МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ЛУК'ЯНЧУК ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

УДК 631.62:631.312.5 (043.3)

НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ЗАСАДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ГЛИБОКОГО МЕЛІОРАТИВНОГО РОЗПУШЕННЯ ОСУШУВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ҐРУНТІВ

06.01.02 – сільськогосподарські меліорації

(технічні науки)

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Рівне – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті водного господарства та природокористування (НУВГП) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
Рокочинський Анатолій Миколайович,
Національний університет водного господарства та природокористування, професор кафедри водної інженерії та водних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Сташук Василь Андрійович,
Київський аграрний університет НААН України,
проректор з наукової роботи;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Чарний Дмитро Володимирович,
ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища» НАН України, завідувач відділу проблем поводження з радіоактивними відходами;

доктор технічних наук, професор,
Дідух Володимир Федорович,
Луцький національний технічний університет,
професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г. А. Хайліса.

Захист дисертації відбудеться « 19 » вересня 2025 р. о $11^{\underline{00}}$ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 47.104.01 Національного університету водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України за адресою: 33028, м. Рівне, вул. Соборна 11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету водного господарства та природокористування за адресою:
33000, м. Рівне, вул. Олекси Новака, 75.

Реферат розіслано « 14 » серпня 2025 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент С.В. Сунічук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Серед найбільших викликів сучасності гостро постає питання продовольчої, водної та екологічної безпеки, що загострюються через зміни кліматичних та антропогенних чинників як на планетарному, так і регіональних рівнях. Сучасні кліматичні зміни чинять несприятливий вплив на еколого-меліоративний стан ґрунтів та їх водно-фізичні властивості. Підвищення температури повітря, збільшення кліматичного дефіциту та посилення посушливості неминуче призводить до збільшення сумарного випаровування і, як наслідок, значного збільшення загальної водопотреби при забезпеченні необхідного рівня врожайності вирощуваних культур.

Однією з головних проблем у водному господарстві України, при глобальних масштабах продовольчої, водної та енергетичної криз, є проблема дефіциту природного вологозабезпечення, яка виступає основним чинником, що обмежує продуктивність сільськогосподарських угідь й потенціал аграрного виробництва на землях з регульованим водним режимом.

Зміна природніх умов визначає необхідність зміни вимог для раціонального використання водних і земельних ресурсів меліорованих земель. Внаслідок чого надзвичайно актуальним постає питання щодо зміни підходів до функціонування водогосподарсько-меліоративних об’єктів, напрямів та шляхів підвищення загальної та еколого-економічної ефективності функціонування меліоративних систем.

Для осушувальних мінеральних ґрунтів це можливо на підставі розробки комплексу адаптивних, в тому числі, агромеліоративних заходів, спрямованих на ефективне регулювання водного режиму, зарегулювання і акумуляції вологи в ґрунтовому профілі в межах меліоративної системи, підвищення вологозабезпеченості ґрунтів тощо.

Існуючі технології і технічні засоби глибокого меліоративного розпушення, як один з найбільш перспективних агромеліоративних заходів, у традиційному варіанті вже не забезпечують необхідну ефективність розпушення та відповідні водно-фізичні властивості осушуваних мінеральних ґрунтів, а тому потребують внесення технологічних змін та конструктивного вдосконалення для ефективної реалізації змінюваних підходів до адаптивного водорегулювання, підвищення вологозабезпеченості та поліпшення еколого-меліоративного стану осушуваних мінеральних ґрунтів щодо змінюваних умов та вимог.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно переліку основних пріоритетних напрямів наукових досліджень відповідно до постанови КМ України від 30.04.2024 р. № 476: «Інноваційні технології збереження та збалансованого використання природних (мінерально-сировинних, земельних, ґрунтових, водних та біотичних) ресурсів»; розпорядження КМ України від 14.08.2019 р. № 688-р «Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року»; у межах науково-дослідних робіт НУВГП за держбюджетною тематикою: «Розробка і створення багатоярусних агромеліоративних енергозберігаючих засобів розпушення ґрунтів» (№ 01054001484), «Забезпечення сталого розвитку меліорованих агроландшафтів Полісся в умовах змін клімату на основі

адаптивних заходів» (№ 0121U109614), «Забезпечення продовольчої безпеки країни у воєнний та повоєнний періоди шляхом інтенсифікації агровиробництва на меліорованих землях Полісся» (№ 0123U101922), «Розроблення ресурсозберігаючих технологій для підвищення рівня агровиробництва на меліорованих землях Українського Полісся» (№ 0123U104213) (довідка Національного університету водного господарства та природокористування, № 17н-24 від 17.11.2024).

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є удосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів за енергоефективними та вологорегулюючими принципами для підвищення їх вологозабезпеченості та поліпшення еколого-меліоративного стану щодо сучасних змінюваних умов та вимог.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні **завдання**:

- обґрунтувати необхідність та шляхи удосконалення глибокого меліоративного розпушення осушувальних мінеральних ґрунтів відносно змінюваних сучасних умов і вимог;
- розвинути науково-системні підходи щодо удосконалення технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення в структурі меліоративної системи і встановити визначальні чинники принципів енергоефективності та вологорегулювання;
- дослідити параметри макроструктури розпушеного мінерального ґрунту як основного чинника для прогнозного оцінювання його результуючих характеристик;
- розробити вологорегулюючі принципи удосконалення технологій глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів;
- розробити енергоефективні принципи удосконалення технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів;
- удосконалити науково-методичні підходи до обґрунтування технологічних параметрів глибокого меліоративного розпушення за розробленими принципами;
- удосконалити науково-методичні підходи до обґрунтування конструктивних параметрів технічних засобів глибокого меліоративного розпушення за розробленими принципами;
- оцінити загальну ефективність удосконалених технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів.

Об’єкт дослідження: складні взаємопов’язані явища та процеси впливу технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення на макроагрегатний стан осушуваних мінеральних ґрунтів, їх водно-фізичні властивості та ефективність вологорегулювання.

Предмет дослідження: науково-методичні підходи до удосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів за енергоефективними та вологорегулюючими принципами на основі застосування системної методології, методи обґрунтування їх параметрів.

Методи досліджень. Використання підходів системної методології щодо

обґрунтування принципів енергоефективності та вологорегулювання як характеристик різнорідних за природою структурних елементів у складній природно-технічній еколого-економічній меліоративній системі з математичним моделюванням їх енергетичного взаємозв'язку. Аналітичне та експериментальне фізичне моделювання макроструктури ґрунтового середовища. Експериментальне дослідження енергоємності розпушення ґрунту. Використання систем автоматизованого проектування для інжинірингу та моделювання конструкції робочого обладнання технічних засобів, спеціалізованих комп'ютерних програмних засобів для опрацювання результатів аналітичних і експериментальних досліджень із застосуванням загальноприйнятих методів математичної статистики, теорії імовірності й кореляційного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів дослідження полягає у розробці науково-практичних засад удосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів, зокрема, *вперше:*

- розроблено науково-методичні підходи до удосконалення технологій глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів за вологорегулюючими принципами на основі вертикально-горизонтальної переорієнтації низхідних водних потоків шляхом збільшення акумуляційної здатності активного кореневмісного шару ґрунту, що дасть змогу підвищити ефективність його вологорегулювання в різні за умовами тепло- і вологозабезпеченості періоди вегетації відповідно до змінюваних сучасних умов та вимог;
- розроблено науково-методичні підходи до удосконалення пасивних технічних засобів глибокого меліоративного розпушення за енергоефективними принципами на основі вертикально-горизонтальної диференціації потоків техногенної енергії для здійснення докритичноглибинної неблокованої розробки окремих шарів ґрунту поступовим двостороннім розущільненням макроструктури ґрунту згином та розтягом робочими органами;
- науково обґрунтовано комплекс різнорідних технічних, технологічних, економічних, екологічних, інвестиційних параметрів ефективності технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів у їх системному взаємозв'язку відповідно змінюваних сучасних умов та вимог;

удосконалено:

- науково-методичні підходи до обґрунтування технологічних параметрів глибокого меліоративного розпушення щодо переходу, на відміну від традиційного щілинного, до суцільного за площею але диференційованого за профілем та глибиною пошарового макроагрегатного розущільнення шарів ґрунту для урахування водно-фізичних властивостей їх (дрібно-, середньо- або крупно-) грудочкуватої структури;
- науково-методичні підходи до обґрунтування конструктивних параметрів пасивних технічних засобів глибокого меліоративного розпушення щодо застосування, на відміну від найбільш поширених традиційних стоякових і

периметрових технічних засобів, ярусно-клинової просторової конфігурації робочого обладнання та долото-радіальної клиноподібної форми робочих органів для урахування форми профілю розпушення, швидкості руху, водно-фізичних властивостей і відносної глибини розущільнення ґрунту окремо в кожному шарі;

набули подальшого розвитку:

- теоретичні засади обґрунтування адаптивного агромеліоративного заходу щодо осушуваних мінеральних ґрунтів на основі вдосконалення технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення за вологорегулюючими і енергоефективними принципами для поліпшення їх еколого-меліоративного стану відповідно до змінюваних сучасних умов і вимог;
- теоретичні засади вдосконалення глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів на основі розгляду за системною методологією енергетичного взаємозв'язку природних і техногенних чинників вологорегулювання та енергоефективності як різнорідних елементів складної меліоративної природно-технічної еколого-економічної системи;
- теорія подрібнення ґрунту щодо модельного відтворення макроструктури осушеного мінерального ґрунту після розпушення у вигляді сукупності різнорозмірних куль зі змінною геометрією їх просторового розміщення для визначення його волорегулюючих і енергетичних характеристик.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Обґрунтовано доцільність переходу від традиційних технологій щілинного та смугового розпушення до суцільного, диференційованого за профілем і глибиною, пошарового енергоефективного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів, що дає змогу на основі вертикально-горизонтальної переорієнтації низхідних водних потоків шляхом збільшення акумуляційної здатності активного кореневмісного шару ґрунту внаслідок зміни його макроагрегатного стану і водно-фізичних властивостей вплинути на формування водно-повітряного режиму та досягти підвищення ефективності вологорегулювання в різні за умовами тепло- і вологозабезпеченості періоди вегетації зменшенням кількості відведення надлишкової вологи та навантаження на дренаж у вологі періоди, а також підвищенням його вологозабезпеченості у посушливі, що забезпечує зростання врожайності вирощуваних агрокультур та сприятливий еколого-меліоративний стан осушуваного масиву. За результатами апробації у виробничих умовах Рівненської області зростання врожайності становило близько 20–22% (Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи ТОВ «СВК Горинь» від 04.10.2024 № 1/14-10).

