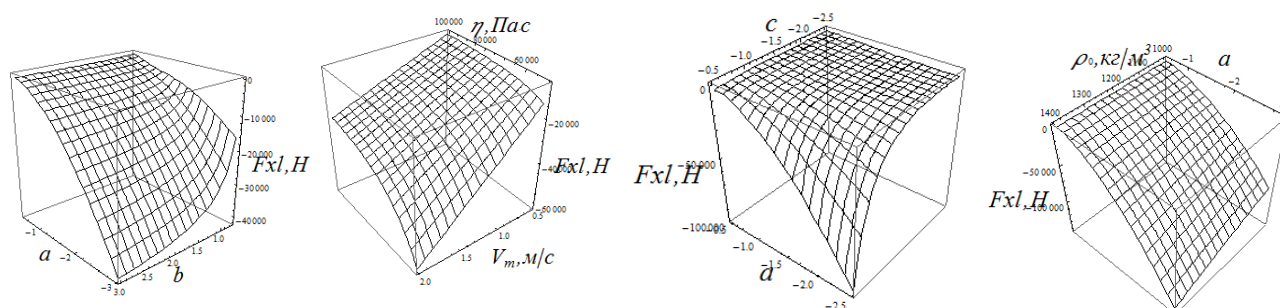


Рис. 4. Графіки залежностей опору руху леміша Fxl в напрямку переміщення робочого органу та зміни щільності ґрунту ρ_0 від модуля в'язкості ґрунту η , швидкості V_m переміщення леміша та коефіцієнтів a, b, c рівняння його площини

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 екрана, необхідно витратити великі зусилля.

Таким чином, дослідження показали, що для забезпечення безперешкодної протяжки екрана (мінімальне тертя екрана 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.

Для визначення сил опору протягування зрошувальної труби та протифільтраційного екрана використовувалися залежності, які побудовані з урахуванням дії розподіленого навантаження в поперечному перерізі опорної частини труби на дно кротовини. Дія розподіленого навантаження отримана за допомогою криволінійного інтеграла першого роду у вигляді:
 $p_y = P / \left(2r \sqrt{r^2 / (r^2 - y^2)} \right)$, де $P = mg$, де m – питома маса одиниці довжини труби. Інтегральна величина сили протягнення труби та протифільтраційного екрана визначалися залежностями:

$$\text{для труби} - F_t = \int \left(g m \pi \sqrt{r^2} \operatorname{tg}[\psi] / 4 |r| \right) dx = x g m \pi \sqrt{r^2} \operatorname{tg}[\psi] / 4 |r|, \quad (7)$$

$$\text{для екрана} - F_{te} = \int g m_e \operatorname{tg}[\psi_e] dx = x g m_e \operatorname{tg}[\psi_e], \quad (8)$$

де ψ , ψ_e – кути зовнішнього тертя труби та екрана по ґрунту, відповідно; m_e – питома маса одиниці довжини екрана.

Безперешкодне протягування зрошувальної труби з протифільтраційним екраном може бути забезпечене створенням стійкої до руйнування верхньої основи порожнини, створеної робочим органом. Найбільш відповідальним, з точки зору обвалення, є склепіння порожнини, створеної лемішною частиною. Тому була вирішена задача про стійкість склепіння. Як відомо, ґрунт може бути представлений як пластичне середовище, зокрема сипке зв'язне середовище. Це показали ще Хаар і Карман.

Тому, якщо уявити ґрунт як саме таке середовище (окремий випадок теорії пластичності), то для нього може бути застосований критерій міцності у вигляді, отриманому В. П. Ковбасою:

$$k = \frac{-3(\sigma \sin[\phi] + \tau_0 \cos[\phi])}{-3 + \sin[\phi]}, \quad (9)$$

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»).

Якщо взяти до уваги те, що після проходження робочого органу в ґрунті створюється клиноподібне (лінії ковзання середовища спрямовані під кутом до

вертикалі) розуцільнене тіло, причому, як прийнято в описі процесу обробітку ґрунту, кут нахилу ліній ковзання становить кут, що дорівнює 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 в 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. В цьому випадку гідростатичне напруження в клиноподібному просторі можна описати залежністю:

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

де b – деякий експериментальний коефіцієнт, який залежить від типу матеріалу й знаходиться в межах 0,5–1,5; ρ – щільність ґрунту; H – глибина ходу робочого органу; y – поточне значення поперечної координати леміша (порожнини).

Компоненти напружень на границі склепіння мають вигляд:

$$\sigma_y = \sigma - \frac{2}{3}k + 2k \cos[\alpha]^2; \sigma_z = \sigma - \frac{2}{3}k + 2k \sin[\alpha]^2;$$

$$\tau_{zy} = 2k \cos[\alpha] \sin[\alpha], \alpha = \pi/2 + \sqrt{z/H} + \sqrt{y/B},$$