2. Обґрунтовано сукупність технологічних рішень щодо ефективного застосування глибокого меліоративного розпушення для підвищення вологозабезпеченості та поліпшення еколого-меліоративного стану осушуваних мінеральних ґрунтів у різних умовах, захищені патентами України на корисні моделі: №150485, №154112.

3. Розроблені нові ярусні конструкції енергоефективних технічних засобів глибокого меліоративного розпушення з розширеними можливостями щодо

створення сприятливих умов для вологоакумулювання у функціональних шарах ґрунту та зменшення до 40% питомих енергетичних затрат, які захищені патентами України на винаходи та корисні моделі: № 150082, № 157731.

4. Розроблено спосіб регулювання водного режиму осушуваних мінеральних ґрунтів, що полягає в акумуляції частини води на спаді весняної повені шляхом поєднання здійснення попереджувального шлюзування на осушувальних каналах провідної мережі та глибокого суцільного розпушення на землях меліоративної системи. Даний спосіб забезпечує акумуляцію більшої частини атмосферних опадів та збільшує вологозапаси ґрунту за рахунок вологоутримування в його верхніх та нижніх шарах у межах осушувальної системи впродовж вегетаційного періоду в інтервалі 0,8–1,2 м, що підвищить ефективність роботи регулювання водного режиму мінеральних ґрунтів у різні за вологозабезпеченістю періоди вегетації на 30–90% (Довідка Регіонального офісу водних ресурсів у Рівненській області, № 50/1 від 24.01.2025).

5. Основні результати наукової роботи для апробації в умовах виробництва були використані і відображені у «Науково-методичних рекомендаціях щодо створення та функціонування дренажних систем у змінних сучасних умовах». Рівне: НУВГП, 2021. 114 с., що розглянуті й затверджені науково-технічною радою Національного університету водного господарства та природокористування (протокол № 142 від 23.04.2021), а також технічною Радою ДП Український державний науково-дослідний інститут проектування міст «ДІПРОМІСТО» імені Ю. М. Білоконя (протокол № 1 від 05.06.2021) (Довідка Державного агентства водних ресурсів України, № 1065/9/13/11-25 від 24.02.2025).

6. Науково-методичні розробки та результати досліджень впроваджені у навчальному процесі Національного університету водного господарства та природокористування для забезпечення теоретичних знань та набуття практичних навичок з проектування технологій водорегулювання та глибокого меліоративного розпушення, створення та конструювання багатоярусних технічних засобів за відповідними спеціальностями при викладанні наступних освітніх компонент: 133 «Галузеве машинобудування» (галузь знань 13 «Механічна інженерія»): «Наукові основи створення землерийно-ярусних машин», «Теорія руйнування робочих середовищ», «Меліоративні машини та обладнання для водного господарства»; 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» (галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»): «Водна інженерія та водні технології»; 208 «Агроінженерія» (галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство): «Меліоративні машини та обладнання для водного господарства» (Довідка Національного університету водного господарства та природокористування № 011-07 від 15.11.2024 р.).

Особистий внесок здобувача. Унаслідок узагальнення статистичних даних, теоретичних та експериментальних досліджень інших науковців здобувачем особисто: розроблено та сформульовано основні положення дисертаційної роботи щодо наукових підходів і методів удосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення за енергоефективними та вологорегулюючими принципами; складено та описано

математичну модель енергетичного взаємозв'язку різнорідних елементів у підсистемі «осушуваний ґрунт – технологія розпушування – робочий орган – вологорегулювання» в складі меліоративної системи; запропонована зміна напрямів водних і енергетичних потоків у схемі вологорегулювання в ґрунті; запропоновано і опрацьовано модельне відтворення макроструктури розпушеного ґрунту; обґрунтовано перехід з рівномірного на поступове подрібнення макроструктури ґрунту при його розпушенні згином; розраховано значення коефіцієнта пропорційності щодо енергоємності процесу за теорією подрібнення Бонда для різних ґрунтів; удосконалено науково-методичні підходи до обґрунтування енергоефективних параметрів вологорегулюючих технологій та конструкцій технічних засобів пасивного типу для їх здійснення.

Дисертація є самостійною науковою працею. Усі наукові результати, викладені у роботі, отримані автором особисто та є його науковим доробком. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті ідеї та положення, які становлять індивідуальний внесок автора.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення та результати досліджень представлялися та обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських конференціях: XVIII науковій конференції ТНТУ ім. І. Пулюя (Тернопіль, 2014 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Природа для води» (м. Київ, 2018 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Вода для всіх» (м. Київ, 2019 р.), The III-th International Scientific Forum of Scientists «East–West» (Vienna, Austria, 2019 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Водні екосистеми у контексті Євроінтеграції: реалії та перспективи» (м. Житомир, 2019 р.), The 13-th International youth conference «Perspectives of science and education», New York, USA, 2019 р.), Круглому столі «Наукове забезпечення та практичний досвід ґрунтозберігаючого землеробства» (м. Херсон, 2020 р.), VI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь (м. Житомир, 2020 р.), The I-th International scientific and practical conference «Topical aspects of modern science and practice». (Frankfurt am Main, Germany, 2020 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні пріоритети розвитку науки, освіти та суспільства» (м. Полтава, 2022 р.), IV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Євроінтеграція екологічної політики України» (м. Одеса, 2022 р.), XI Міжнародній науково-практичній онлайн-конференції «Прискорення змін для подолання водної кризи в Україні» (м. Київ, 2023 р.), III та IV Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Інновації: теорія і практика» (м. Кропивницький, 2022 р., 2023 р.), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (2023 р.), IV та VI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії» (м. Херсон, 2022 р., 2024 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Управління та моніторинг ґрунтів: сучасні вимірювання та поствоєнне відновлення» (м. Одеса, 2024 р.).

Публікації. Основні результати та висновки дисертації знайшли відображення у 54 наукових працях, загальний обсяг яких становить 132,4 а.а., з

них особисто автору належить 18,8 а.а. Зокрема: 5 монографій (2 у співавторстві, 3 колективні), 9 наукових публікацій у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus (з них: 4 – статті у періодичних наукових журналах, 3 – в матеріалах міжнародних конференцій, 2 – розділи книжкових видань), 18 публікацій у фахових виданнях України, 18 публікацій апробаційного характеру, 4 патенти України на винаходи та корисні моделі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 7 розділів, висновків, рекомендацій виробництву, списку використаних джерел з 277 найменувань і 6 додатків. Повний обсяг роботи складає 333 сторінки, в тому числі 251 сторінка основного тексту, що вміщує 55 рисунків і 38 таблиць, список використаних джерел на 38 сторінках та 44 сторінки додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику дисертаційної роботи: обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і завдання дослідження, показано зв'язок роботи з державними науковими програмами і темами, визначено наукову новизну та практичне значення результатів досліджень.

У першому розділі «*Сучасний стан осушуваних мінеральних ґрунтів, необхідність та шляхи удосконалення глибокого меліоративного розпушення щодо сучасних змінюваних умов та вимог*» здійснено оцінювання сучасного стану осушувальних мінеральних ґрунтів, проаналізовано можливості застосування глибокого меліоративного розпушення як адаптивного агромеліоративного заходу щодо змінюваних умов та вимог, обґрунтовано необхідність удосконалення меліоративного глибокого розпушення.

В Україні більшість меліоративних систем розташовані на Поліссі де переважають осушувані дерново-підзолисті, поверхнево оглеєні ґрунти, які часто мають несприятливі водно-фізичні властивості та незадовільний загальний еколого-меліоративний стан. Загальна площа осушуваних земель України, що використовуються в аграрному виробництві, складає 2,774 млн га.

На підставі узагальнення відповідних довідкових і нормативних джерел загалом визначено, що існуючі меліоративні системи України практично виробили свій ресурс, внаслідок чого знизилась їх продуктивність та економічна ефективність, і постає питання щодо зміни підходів до здійснення регулювання водного режиму на таких землях та їх функціонування загалом.

Для ефективного протистояння сучасним викликам дослідження для зони осушувальних меліорацій, перш за все, повинні бути спрямовані на розробку адаптивних енерго-, водо- та ресурсозберігаючих заходів, в тому числі, агромеліоративних, спрямованих на ефективне регулювання водного режиму, зарегулювання і акумуляцію вологи в ґрунтовому профілі й в межах системи.

Різними аспектами осушення перезволожених ґрунтів займались багато різних вчених, зокрема Ф.Р. Зайдельман, П.І. Закржевський, А.М. Янголь, С.Т. Вознюк, В.Є. Алексеєвський, О.Я.Олійник, В.Л. Поляков, А.В. Яцик, Л.Ф. Кожушко, О.В. Скрипник, М.О. Клименко, М.О. Лазарчук, Сташук В.А., Кузьмич Л.В., Engelsmann K., Ernst, Hooghoudt, Kirkham, Kunze G., Ramanauskas, Schilfgoarde, Ylover R. та ін. Ними встановлені базові основи позитивних та негативних наслідків осушення мінеральних ґрунтів по відношенню до

вирощуваних культур.

Для зменшення та усунення негативних наслідків осушення багато дослідників ще раніше наголошували на необхідності застосування заходів, спрямованих на покращення макроструктури та водно-фізичних властивостей ґрунтів, збільшення акумуляційної здатності активного шару ґрунту тощо (С.Т. Вознюк, М.О. Клименко, В.Р. Гімбаржевський та ін.), і застосування, зокрема, глибокого розпушення як ефективного агромеліоративного заходу (С.М. Перехрест, І.Ф. Підпалий, В.С. Олійник, Д.А. Тютюнник, В.П. Кубишкін та ін.). При цьому відмічалося наявність негативних агроекологічного та техногенного впливу на ґрунт технічних засобів для його здійснення.

Глибоке розпушення на свій час було одним з традиційних і найбільш перспективних агромеліоративних заходів, який відігравав важливу роль при регулюванні водно-повітряного режиму осушуваних мінеральних ґрунтів, оскільки їх водно-фізичні властивості і після дренування часто залишалися в цілому несприятливими. У періоди перезволоження традиційне глибоке розпушення сприяло прискореному звільненню орного шару від надлишку вологи, пришвидшувало її переміщення у нижче розташовані шари чим інтенсифікувало умови роботи закритого систематичного дренажу шляхом збільшення навантаження на нього.

Пряме ефективне застосування традиційного глибокого розпушення (рис. 1) як адаптивного заходу в сучасних змінюваних умовах стримується невідповідністю їм існуючих технологій і засобів, які вже не забезпечують необхідну ефективність розпушення та відповідні змінюваним умовам водно-фізичні властивості осушуваних мінеральних ґрунтів, а тому потребують внесення технологічних змін та конструктивного удосконалення відповідно до сучасних умов вимог: 1) поліпшення водно-фізичних властивостей і макроструктури ґрунту з дотриманням агротехнічних рекомендацій; 2) забезпечення високої акумулюючої здатності ґрунту, підвищення ефективності його водорегулювання; 3) забезпечення тривалої післядії; 4) забезпечення високої економічної та енергетичної ефективності; 5) відповідність сучасним принципам адаптивного природокористування.

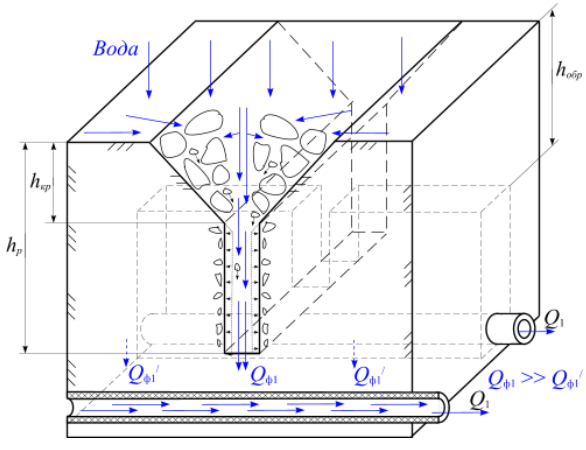


Рис. 1. Принципова схема щілинного (традиційного) глибокого меліоративного розпушення

Характерні ознаки:

- грубе неконтрольоване розпушення верхніх шарів;
- високоенергоємна розробка на закритичних глибинах;
- часткове перемішування гумусних шарів з нижніми;
- локальне ущільнення нижніх шарів;
- опосередкований вплив на ґрунтовий масив;
- нерівномірне посилення вертикальної фільтрації;
- збільшення промивного режиму;
- збільшення навантаження на дренаж;
- нерівномірність навантаження по довжині дрени.

Значний внесок у розробку питань щодо вдосконалення ґрунтообробних робочих органів, процесів їх взаємодії з ґрунтом, кінематики руху та визначення енергетичних витрат внесли вчені А.С. Кушнарьов, Д.Д. Прокопенко, В.І. Корабельський, В.О. Дубровін, М.С. Левчук, І.А. Шевченко, В.М. Булгаков, А.С. Павлоцький, В.М. Сало, В.І. Ветохін, Дідух В.Ф. та ін. В їх роботах значну увагу приділено енергетиці робочого процесу з прив'язкою до зміни фізичного стану ґрунтового середовища і відмічалося значне збільшення енергоємності процесу при збільшенні глибини обробітку.

Питання зниження питомої енергоємності глибокої розробки ґрунту в різних умовах розглядалися в роботах В.І. Баловнєва, Ю.О. Вєтрова, Р. Годвіна, Е. Дінглінгера, В.К. Руднєва, Р.Л. Турецького, В.І. Уродова, Л.А. Хмари, С.В. Шатова, С.В. Кравця, В.В. Кованька та ін. З них випливає, що при глибокій розробці ґрунту в більшості випадків є доцільність переходу від суцільної вертикальної розробки ґрунтового масиву на його пошарову розробку на докритичних глибинах.

Деякі функціональні переваги застосування глибокого пошарового розпушення на перезволожених мінеральних ґрунтах за смуговою технологією були відмічені і в подальшому використані проф. Кожушком Л.Ф. на підставі розробок проф. Кравця С.В. щодо безтраншейного багатоярусного укладача-розпушувача.

Для ефективного удосконалення технологій і засобів глибокого розпушення ґрунтів щодо впливу їх на водно-фізичні властивості та акумулюючу здатність осушуваних ґрунтів важливим є системність підходу до розгляду принципів удосконалення у складі меліоративної системи.

У другому розділі *«Наукові системні підходи до удосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення»* проаналізовано структурно-ієрархічний взаємозв'язок різнорідних складових осушувальної природно-технічної еколого-економічної меліоративної системи із застосуванням глибокого меліоративного розпушення на основі її технічних складових, обґрунтовано енергетичний взаємозв'язок принципів енергоефективності та вологорегулювання у складі природно-технічної еколого-економічної меліоративної системи, визначено зміну в підходах до раціонального використання водних і земельних ресурсів осушуваних меліоративних систем.

Визначення поняття меліоративної системи, у свій час було представлено різними дослідниками як: *метеорологo-економічна система* (Жуковський Є.Є., 1981); *складна природно-технічна система* (Рекс Л.М., 1995; Рокочинський А.М., 2002, 2010 та ін.); *організована еколого-економічна система* (Фроленкова Н.А., 2006 та ін.); *соціо-природно-технічна система* (Ковальчук В.П., 2016); *складна природно-технічна еколого-економічна система* (Рокочинський А.М., 2016; Турченюк В.О., 2018; Волк П.П., 2021). За науково-методичними принципами та підходами системної оптимізації до створення та функціонування таких систем ними було успішно виконано обґрунтування оптимальних параметрів режимних, технологічних та конструктивних рішень щодо водокористування на зрошувальних та дренажних системах на основі розгляду взаємозв'язку їх різнорідних параметрів за схемою виду: *ефект* ↔ *режим* ↔ *технологія* ↔

конструкція, що адекватно було відображено при побудові структурної, ієрархічної, аналітичної та інших моделей таких систем.

При вирішенні проблеми системних та фізико-механічних основ проектування розпушувачів ґрунту, використавши положення загальної теорії систем, В.І. Ветохін описав узагальнюючу картину процесів на основі розгляду взаємозв'язку їх різнорідних елементів виду: *«джерело енергії ↔ розпушувач ↔ ґрунт»* з виходом на врожайність вирощуваних культур і оцінку загальної енергоефективності системи в цілому за розглядом відповідної сукупності різнорідних елементів: джерело енергії – силовий агрегат (потужність тягача), розпушувач – параметри знаряддя, ґрунт – фізико-механічні властивості і структурний стан ґрунту.

Розглянута ним система щодо звичайних багарних полів може бути реалізована як технічна складова і в межах меліорованого поля при додатковому врахуванні технологічних водорегулюючих складових. Оскільки меліороване поле є складовою частиною загальної меліоративної системи для якої вже визначені системні принципи удосконалення на засадах загальної енергоефективності (Рокочинський А.М. та ін. 2017–2021), то об'єднання обидвох підходів дозволить сформувати принципи удосконалення технологій і технічних засобів глибокого розпушення меліорованого поля.

На підставі та в розвиток існуючих положень, в сукупності з вже згаданими системними підходами до меліоративних систем різного типу, системна методологія стосовно осушувальної меліоративної системи із застосуванням технологій і технічних засобів глибокого розпушення розглядається у структурно-ієрархічному взаємозв'язку технічних засобів і технологій глибокого розпушення з природно-меліоративним режимом та еколого-економічним ефектом, у вигляді структурно-ієрархічної схеми:

конструкція ↔ технологія ↔ режим ↔ ефект,

де сукупність різнорідних елементів є наступною: стосовно блоку конструкції – параметри технічних засобів глибокого розпушення, для технології – способи зміни стану ґрунту та його водно-фізичні властивості, для режиму – природно-меліоративний режим, для ефекту – інтегральний економічний (врожай вирощуваних культур) та екологічний (еколого-меліоративний стан тощо) ефект на меліорованому полі (рис. 2).

Через зміну макроструктури осушуваних мінеральних ґрунтів глибоке розпушення, насамперед, безпосередньо впливає на макроагрегатний стан ґрунтів, їх щільність і шпаруватість, а за тим, на їх водно-фізичні властивості, що, в свою чергу, відображається на еколого-меліоративному стані осушуваних мінеральних ґрунтів та умовах розвитку вирощуваних культур і їх урожайності. Параметри енергоємності та параметри водно-фізичних властивостей ґрунту пов'язані через параметри структури ґрунту. Ступінь подрібнення масиву визначає його вологорегулюючі можливості. Чим більш дрібніша структура ґрунту тим більше зростає його вплив на ґрунтову фільтрацію та зростають вологоакумулюючі властивості але одночасно і значно зростають енергозатрати на їх досягнення.