де z – поточне значення вертикальної координати склепіння; B – ширина леміша (склепіння). Критичне напруження, за якого відбудеться руйнування ґрунту у склепінні створеної порожнини, матиме вигляд:

$$Kkr = - \frac{3\tau_0 \cos[\phi] + 2 \sqrt{e^{-\frac{2z}{b+H\operatorname{tg}[\phi]}} (e^{-\frac{z}{b+H\operatorname{tg}[\phi]}} (\tau_0 \cos[\phi] + bg\rho(-3 + \sin[\phi])) + bg\rho \operatorname{arctg}[\frac{b+H\operatorname{tg}[\phi]}{b+y+H\operatorname{tg}[\phi]}] (-3 + \sin[\phi]))^2}}{(-3 + \sin[\phi])^2} \sin[\phi]}{-3 + \sin[\phi]}. \quad (10)$$

Якщо порівнювати значення критичного напруження руйнування ґрунту й 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 (залежність отримана заміною в рівнянні (9) величини σ на величину гідростатичних тисків, створюваних лемішною частиною σ_l), що 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 створена стійка до руйнування порожнина, в якій протягується протифільтраційний екран без затиснення його обваленим склепінням утвореної порожнини. Графічно залежності k_l та Kkr наведені на рис. 5, рис. 6.

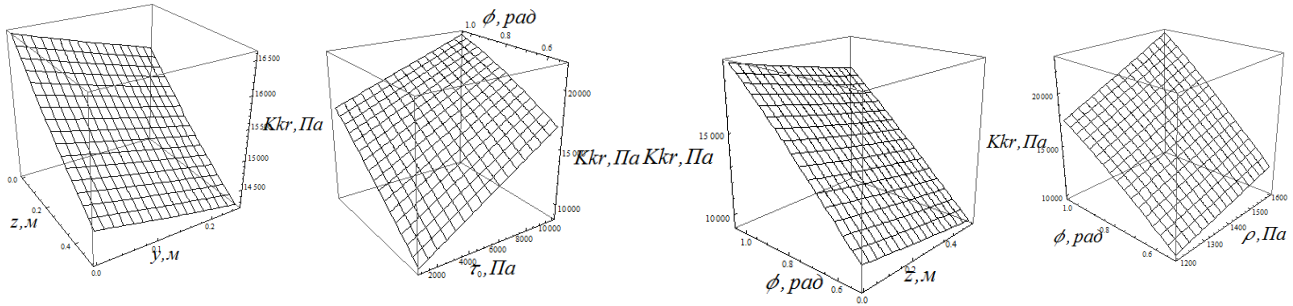


Рис. 5. Залежність критичного напруження Kkr руйнування ґрунту від координат порожнини й механічних властивостей ґрунту

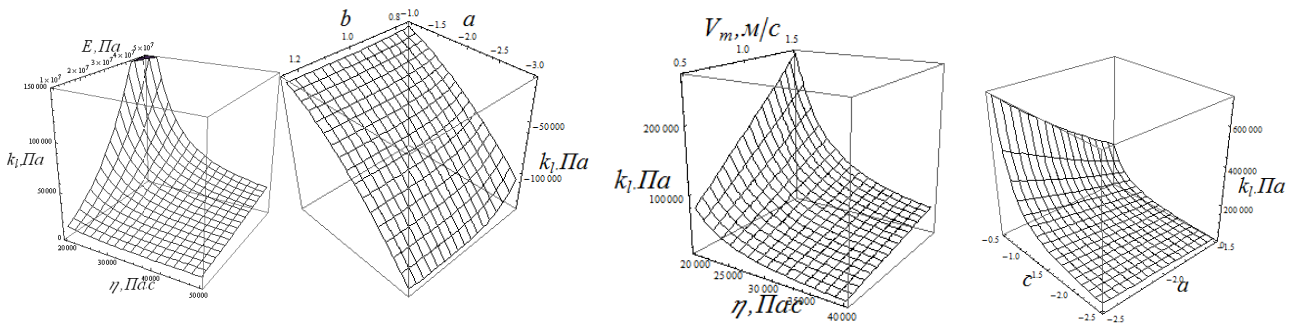


Рис. 6. Залежність критичних напружень k_l , створюваних лемішною частиною робочого органу на поверхні контакту його з ґрунтом, тобто поверхні склепіння, від параметрів леміша, швидкості його руху та властивостей ґрунту

Аналізуючи величини критичних напружень Kkr , утворених вагою клина ґрунту над порожниною (рис. 5), у верхній частині порожнини, яка створена лемішною частиною робочого органу, та критичними напруженнями k_l , створеними у верхній частині порожнини лемішною частиною робочого органу (рис. 6), за різних його параметрів і властивостей ґрунту, можна прийти до висновку, що критичні напруження, створені вагою ґрунту, не перевищують у більшій частині областей існування параметрів леміша та властивостей ґрунту критичних напружень, утворених лемішем. Це дозволяє судити про те, що верхня частина порожнини є стійкою проти руйнування й не повинна перешкоджати протягуванню протифільтраційного екрана.

У третьому розділі «Програма і методика 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 й лемішною частинами робочого органу для утворення кротовин;

– перевірка адекватності отриманих теоретичних залежностей протягнення зволожувача разом із протифільтраційним екраном.

Для визначення механічних властивостей ґрунту, таких як модуль поздовжньої пружності E , модуль зсуву G , коефіцієнт Пуассона η_1 , об'ємний модуль K , використана методика, що запропонована В. П. Ковбасою, з визначення об'ємного модуля пружності K й коефіцієнта в'язкості μ шляхом дослідження загасання коливань тягача на поверхні ґрунту.

Для визначення адекватності теоретичних залежностей опору руху робочого органу для утворення порожнини, в якій протягується зрошувач з 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. 7.

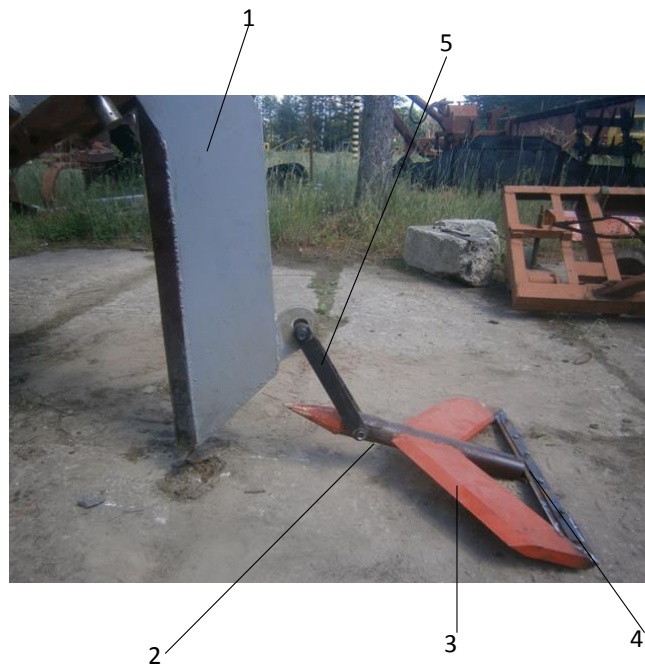


Рис. 7. Загальний вигляд робочого органу для протягнення зрошувача з протифільтраційним екраном, закріпленого до стійки щілинорізу: 1 – стійка щілинорізу; 2 – частина для утворення кротовини; 3 – лемішна частина; 4 – затискна частина для кріплення протифільтраційного екрана; 5 – тяговий поводок для самовстановлення робочого органу.

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 системою зрошувача у вигляді труби з протифільтраційним екраном. При цьому опір протягування протифільтраційного екрана 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.

На завершальному етапі тензометрування проводили протягнення всього комплексу, що складається зі стійки із закріпленим на ній робочим органом та прикріпленої до неї системою зрошувача у вигляді труби з протифільтраційним екраном. При цьому опір протягування протифільтраційного екрана 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.

Вимірювання тягових опорів проводилися з використанням електронного динамометра «Індикатор ІЕ-03-В», реєстрація сигналу з якого передавалася через АЦП в комп'ютер (рис. 8), в якому реєструвалася цифрова інформація про силу в реальному часі. Перед застосуванням вказаного вище індикатора сили проводилося попереднє грубе вимірювання сили тяги стрілочним динамометром.

У четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень» наведено результати визначення механічних властивостей ґрунту, що проводили згідно з методикою, описаною в третьому розділі. У розділі представлені результати тензометрування тягових опорів складових агрегату й окремих частин робочого органу (рис. 8).



Рис. 8. Агрегування агрегату цугом із включеною тензометричною апаратурою

При цьому використовувався робочий орган з наступними геометричними параметрами: $L_l = -B \cos[1/a]$, 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 – $\tau_0 = 2000 \text{ Па}$, коефіцієнт бокового розширення – $\nu = 0.4$, щільність – $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$, модуль в'язкості зсувних деформацій – $\eta_1 = 3.8 \cdot 10^4 \text{ Па с}$, модуль пружності лінійних деформацій – $E = 3.3 \cdot 10^7 \text{ Па}$, кут зовнішнього тертя по поверхні леміша – $\psi = \pi/4$. Аналогічно було проведено тензометрування на середньосуглинковому ґрунті з такими властивостями: модуль пружності лінійних деформацій – $E_2 = 7.02743 \cdot 10^7 \text{ Па}$, модуль в'язкості зсувних деформацій – $\eta_2 = 45115 \text{ Па с}$, напруження початкового зсуву – $\tau_{02} = 4970 \text{ Па}$.

Характерні осцилограми наведено на рис. 9–11.