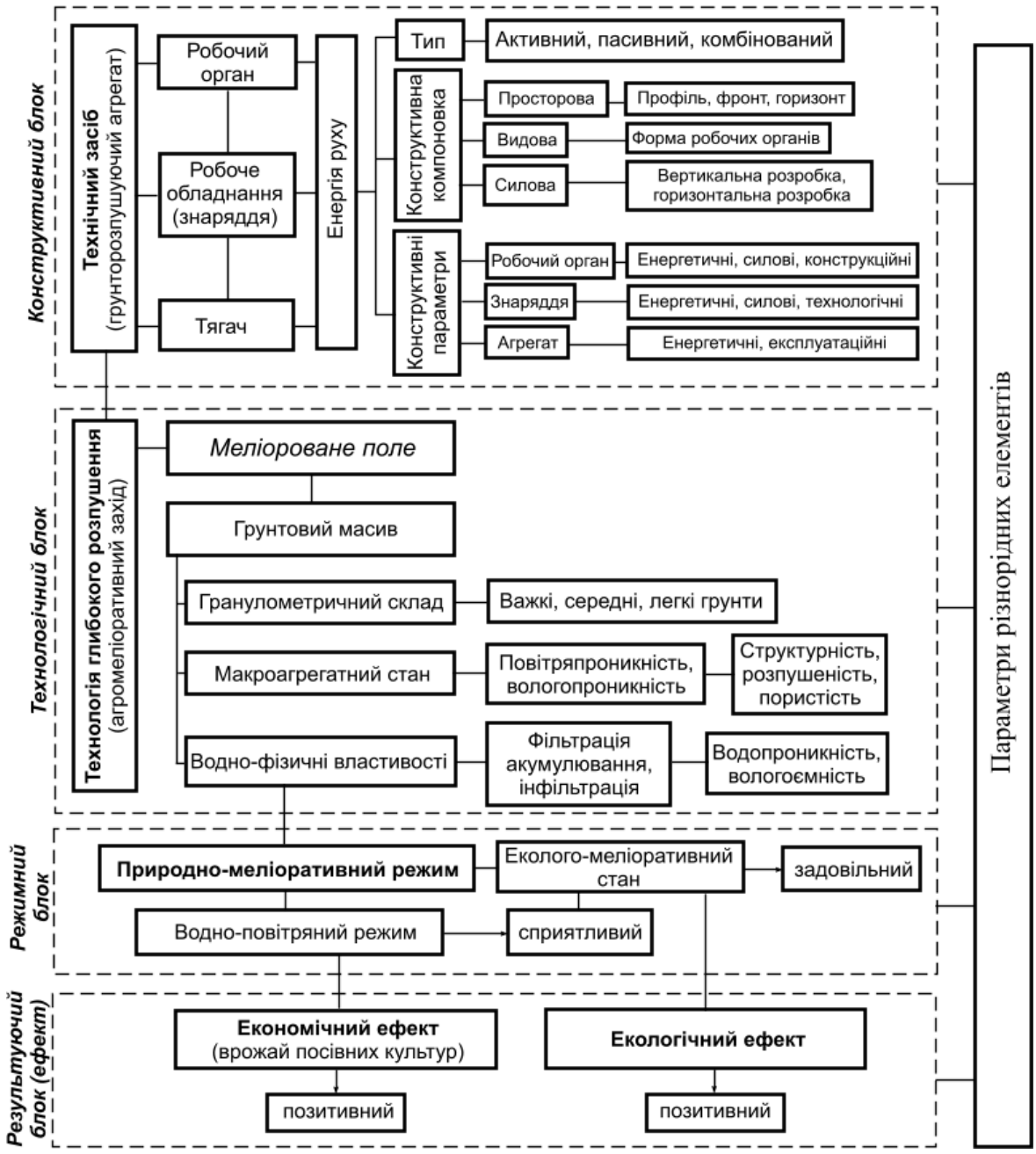


Рис. 2. Структурно-ієрархічна схема взаємозв’язків між параметрами різнорідних елементів щодо принципів удосконалення технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушувальних мінеральних ґрунтів

Так, як параметри технічних засобів структурно пов’язані з технологічними параметрами, ресурсами меліорованого поля і далі з режимними параметрами і параметрами ефекту, то на основі застосування системної методології шляхом розгляду взаємозв’язків між параметрами різнорідних складових меліоративних систем як природно-технічних еколого-економічних систем, визначено, що проблема підвищення вологозабезпеченості та поліпшення еколого-меліоративного стану осушуваних мінеральних ґрунтів щодо змінюваних сучасних умов та вимог, може бути вирішена шляхом удосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення за *енергоефективними* та *вологорегулюючими* принципами, рис. 3.

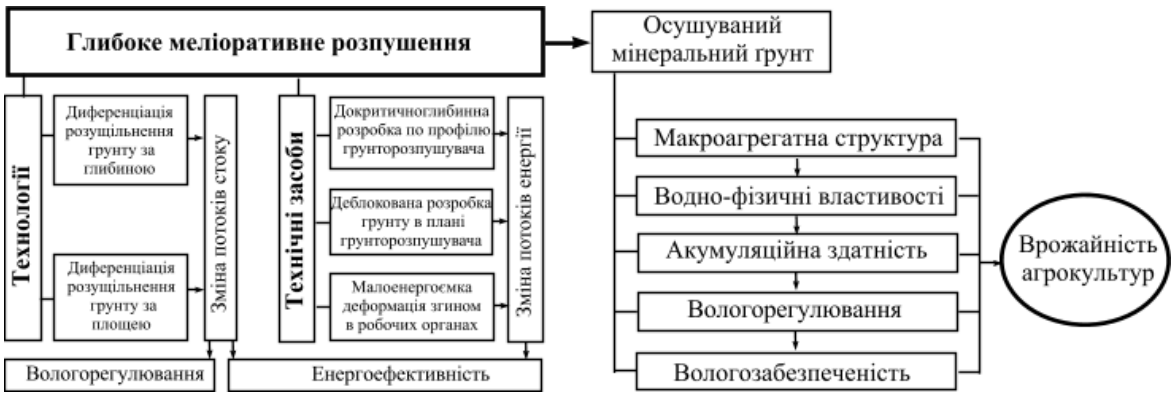


Рис. 3. Причинно-наслідкові зв'язки глибокого меліоративного розпушення, удосконаленого за принципами енергоефективності та вологорегулювання як складової меліоративної системи

Енергетичні затрати на взаємодію робочих органів з ґрунтовим масивом визначаються типом взаємодії та параметрами конструктивної компоновки.

В разі розгляду причинно-наслідкових зв'язків різнорідних параметрів глибокого розпушення у складі меліоративної системи за структурно-ієрархічною схемою виду: *конструкція ↔ технологія ↔ режим ↔ ефект*, *сукупність різних видів техногенної і природної енергій через системні енергетичні перетворення визначає кінцевий енергетичний ефект у вигляді приросту врожайності аграрних культур*.

Керуючись положеннями загальної теорії систем про взаємозв'язок її складових, враховуючи вид та структуру нашої системи, покажемо ланцюг перетворення (переходу) енергії і речовини від робочого органу глибокорозпушувача до приросту врожаю. Для цього запишемо параметри ланцюга перетворення енергії (роботи $A\ [м^2 \cdot кг/с^2]$), використовуючи класичну систему *LMT* розмірностей фізичних величин (табл. 1).

Таблиця 1

Формалізація перетворення енергії в меліоративній системі при застосуванні глибокого розпушення

Конструкція	*Технологія*	*Режим*	*Ефект*
техногенна енергія	→ природні енергії ґрунту та води	→ регулювання потоків енергії	→ енергія агрокультур
Робота ґрунторозпушувального агрегату	Робота по формозміні шару і структури ґрунту для акумуляції вологи опадів, поливу	Робота техногенних і природних факторів	Приріст врожайності
$A_{агр}[L^2M^1T^{-2}]$	$A_p[L^2M^1T^{-2}] + E_в[L^2M^1T^{-2}]$	$A_m[L^2M^1T^{-2}] + A_n[L^2M^1T^{-2}]$	$\Delta W[L^2M^1T^{-2}]$

Сукупна залежність перетворення техногенної та природної енергії (роботи) при глибокому розпушенні в складі меліоративної системи має вигляд:

$$P_m[L^1M^1T^{-2}] \cdot v[L^1T^{-1}] \cdot t[T^1] \rightarrow \sigma_p[L^{-1}M^1T^{-2}] \cdot \Delta V_{гр}[L^3] + E_в[L^2M^1T^{-2}] \rightarrow$$
$$\rightarrow A_m[L^2M^1T^{-2}] + A_n[L^2M^1T^{-2}] \rightarrow \Delta W[L^2M^1T^{-2}], \quad (1)$$

де $E_в[L^2M^1T^{-2}]$ – хімічна енергія води акумульованої в розпушеному ґрунті; $A_m[L^2M^1T^{-2}]$ – робота техногенних режимних факторів; $A_n[L^2M^1T^{-2}]$ – робота природних режимних факторів; $\Delta W[L^2M^1T^{-2}]$ – приріст енергії врожаю вирощуваних культур.

Виходячи з цієї залежності, шляхи підвищення загальної енергоефективності та зниження витрат ресурсів складаються з наступних

компонентів: зменшення кожної складових, що відносяться до конструкції та форми робочих органів та ґрунторозпушувального агрегату в цілому (геометрія форм, силові компоненти, кінематика), використання міцнісних властивостей ґрунту (види деформаційного впливу), підвищення ККД робочого процесу, заміщення частки техногенної енергії природною енергією (акумулювання природних опадів).

ККД робочого та технологічного процесів залежить від адаптованості форм робочих органів та ґрунторозпушувального агрегату в цілому до властивостей робочого середовища їх взаємодії (ґрунту).

В загальній теорії систем критерій адаптації процесу визначається зміною енергії процесу в одиницю часу. Зміна енергії *dA/dt* процесу в підсистемі *ґрунтове середовище – робочий орган (агрегат)* визначається наступним чином

$$\frac{dA}{dt} = \eta\left(\frac{dE}{dt}\right) + E\left(\frac{d\eta}{dt}\right), \qquad (2)$$

де $\eta = A/E$ – ККД використання енергії, що потрапляє в підсистему; A – енергія, що здійснює корисну роботу в підсистемі; E – енергія, яка потрапляє в підсистему; dE/dt – зміна надходження енергії в підсистему; $d\eta/dt$ – зміна ККД використання енергії, що потрапляє в підсистему.

Адаптація підсистем робочого та технологічного процесів має відбуватися в напрямку підвищення їх ККД завдяки врахуванню особливостей фізико-механічних та водно-фізичних властивостей ґрунту, а саме: енергоємності зміни стану ґрунту у різних фізичних, меліоративних та екологічних станах.

Зміна ККД відбувається за рахунок зміни способів і послідовності впливу на шари ґрунту та зміни механізму перерозподілу напружень їх деформації від пластичного до крихкого руйнування. При підвищенні ККД непродуктивні втрати енергії в підсистемі *ґрунтове середовище – робочий орган (агрегат)* зменшуються, а енергія, що надходить, витрачається на подальшу зміну параметрів основної системи – подрібнення і переформатування макроструктури ґрунту при здійсненні глибокого розпушення в складі меліоративної системи.

Функцію регулятора ККД в підсистемі *ґрунтове середовище – робочий орган (агрегат)* насамперед виконують форма і параметри робочого органа та ґрунторозпушувального агрегату в цілому як сукупності робочих органів, що визначає необхідність і доцільність подальшого підвищення їх енергоефективності при реалізації вологорегулювання в розпушеному ґрунті.

Практична реалізація змінених підходів із дотриманням вологорегулюючих та енергоефективних принципів полягає у наступному:

- безпосередньому включенні всього ґрунтового масиву в схему інтенсифікації вертикального переведення поверхневого стоку в дренажний з першочерговою акумуляцією його в ґрунті та відведенням через дренаж лише його залишків (рис. 4, *а*);

- зміні напряму потоків енергії від робочих органів з вертикально-висхідних до всього масиву відразу на горизонтально-диференційовані по шарам ґрунту (рис. 4, *б*).

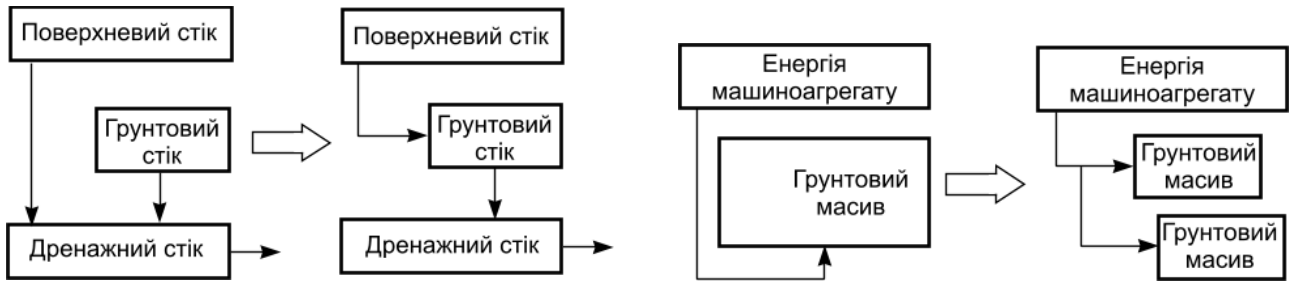


Рис. 4. Зміна підходів із дотриманням вологорегулюючих та енергоефективних принципів: *а* – вологорегулювання; *б* – енергоефективності

Реалізація таких змінених підходів дасть змогу виконувати глибоке розпушення з наступними характерними ознаками (рис. 5).

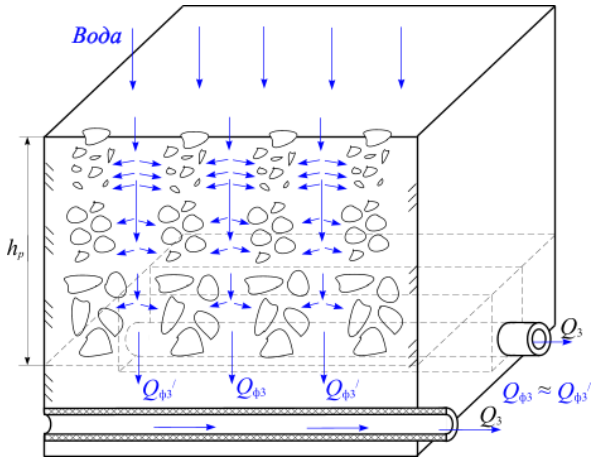


Рис. 5. Принципова схема удосконаленого глибокого меліоративного розпушення: Q_3 – об'єм дренажного стоку дрени; $Q_{ф3}$ – фактичний об'єм ґрунтового стоку; h_p – глибина розпушення

Характерні ознаки:
- диференційоване контрольоване розпушення активних шарів;
- малоенергоємна розробка на докритичних глибинах;
- часткове перемішування гумусних шарів з нижніми;
- відсутність ущільнення нижніх шарів;
- безпосередній глобальний вплив на грунтовий масив;
- рівномірне посилення горизонтальної фільтрації з акумулюванням;
- зменшення промивного режиму;
- зменшення навантаження на дренаж;
- вирівнювання навантаження по довжині дрени;
- $Q_{ф1} > Q_{ф2} > Q_{ф3}$; $Q_1 > Q_2 > Q_3$.

За аналогією та в розвиток сучасних наявних підходів до розробки меліоративних розпушувачів, удосконалення технологій і технічних засобів суцільного глибокого меліоративного розпушення мінеральних ґрунтів з регульованим водним режимом за енергоефективними й вологорегулючими принципами повинно здійснюватися також з урахуванням їх споживчих властивостей та різнонаправлених факторів впливу на них, рис. 6.

Споживчі властивості, параметри енергоємності та параметри водно-фізичних властивостей ґрунту пов'язані через параметри макроструктури ґрунту, яка є визначальною і потребувала більш детального розгляду.

Рис. 6. Фактори впливу на споживчі властивості технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення

У третьому розділі ***«Дослідження впливу макроструктури ґрунту на його водно-фізичні властивості та енергоємність процесу розпушення»*** здійснено аналітичне моделювання макроструктури розпушеного ґрунту для визначення агротехнічних показників, експериментальне дослідження енергетичної ефективності величини макроструктури розпушеного ґрунту щодо його вологоємкості, експериментальне енергоємності структурного подрібнення ґрунту при розпушенні.

За двома можливими варіантами розміщення макроагрегатів ґрунту після розпушення (рис. 7) отримано формули для теоретичного визначення коефіцієнта розпушення (2) та (3) з врахуванням їх фізико-механічних характеристик на різних стадіях подрібнення (4).

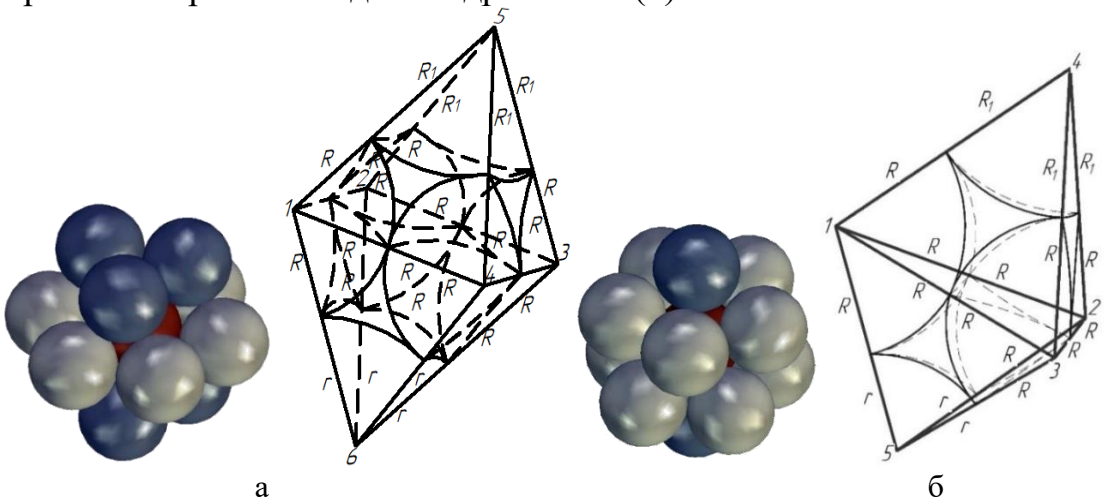


Рис. 7. Розміщення макроагрегатів ґрунту і їх центрів після розпушення:
а – розміщення кубооктаедром; б – розміщення ікосаедром

$$k_p = 1 + \frac{15}{8\sqrt{3}\pi}\left(\begin{array}{l}\sqrt{\left(\frac{1}{k_R}+1\right)^2 - \frac{4}{3}} - 0{,}52\,\mathrm{ctg}\left(\arcsin\frac{1}{1+\frac{1}{k_R}}\right) - \left(\frac{1}{k_R+1}\right)^3 \sqrt{\left(\frac{1}{k_R}+1\right)^2 - \frac{4}{3}}\left(1+0{,}55k_R\sqrt{k_R}\right) + \\ + \sqrt{(k_R+1)^2 - \frac{4}{3}} - 0{,}52\,\mathrm{ctg}\left(\arcsin\frac{1}{1+k_R}\right) - \left(\frac{1}{\frac{1}{k_R}+1}\right)^3 \sqrt{(k_R+1)^2 - \frac{4}{3}}\left(1+0{,}55\frac{1}{k_R\sqrt{k_R}}\right)\end{array}\right) \quad (2)$$

$$k_p = 1 + \frac{19}{20\pi}\left(\begin{array}{l}\sqrt{\left(\frac{1}{k_R}+1\right)^2 - \frac{5}{4}} - 0{,}52\,ctg\left(\arcsin\frac{1}{1+\frac{1}{k_R}}\right) - \left(\frac{1}{\frac{1}{k_R}+1}\right)^3 \sqrt{(k_R+1)^2 - \frac{5}{4}\left(1+\frac{0{,}55}{k_R\sqrt{k_R}}\right)} \\ + \sqrt{(k_R+1)^2 - \frac{5}{4}} - 0{,}52\,ctg\left(\arcsin\frac{1}{1+k_R}\right) - \left(\frac{1}{\frac{1}{k_R}+1}\right)^3 \sqrt{(k_R+1)^2 - \frac{5}{4}}\left(1+\frac{0{,}55}{k_R\sqrt{k_R}}\right)\end{array}\right) \quad (3)$$

$$k_R = \frac{R}{R_1} = \frac{r}{R} = \frac{l_к^{(n+1)}}{l_к^{(n)}} = \frac{E_c / E_p}{E_c / E_p + 1}, \quad (4)$$

де $l_к^{(n)}$ та $l_к^{(n+1)}$ – розміри утворених ґрунтоагрегатів на поточній та наступній стадії подрібнення; E_c, E_p – деформаційні модулі пружності ґрунтового середовища, відповідно, на стиск та розтяг.

Згідно існуючих довідкових даних залежність (2) є більш доцільною для супіщаних і суглинистих ґрунтів, а (3) для глинистих. Так як співвідношення E_c/E_p є залежним від типу ґрунту та вологості то (2) було представлено у вигляді $k_p=f(W)$ з нанесенням декількох експериментально отриманих на суглинистих ґрунтах точок, рис. 8.