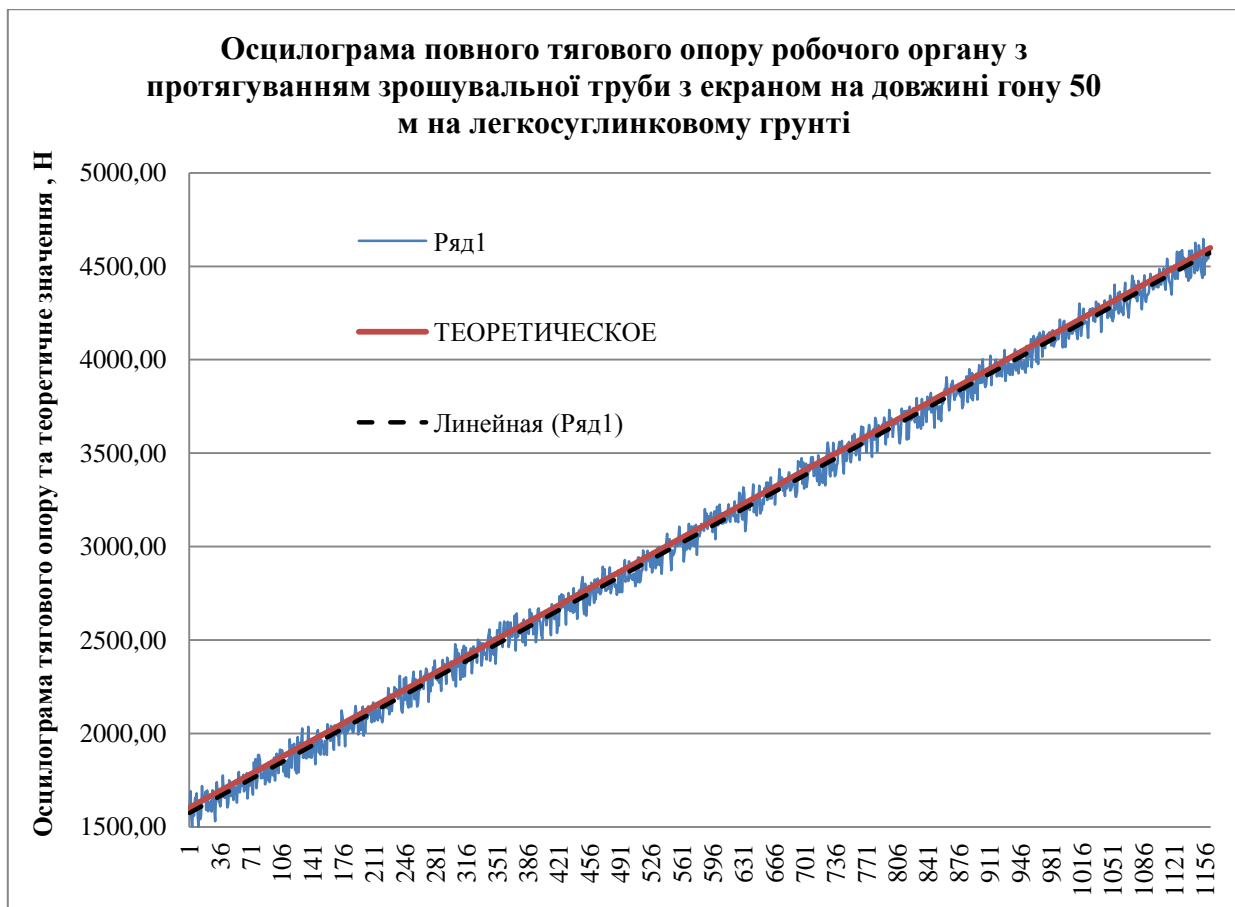


Рис. 9. Повний запис тягового опору робочого органу з протягненням зрошувальної труби та протифільтраційного екрана на довжині гону 50 м: ряд 1 – осцилограма; ряд 2 – теоретичне значення опору; ряд 3 – лінійна апроксимація осцилограми 1 для легкосуглинкового ґрунту.

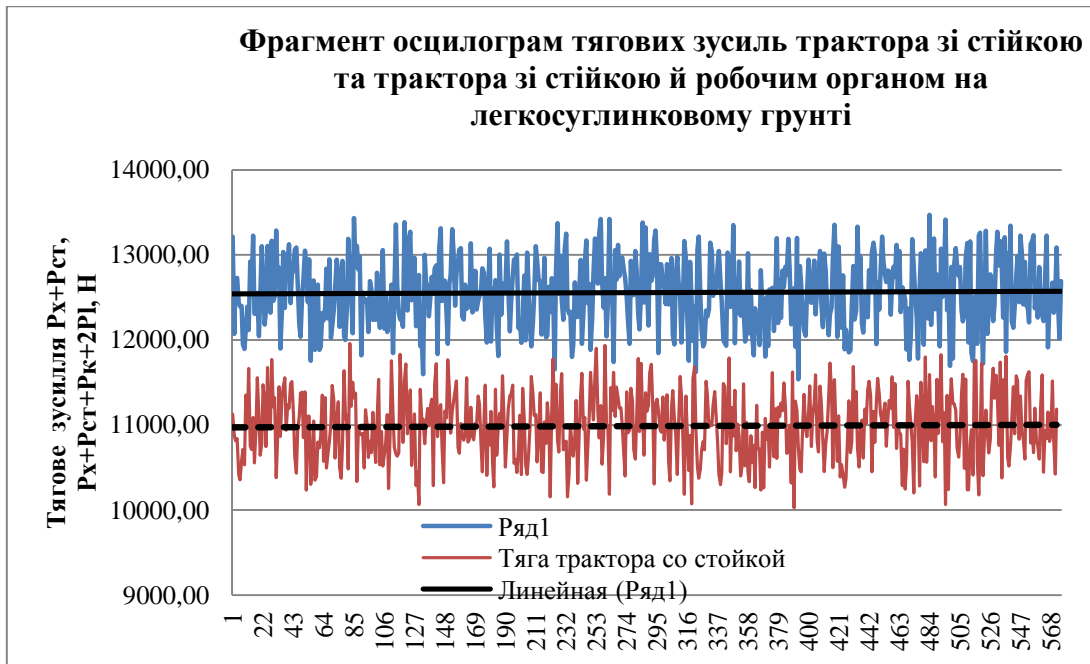


Рис. 10. Фрагмент характерних осцилограм тягового опору робочого органу (конусна і лемішна частина): ряд 1 – осцилограма тягового опору холостого ходу буксированого трактора зі стійкою та робочим органом (конусна і лемішна частини); 2 – осцилограма тягового опору буксированого трактора зі стійкою кріплення робочого органу; ряди 3, 4 – лінійні апроксимації осцилограм (ряд 1 і ряд 2) для легкосуглинкового ґрунту.