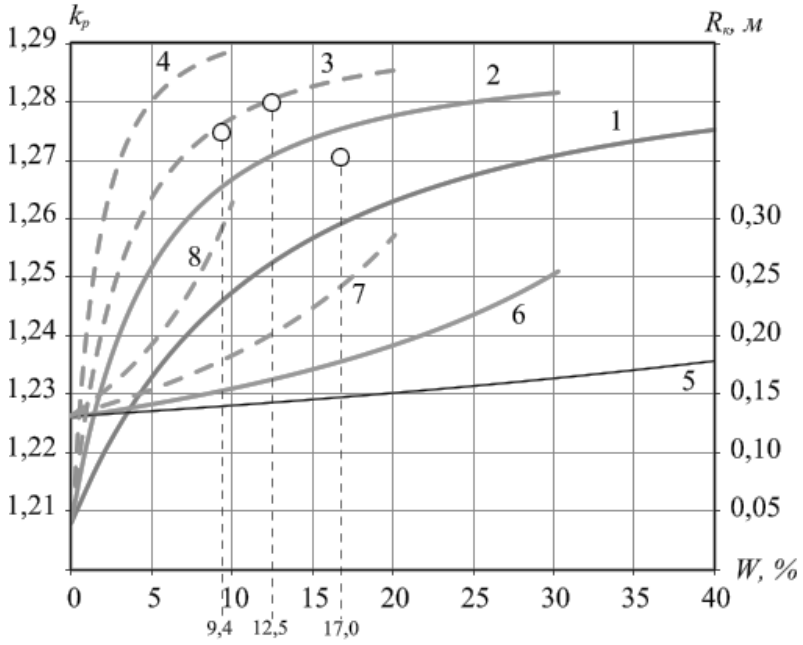


Рис. 8. Графічні залежності коефіцієнта розпушення та кінцевого радіуса деформації ґрунтової скиби від вологості: 1–4 – коефіцієнта розпушення; 5–8 – кінцевого радіуса деформації ґрунтової скиби, відповідно, для глини, суглинку, супіску, піску; о – експериментальні дані

Експериментальні дані отримано на лабораторному ґрунтовому каналі: ґрунт – суглинок, $C_{уд}$=4-7, кінцевий радіус деформації ґрунтової скиби $R_к$=0,15 м, вологість ґрунту 9,4–17,0%. Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними становить менше 1%, яку можна пояснити деякою невідповідністю радіуса криволінійного розпушувального елемента розрахунковим значенням та його незмінністю при зміні ґрунтових умов.

Експериментальним дослідженням фізичної моделі з окремими сферичними частинками розміром від 2 до 10 мм встановлено характер зміни залежностей водно-фізичних характеристик від крупності частинок насипної структури масиву та те, що найбільш доцільною для вологоакумулювання є орієнтація на утворення макроагрегатів ґрунту розміром 4–5 мм для верхніх (вологоакумулюючих) шарів і 6–25 мм для нижніх (фільтраційних), рис. 9.

Енергетичну ефективність отримання величини вологоємкості структури ґрунту E_w розраховано за відношенням її відносного приросту $\Delta W_{нв}/W_{нв}$ до відносного приросту площі поверхні контакту $\Delta S_к/S_к$, яка є пропорційною до необхідної енергії подрібнення за існуючими теоріями, рис. 9.

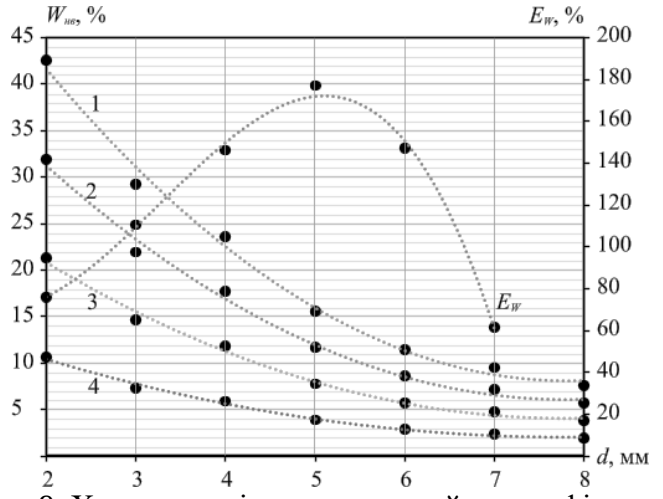


Рис. 9. Характер зміни залежностей водно-фізичних характеристик від крупності частинок насипної структури масиву; 1 – глини; 2 – суглинки ґрунти; 3 – супіски; 4 – піски; $W_{нв}$ – показник найменшої вологоємності; E_w – енергетична ефективність

$$E_W = \frac{\Delta W_{НВ} / W_{НВ}}{\Delta S_к / S_к}. \quad (5)$$

Експериментально встановлене значення коефіцієнта пропорційності $k_п$ для теорії подрібнення Бонда, яке дозволить визначати необхідну мінімальну енергонасиченість технічних засобів для розпушення визначеного масиву ґрунту.

За отриманими значеннями розраховано необхідну мінімальну потужність технічних засобів для здійснення глибокого розпушення та основного обробітку, яка є приблизно в 2 рази менша для супіщаних ґрунтів ніж для суглинистих. Так, при загальній ширині захвату робочих органів 2 м, для глибокого розпушення на 0,75 м та робочій швидкості 2 м/с або для розпушення на 0,25 м та швидкості 4 м/с, необхідно мати потужність технічних засобів 170–240 кВт для супіщаних ґрунтів і 390–440 кВт для суглинистих ґрунтів.

Вивчення питання макроструктури ґрунту дало можливість ефективно перейти від теоретичного розгляду вологорегулюючих та енергоефективних принципів до підходів щодо їх практичної реалізації.

У четвертому розділі *«Підходи до реалізації вологорегулюючих та енергоефективних принципів удосконалення глибокого меліоративного*

розпушення» визначено характерні ознаки основних тенденцій розвитку сучасних агротехнологій та конструкцій глибокорозпушувачів, наведена технічна реалізація вологорегулюючих та енергоощадних принципів в технологіях та технічних засобах глибокого розпушення.

За аналізом розвитку відомих на сьогодні агротехнологій (культурна оранка, безполицевий обробіток, нульовий обробіток ґрунту (No-Till), смугове розпушення прикореневого шару (Strip-Till), Verty-till та Mini-till) та конструкцій робочих органів обробітку ґрунту, зокрема, їхніх позитивних моментів визначено ключові елементи для реалізації необхідного удосконалення глибокого розпушення щодо сучасних умов ти вимог, рис. 10.

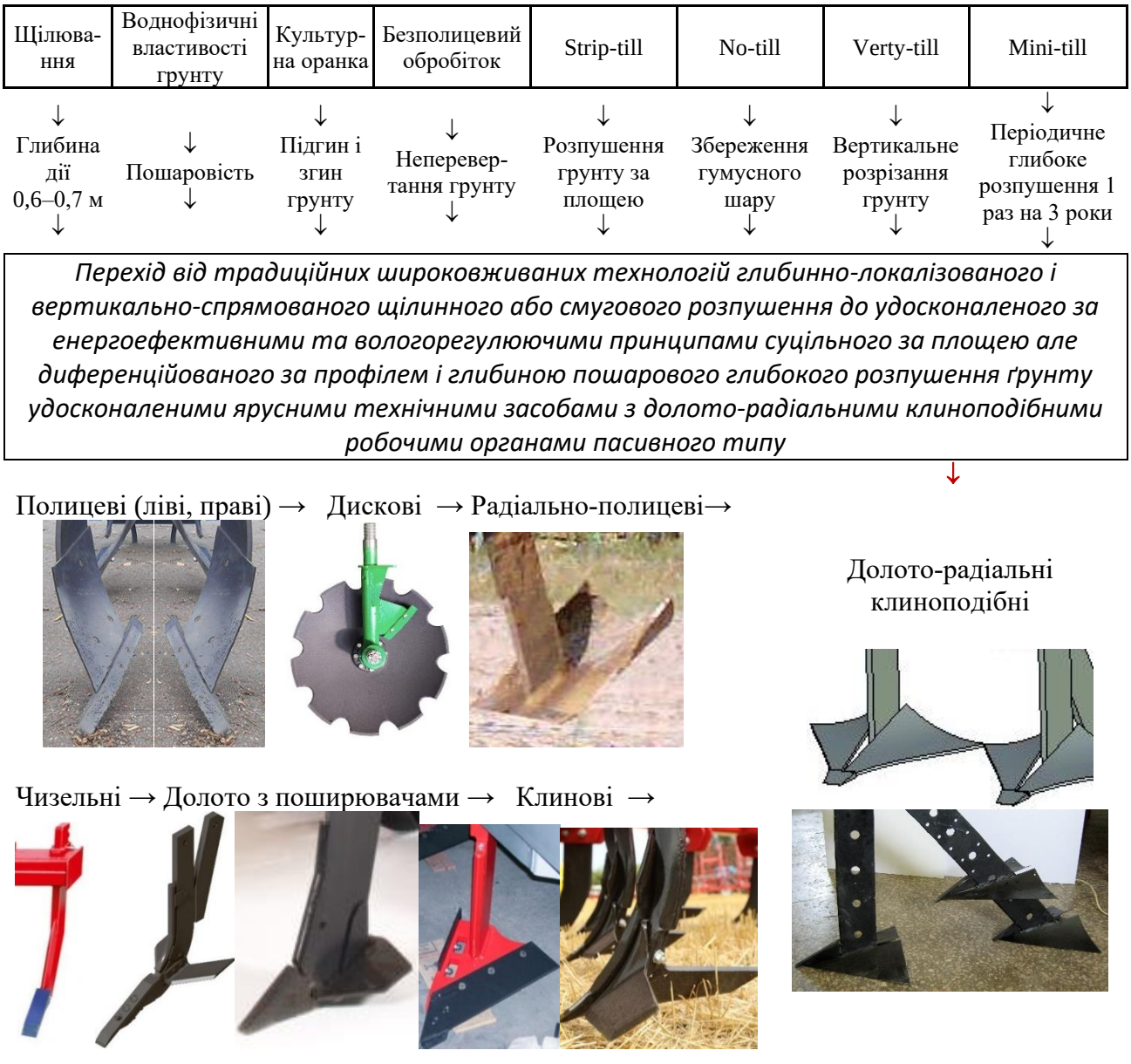


Рис. 10. Результати аналізу агротехнологій обробітку ґрунту та формозміни конструкції розпушувальних робочих органів

У загальному випадку, конструкція удосконаленого глибокорозпушувача представляє собою раму з несучими стояками, на яких, для роботи на докритичних глибинах, закріплені робочі органи у вигляді спряження долота-леміша з увігнутими стріловидними ґрунторозпушувальними елементами

змінної кривизни. Через форму і параметри цієї поверхні задається необхідна малоенергоємна деформація згину, величина напруження і ступінь подрібнення розроблюваного шару ґрунту. Загальна компоновка глибокорозпушувача визначається просторовим рознесенням робочих органів в трьох взаємно перпендикулярних напрямках (рис. 11).

Ґрунтову скибу, яка підлягає подрібненню, можна розглядати як однорідне за щільністю, ґрунтове середовище утворене сукупністю окремих структурних агрегатів зв'язаних між собою силами зчеплення. Згідно прийнятої схеми подрібнення проходить в декілька етапів (стадій). На кожному етапі, під дією нормальних зусиль реакції від поверхні робочого органу, проходить руйнування відносно довгих (довжина більша висоти) або відносно коротких (довжина менша висоти) елементів ґрунтової скиби. Їх виникнення і руйнування відбувається почергово. Відносно довгі елементи ґрунтової скиби поділяються навпіл, а відносно короткі розшаровуються по нейтральній лінії відповідно до деформаційних властивостей ґрунтового середовища. Визначальними для кінцевої стадії подрібнення є висота ґрунтоагрегатів, які утворилися в зоні розтягу дотичного до поверхні робочого органу шарі ґрунту (рис. 11, в).

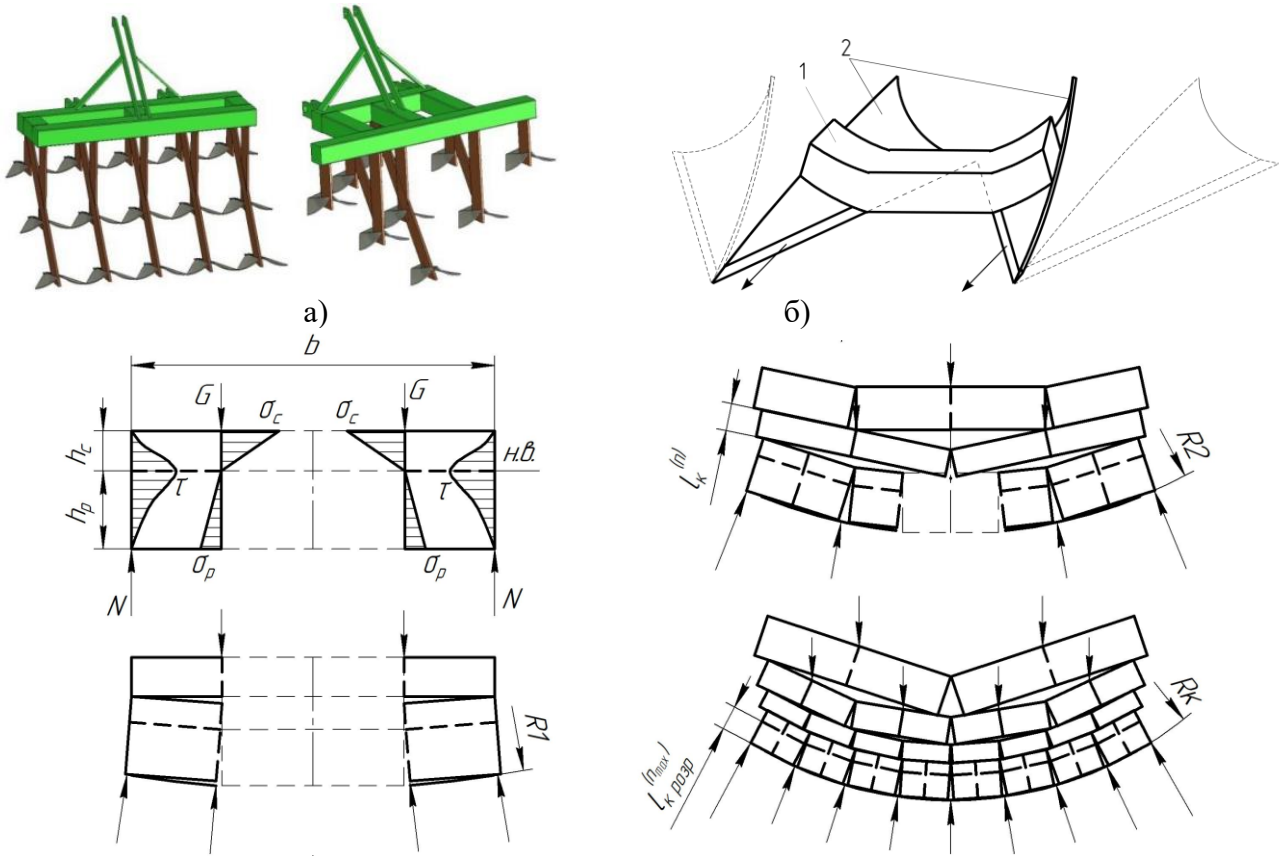


Рис. 11. Удосконалений глибокорозпушувач: а) – варіанти конструкції; б) – фізична дія на елемент ґрунтової скиби; 1 – ґрунтова скиба; 2 – робочі органи; в) – принцип поступового подрібнення ґрунту; b – ширина ґрунтової скиби; $l_к^{(n)}$ – величина структурних макроагрегатів одного розміру; h_p – висота зони розтягу; h_c – висота зони стиску

Величина структурних макроагрегатів одного розміру, які відповідають n-стадії подрібнення визначається наступним чином:

$$l_к^{(n)} = \frac{h}{E_c/E_p}\left(\frac{E_c/E_p}{E_c/E_p+1}\right)^n; \qquad n_{\max} = \ln\left(\frac{h(1+2[\sigma_p]/E_p)}{2R_к[\sigma_p]/E_p} - \frac{1}{E_c/E_p} - 1\right), \quad (7)$$

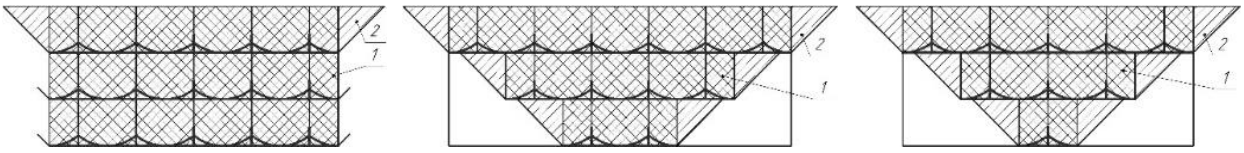
де $l_к^{(n)}$ – величина структурних макроагрегатів одного розміру; n – кількість циклів горизонтальних розшарувань, n= 1, 2, …, $n_{\max}$; E_c, E_p – відповідно, величина модуля пружності в зоні стиску та в зоні розтягу при згині ґрунтової скиби, $[\sigma_p]$ – граничне напруження розтягу; h − глибина розробки в конкретному ярусі; $R_к$ – радіус кінцевої кривизни поверхні.

Зі збільшенням стадій подрібнення величина новоутворених макроагрегатів зменшується, а їх кількість збільшується.

Описані вище підходи до змін у технологічному та робочому процесах розпушення ґрунту дали змогу отримати ефективні технологічні рішення відповідно різних потреб.

У п’ятому розділі *«Удосконалення технологій глибокого меліоративного розпушення та обґрунтування їх параметрів»* встановлено передумови ефективного впливу глибокого розпушення на активний шар ґрунту, розроблено узагальнену технологічну схему удосконаленого глибокого меліоративного розпушення для ділянок з частково працюючим дренажем, для ділянок з майже непрацюючим дренажем, для посушливих регіонів та для ділянок з переущільненими підорними шарами.

При реалізації удосконалених технологій глибоке розпушення ґрунту проводять суцільним по площі поля з різною формою профіля залежно від ґрунтових умов або технологічних вимог (рис. 12).



а) б) в)

Рис. 12. Форма і повнота розпушення поперечного профілю: а) – для легких ґрунтів (супіски і легкі суглинки); б) – для середніх ґрунтів (середні суглинки); в) – для важких ґрунтів (важкі суглинки, глини); 1 – повне структурне розпушення, 2 – часткове розпушення сколом

З урахуванням різних природніх передумов розроблено узагальнену технологічну схему удосконаленого глибокого меліоративного розпушення для меліорованих ділянок з частково працюючим дренажем, з непрацюючим дренажем, для посушливих періодів, з переущільненими підорними шарами. (рис. 13).

Глибоке меліоративне розпушення для ділянок з частково працюючим дренажем є базовим, його виконують суцільним по площі поля і по висоті прямокутного профілю розробки, верхній культурний шар розпушують до утворення середньо- та дрібногрудочкуватої структури у верхній його чверті та зернистої, дрібногрудочкуватої структури у нижніх трьох чвертях, а нижні шари розпушують до утворення крупно- та середньогрудочкуватої структури на глибину дещо меншу від глибини залягання дренажу.

На відміну від базового, для ділянок з непрацюючим дренажем, розпушення здійснюють з трапецевидним або трикутним профілем розробки;

для посушливих регіонів у верхній чверті культурного шару здійснюють вертикальне щілювання; для ділянок з переущільненими підорними шарами здійснюють взаємний обмін суміжних нижніх шарів по горизонтах залягання.