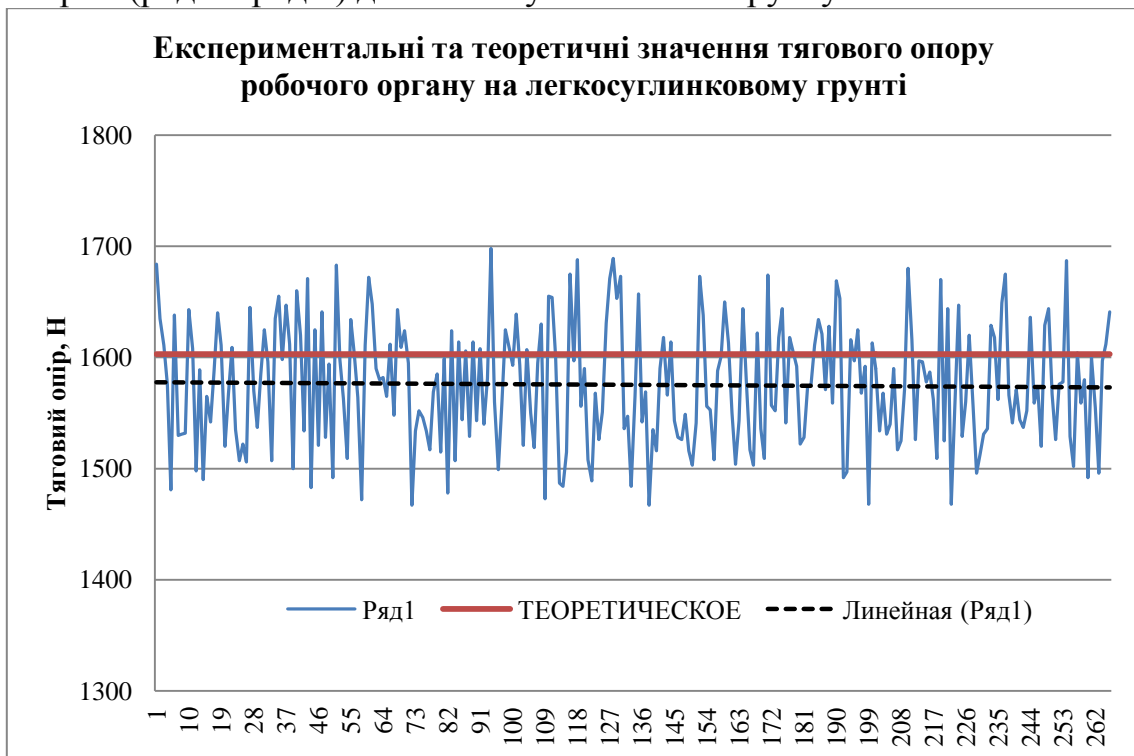


Рис. 11. Фрагмент характерної осцилограми тягового опору робочого органу (конусна й лемішна частини): ряд 1 – осцилограма тягового опору робочого органу (конусна й лемішна частини); 2 – теоретичне значення тягового опору робочого органу (конусна й лемішна частини); ряд 3 – лінійна апроксимація осцилограми (ряд 1) для легкосуглинкового ґрунту.

Результати визначення зусиль протягування зрошувальної труби разом із протифільтраційним екраном, які знаходили з теоретичних залежностей 7, 8 в сумі з залежностями 6, та аналогічно для лемішної частини, зіставлялися з результатами повного зусилля протягування, за винятком опору перекочуванню трактора й опору руху стійки. Результати теоретичних досліджень адекватні за рівня значущості $\alpha = 0.15$.

У п'ятому розділі «Аналіз енергетичної ефективності укладання зрошувальної труби з протифільтраційним екраном» за результатами тензометрування робочого органу та витрат енергії на протягування стійки робочого органу й перекочування трактора по полю наводяться витрати енергії для безтраншейного прокладання зрошувальної труби разом із протифільтраційним екраном.

Аналіз результатів дає підстави зробити висновок, що ефективність використання запропонованого пристрою у порівнянні з традиційним укладанням зрошувальної системи з використанням екскаватора в залежності від властивостей ґрунту за економією палива складає 65–75 %.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проаналізовано оптимальні способи укладання підґрунтових зрошувальних систем. Це дозволило розробити раціональне технічне рішення для їх створення. Вирішено задачі, 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 підґрунтового поливу можна зробити висновок про те, що зрошувачі для багаторічних плодових насаджень можуть укладатися з кроком до 2 м на глибину близько 0,5 м.

2. Результати вивчення закономірностей пересування вологи в ґрунті за підґрунтового 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. Найбільш адекватним, з точки зору формалізації взаємодії робочого органу для безтраншейного укладання зрошувальної труби разом із протифільтраційним екраном, є подання ґрунту як квазісуцільного ізотропного середовища з властивостями пружності та в'язкості.

5. На основі рішення контактної задачі взаємодії конусної частини робочого органу визначено раціональні геометричні параметри, завдяки яким у

максимальній мірі 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 $r \approx 1.1r_i$, де r_i – 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 у максимальній мірі 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 м, при цьому висота проекції леміша на вертикально-поперечну площину в зоні зіткнення з конусною частиною становить величину $r \approx 1.1r_i$.

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_i , 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. Співставлення 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 у порівнянні з традиційним укладанням зрошувальної системи з використанням екскаватора в залежності від властивостей ґрунту складає 65–75 % лише за економією палива.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Дубровін В. О., Броварець О. О., Аль-Хазаалі Хайдер Раад Надім. Екологія вирощування винограду. Науковий вісник Національного

університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 196. Ч. 1. С. 13–21. *(Здобувачем виконано аналіз природно-кліматичних умов Іраку та охарактеризовано екологічність вирощування винограду).*

2. **Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі**, Ковбаса В. П. Анализ конструкций систем и способов укладки увлажнителей для внутрпочвенного орошения плодовых насаждений. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. № 6(63). Режим доступу: <file:///D:/DOCUMENT/ХАЙДЕР%20из%20ТОМ/статьи/Хайдер%20Наукові%20доповіді%20НУБП/7565-15259-1-SM.PDF>. *(Здобувачем обґрунтовано параметри конструкцій і визначено динамічні характеристики робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом на процес їх взаємодії з ґрунтовим середовищем).*

3. **Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі**, Ковбаса В. П. О взаимодействии рабочего органа с почвой для образования кротовины. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2016. Вип. 26.8. С. 347–355. *(Здобувачем визначено динамічні характеристики робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом на процес їх взаємодії з ґрунтовим середовищем).*

4. **Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі**, Ковбаса В. П. О динамических характеристиках и уплотнении почвы под воздействием кротователя. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2017. Вип. 27.1. С. 206–211. *(Здобувачем визначено динамічні характеристики робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом на процес їх взаємодії з ґрунтовим середовищем).*

5. Ковбаса В. П., **Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі**. Кинематика взаимодействия лемеха кротователя с почвой при образовании полости для противофильтрационного экрана. Сільськогосподарські машини. 2017. Вип. 36. С. 77–91. *(Здобувачем визначено кінематичні характеристики робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом на процес їх взаємодії з ґрунтовим середовищем).*

6. Ковбаса В. П., **Хайдер Раад Надім Аль-Хазаалі**. Динамика взаимодействия лемеха кротователя с почвой при образовании полости для противофильтрационного экрана. Сільськогосподарські машини. 2017. Вип. 36. С. 91–100. *(Здобувачем визначено динамічні характеристики робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом на процес їх взаємодії з ґрунтовим середовищем).*

Статті в науковому виданні іншої держави:

7. Дубровин Валерий, Броварець Александр, **Аль-Хазаалі Хайдер Раад Надім**. Состояние проблемы и необходимость разработки комплекса оборудования для полива винограда при выращивании в природно-климатических зонах Ирака. Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2014. Vol. 16. № 3. P. 202–207. *(Здобувачем виконано аналіз*

природно-кліматичних умов Іраку та охарактеризовано екологічність вирощування винограду).

8. Ковбаса Владимир, **Аль-Хазаали Хайдер Раад Надим**. Анализ способов и технических средств для орошения плодовых насаждений в условиях Ирака. Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2016. Vol. 18. № 3. P. 200–210. *(Здобувачем обґрунтовано методи та засоби оцінки властивостей робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом).*

Тези наукових доповідей:

9. Аль-Хазаалі Хайдер Раад Надім. Анализ исследований подпочвенного орошения в плодовых насаждениях. Інженерія систем природокористування: I Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 11 листопада 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 80–82.

10. Ковбаса В. П., **Аль-Хазаалі Хайдер Раад Надім**. Взаимодействие рабочего органа кротователя с почвой при прокладывании увлажнителей. Проблемы и перспективы развития науки в начале третьего тысячелетия в странах Европы и Азии: XXXVI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція, м. Переяслав-Хмельницький, 30–31 березня 2017 року: тези доповіді. Переяслав-Хмельницький, 2017. С. 164–166. Режим доступу до тез: http://conferences.neasmo.org.ua/uploads/conference/file/39/conference_30-31.3.2017.pdf. *(Здобувачем обґрунтовано процес взаємодії робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом з ґрунтовим середовищем).*

11. Ковбаса В. П., **Аль-Хазаалі Хайдер Раад Надім**. Об обосновании параметров и режимов работы кротователя для бестраншейной протяжки оросителей. Інноваційні технології в АПК: VI Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Луцьк, 23–25 травня 2017 року: тези доповіді. Луцьк, 2017. С. 28–31. *(Здобувачем обґрунтовано параметри і режими роботи робочого органу для прокладання зрошувача з протифільтраційним екраном безтраншейним способом).*

АНОТАЦІЯ

Аль-Хазаалі Хайдер Раад Надім. Обґрунтування параметрів і режимів роботи пристрою для прокладання зрошувачів плодкових насаджень. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.11. «Машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва». – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2017.

У дисертаційній роботі виконано аналіз сучасного стану та перспектив розвитку існуючих способів та технічних засобів, параметрів і режимів їхньої роботи для зрошення сільськогосподарських культур; проаналізовано результати досліджень умов застосування системи підґрунтового зрошення;

вивчено закономірності пересування й розподілу вологи в активному шарі ґрунту за підґрунтового зрошення; проаналізовано умови фільтраційного руху води для поливу та можливості його зниження. Проведено аналіз способів та технічних засобів для прокладання системи підґрунтового зрошення з застосуванням протифільтраційного екрану, що дозволяє зменшити вплив гравітаційного переносу вологи та підвищити дифузійний її перенос.

Виконано аналіз літературних джерел по методам формалізації ґрунту та розв'язанню задач взаємодії робочих органів із ґрунтом.

Проведений аналіз показав, що найбільш раціональним є прокладання системи підґрунтового зрошення безтраншейним способом з одночасним укладанням протифільтраційного екрану. При формалізації ґрунту доцільно використовувати модель квазісуцільного деформівного середовища з властивостями пружності та в'язкості. Для визначення раціональних параметрів і режимів роботи робочих органів необхідно розв'язати контактні задачі взаємодії абсолютно твердої поверхні робочого органу з деформівним середовищем.

Розглянуті вихідні рівняння формалізації ґрунту як суцільного деформівного середовища з властивостями пружності та в'язкості у просторовій постановці. Розв'язання контактних задач взаємодії робочих органів з ґрунтом із використанням фізичних рівнянь зв'язку компонент напружень з компонентами швидкостей деформацій дозволило встановити вплив геометричних параметрів та режимів роботи робочого органу та механічних властивостей ґрунту на зміни компонент швидкостей його переміщень, швидкостей деформацій, а також змін компонент напружень у ґрунті. Отримані залежності дозволили визначити функціональні зв'язки параметрів та режимів роботи робочого органу, а також механічних властивостей ґрунту на зміни його щільності в зоні контакту з робочим органом.

Ключові слова: робочий орган, конусна частина робочого органу, лемішна частина робочого органу, формалізація ґрунту, контактна задача взаємодії, в'язко-пружна модель формалізації, сипуче дискретне середовище, утворення склепіння, сили опору пересуванню.

АННОТАЦІЯ

Аль-Хазаали Хайдер Раад Надим. Обоснование параметров и режимов работы устройства для прокладки оросителей плодовых насаждений. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11. «Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства». – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2017.

В диссертационной работе выполнен анализ современного состояния и перспектив развития существующих способов и технических средств, параметров и режимов их работы для орошения сельскохозяйственных культур,

проанализированы результаты исследований условий применения системы подпочвенного орошения, изучены закономерности передвижения и распределения влаги в активном слое почвы за подпочвенного орошения, проанализированы условия фильтрационного движения воды для полива и возможности его снижения. Проведен анализ способов и технических средств для прокладки системы подпочвенного орошения с применением противофильтрационного экрана, что позволяет уменьшить влияние гравитационного переноса влаги и повысить диффузионный ее перенос.

Выполнен анализ литературных источников по методам формализации почвы и решению задач взаимодействия рабочих органов с грунтом.

Проведенный анализ показал, что наиболее рациональным является прокладка системы подпочвенного орошения бестраншейным способом с одновременной укладкой противофильтрационного экрана. При формализации почвы целесообразно использовать модель квазисплошной деформируемой среды со свойствами упругости и вязкости. Для определения рациональных параметров и режимов работы рабочих органов необходимо решить контактные задачи взаимодействия абсолютно твердой поверхности рабочего органа с деформирующей средой.

Рассмотрены исходные уравнения формализации грунта как сплошной деформируемой среды со свойствами упругости и вязкости в пространственной постановке. Решение контактных задач взаимодействия рабочих органов с почвой с использованием физических уравнений связи компонент напряжений с компонентами скоростей деформаций позволило установить влияние геометрических параметров и режимов работы рабочего органа и механических свойств почвы на изменения компонент скоростей его перемещений, скоростей деформаций, а также изменения компонент напряжений в почве. Полученные зависимости позволили определить функциональные связи параметров и режимов работы рабочего органа, а также механических свойств почвы на изменения его плотности в зоне контакта с рабочим органом.

Ключевые слова: рабочий орган, конусная часть рабочего органа, лемешная часть рабочего органа, формализация почвы, контактная задача взаимодействия, вязко-упругая модель формализации, сыпучие дискретное среда, образование свода, силы сопротивления передвижению.

ANNOTATION

Al-Khazaal Haider Raad Nadym. Justification of parameters and modes of operation of the device for laying the sprinklers fruit trees. – The Manuscript.

The dissertation on competition of scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.11. Machines and Means of Mechanization of agricultural production. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev, 2017.

In this thesis the analysis of the current state and prospects of development of existing methods and technical means of parameters and their modes of operation for irrigation of agricultural crops; examine the results of the research applications

system subsurface irrigation; studied the patterns of movement and distribution of moisture in the active soil layer for subsurface irrigation; analysis of conditions of a filtration of water movement for irrigation and decrease. The evaluation of the methods and technical means for the strip system subsurface irrigation with the use of anti-filtration screen, which allows to reduce the influence of the gravitational migration of moisture and enhance its diffusion transfer.

The analysis of the literature on methods of formalization of the soil and solution of problems of interaction of tools with soil.

The analysis showed that the most efficient is the laying system subsurface irrigation trenchless method with the simultaneous laying of impervious screen. With the formalization of the soil, it is advisable to use the model quasi-continuous a deformable medium with the properties of elasticity and viscosity. For determination of rational parameters and operation modes of the tools is necessary to solve the contact problem of interaction of absolutely hard surface of the tool with the deforming medium.

The original equations of the formalization of the soil as a continuous deformable medium with the properties of elasticity and viscosity in a spatial setting. Solution of contact problems of interaction of tools with soil using physical equations of the component stresses with the components of the strain rate has allowed to establish the influence of geometrical parameters and modes of the tool and mechanical soil properties to changes in the component velocities of its displacements, velocities, deformations, and changes in the component stresses in the soil. The dependences allowed us to determine the functional relationship of parameters and modes of the tool and mechanical soil properties to changes in density in the zone of contact with the tool.

To analyze the stability of the arch was used the formalization of the soil as free-flowing discrete medium, which is a special case of the theory of plasticity, because the soil in the process of interaction with the tool is experiencing plastic deformations. This analysis using the failure criterion of Coulomb-Mohr showed the impact of connection parameters and modes of the tool to the mechanical properties of the soil on the possible formation of a stable arch that should ensure easy pulling of impervious screen together with the irrigation pipe.

In this dissertation analyzed the optimal methods of laying subsurface irrigation systems are allowed to determine the rational technical solution to create them. Solved problems related to finding of rational parameters and operation modes of the tool for trenchless laying of irrigation pipes along with anti-filtration screen.

Analysis of the results of studies on the propagation of liquid in the soil under the threat of salinization of the soil and in conditions of high moisture evaporation from the soil surface allowed to make a conclusion about the most rational method of the creation of irrigation network. Thus, on the basis of the analysis subsurface irrigation can be concluded that sprinklers for perennial fruit plantings can be placed in increments of up to 2 meters to a depth of 0.5 meters.

The results of studying laws of movement of moisture in the soil when subsurface irrigation allow us to conclude that the greatest distribution of moisture in the perpendicular direction from the axis of the sprinkler will be provided by

diffusion transfer of moisture at the lowest possible filtration processes that occur during full water saturation. This requires the use of impervious screen.

Analysis of methods of laying subsurface irrigation systems with protein the screen allowed us to conclude about the absence of technical means for performing such operations trenchless method.

The most appropriate from the point of view of formalizing the interaction of the working body for trenchless laying of irrigation pipes along with anti-filtration screen, is a representation of the soil as quasi-continuous isotropic medium with the properties of elasticity and viscosity.

Based on the decision of contact problems of interaction of the conical part of the tool is determined by its rational geometric parameters that, to the maximum extent of the seal walls formed of the cavity and provide a minimum soil resistance to its movement. Thus, for most of the soil mechanical characteristics are such the most rational geometrical parameters of the conical part of the tool: the acute $a \approx 0.02$, the base radius of the cone $r \approx 1.1r_t$, where r_t – the radius of the tube of the sprinkler at a speed of $V_m \approx 1M/c$.

Based on the decision of contact problems of interaction of the share mole plow is determined by its rational geometric parameters that, to the maximum extent of the seal walls formed of the cavity and provide a minimum soil resistance to its movement. For most of the soil mechanical characteristics, the most rational geometrical parameters of the share mole plow on will be such: shingles can be made in the form of a plane with the lowest possible coefficients of slopes of the surface normal to the coordinate axes: $oy - b < 1$, $oz - c < -1$, $ox - a \rightarrow -2$ and the geometric size of share mole plow should exceed napustio impervious screen (0.25 m), the height of the projection of share mole plow in a vertically transverse plane in the zone of contact with the cone part is the value $r \approx 1.1r_t$.

As a result of theoretical researches the analytical dependence of the resistance of soil to movement of the tool, which depend on the geometric parameters of the tool, the speed of movement and mechanical properties of the soil.

Analyzing the values of critical stresses Kkr in the upper part of the cavity formed by share mole plow created by the weight of the wedge of soil above the cavity, and the critical stresses k_1 are created in the upper part of the cavity by the share mole plow in its various settings and properties of the soil, it can be concluded that the upper part of the cavity is resistant to destruction and should not prevent to pulling of impervious screen.

Comparison of the obtained theoretical dependences of the resistance to movement of the tool in the soil and resistance to pulling of the irrigation pipe along with impervious screen with the results of experimental studies on 2 types of soils allows to judge the adequacy of the theoretical results on statistical significance level $\alpha = 0.25$.

Key words: the tool, the tapered part of the tool, share mole plow, the formalization of the soil contact problem of the interaction, visco-elastic model formalization, granular discrete medium, the creation of the arches, the forces of resistance to movement.

Підписано до друку 31.08.2017 р.
Ум. друк. арк. 0,9
Наклад 100 прим.

Формат 60×80/16
Обл.-вид. арк. 0,9
Зам. № 9366.

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв оборони, 15, Київ-41, 03041
тел.: 527-81-55