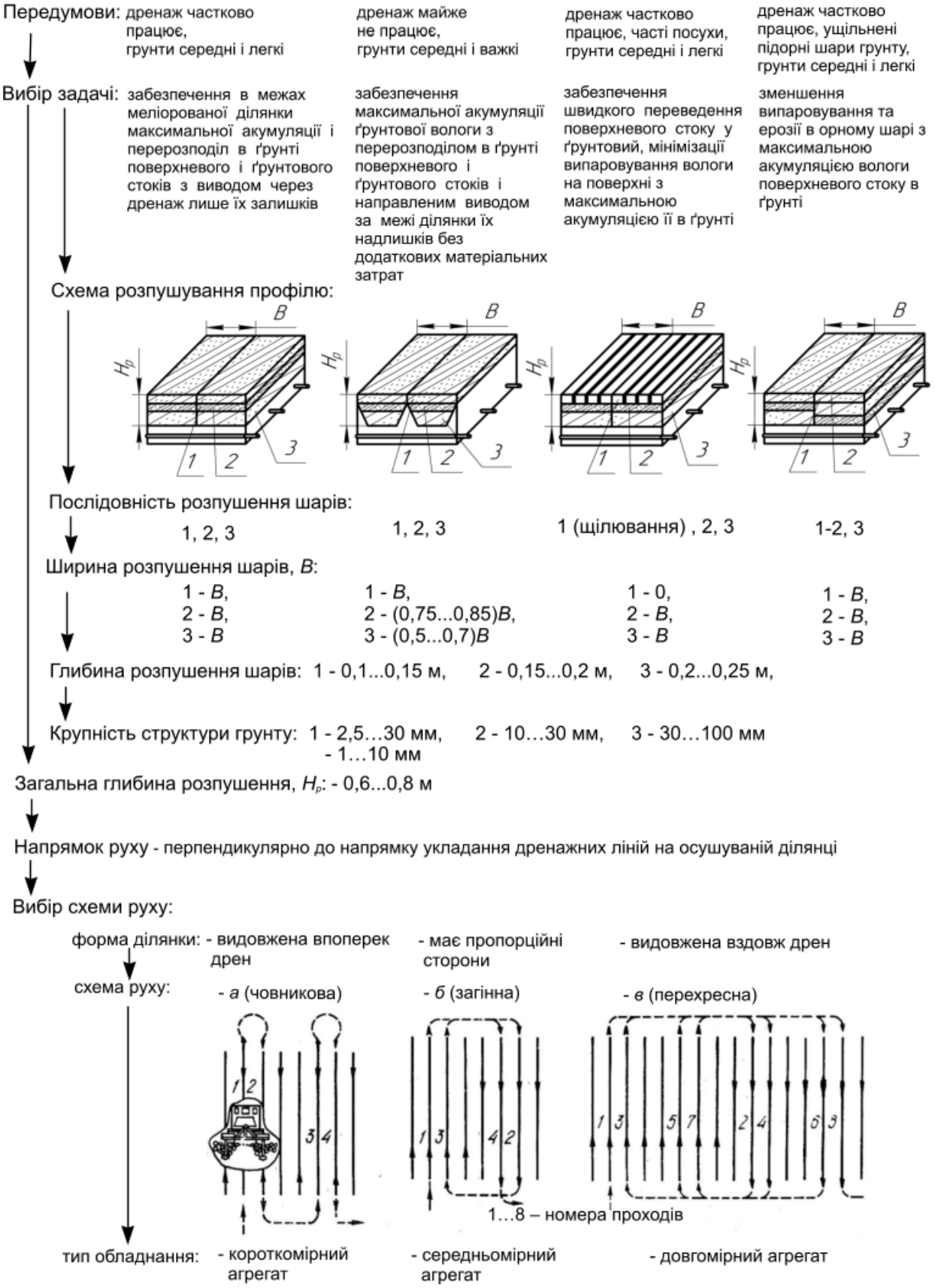


Рис. 13. Узагальнена технологічна схема удосконаленого глибокого меліоративного розпушення

Утворення зернистої та дрібногрудочкуватої структури дає можливість максимально ефективно використати вологоакумулюючий потенціал ґрунту за рахунок утворення великої площі поверхні частинок ґрунту та малих проміжків між ними в зоні над плужною підошвою де потенційно розміщуються кореневі системи більшості сільськогосподарських культур.

Утворення крупно- та середньогрудочкуватої структури до глибини залягання дренажу дає можливість достатньо швидко виводити надлишок рідини за рахунок збільшених проміжків між частинками ґрунту одночасно з деяким акумулюванням її в ґрунті через утворення достатньої площі поверхні частинок ґрунту. Утворення середньогрудочкуватої структури у верхній чверті верхнього шару захищає накопичену дещо нижче вологу від надлишкового випаровування з поверхні і вивітрювання.

У результаті в кожному з шарів ґрунту отримується вологоакумулююча структура, яка є відповідною до призначення кожного з них: з максимальним потенціалом вологоакумулювання у верхній частині та достатньою водопропускною спроможністю з одночасним акумулюванням деякої частини вологи у нижній частині ґрунтового профілю.

Запропоновані технологічні рішення спонукали до відповідного конструктивного вдосконалення технічних засобів для їх реалізації.

У шостому розділі *«Удосконалення технічних засобів глибокого меліоративного розпушення та обґрунтування їх параметрів»* обґрунтовано форму та параметри поверхні робочих органів, визначено необхідне тягове зусилля для здійснення робочого процесу розпушення ґрунту, обґрунтовано форму і визначено динамічний опір вертикального стояка щодо руху в ґрунтовому потоці, визначено величину критичної глибини розробки ґрунту передньою частиною робочих органів, проаналізовано вплив швидкості руху на енергоємність глибокої розробки ґрунту, визначено загальний тяговий опір глибокорозпушувача при різній компоновці робочих органів, наведено методику розрахунку конструктивних параметрів глибокорозпушувача.

В процесі розпушення ґрунт рухається вздовж поверхонь робочих органів, поступово загинається від країв і розкришується на ґрунтові агрегати величина яких пропорційна радіусу кривизни поверхонь на виході з них (рис. 14).

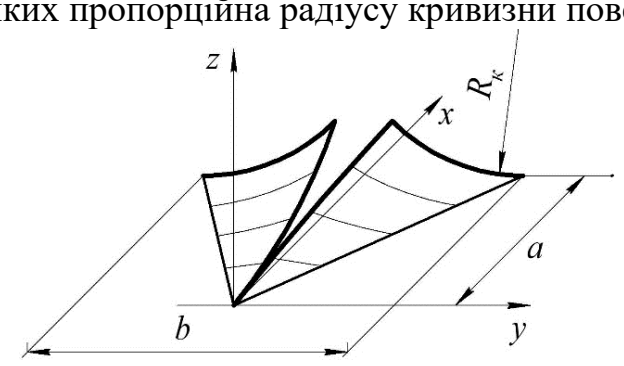


Рис. 14. Утворення форми поверхні робочого органу

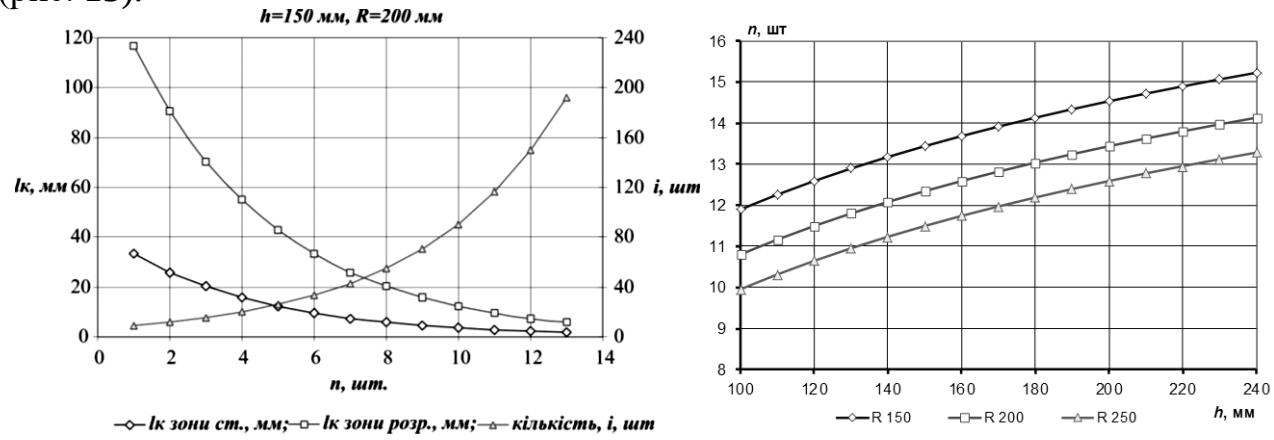
Математична модель форми в декартових координатах,

$$z(x,y)=\frac{a}{x}R_к-\sqrt{\left(\frac{a}{x}R_к\right)^2-\left(y\pm\frac{b}{2}\right)^2}\ , \quad (8)$$

де z, y, x – поточні координати, $x\neq 0$; $x= 0\text{-}a$; $y= -b/2\text{-}b/2$.

Кінцевий радіус ґрунторозпушувального робочого органу визначає кількість стадій подрібнення і енергоємність процесу, яка пропорційна глибині розробки ґрунту в ярусі і обернено пропорційна величині радіусу. Загальна

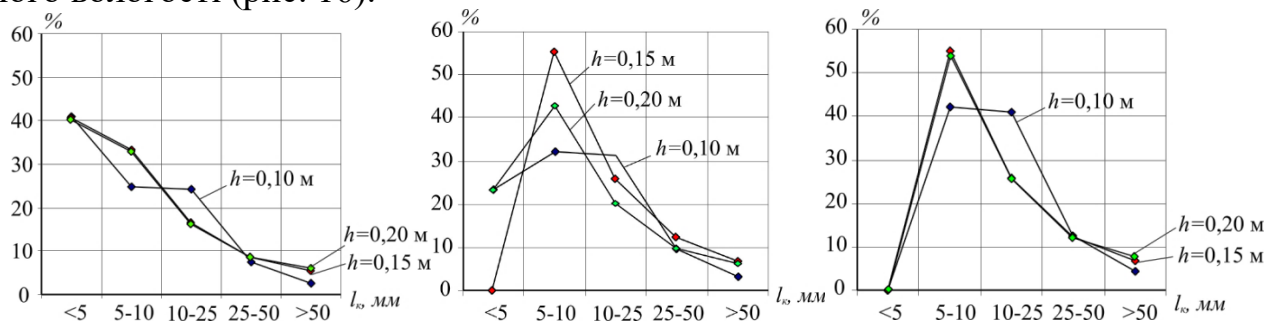
кількість стадій подрібнення n, для можливих орієнтовних значень конструктивних параметрів робочого органу, лежить в межах 10–15 шт. (рис. 15).



а б

Рис. 15. Величина структури і стадії подрібнення ґрунтової скиби: h − глибина розробки в конкретному ярусі; R – радіус кривизни ґрунтової скиби

За прийнятою схемою подрібнення співвідношення розмірів макроагрегатів структури розпушеного ґрунту залежить від конструктивних параметрів робочого органу та відношення модулів пружності ґрунтового середовища на стиск та розтяг, який в свою чергу залежить від типу ґрунту та його вологості (рис. 16).



а *б* *в*

Рис. 16. Структура розпушеного ґрунту за кількістю ґрунтоагрегатів
а – $R_к$= 0,15 м; *б* – $R_к$= 0,15 м; *в* – $R_к$= 0,15 м; h – висота ярусу, мм; $R_к$ – радіус кінцевої кривизни поверхні, мм; $l_к$ – розмір ґрунтових агрегатів, мм

Згідно рис. 16, структура розпушеного ґрунту для верхнього протиерозійного шару буде відповідною до вимог при середніх значеннях кінцевого радіусу ґрунторозпушувальних робочих органів (0,18–0,22 м), кореневмісного шару – при малих значеннях (0,15-0,18 м), а нижніх фільтраційних шарів – при більших (0,22–0,25 м), а конструкція глибокорозпушувача, у такому випадку, повинна бути 3-ярусною.

Для визначення зусилля тяги на подрібнення і переміщення поверхнею робочого органу за розрахунковою схемою виведено залежність (8) (рис. 17).

$$P_f = f[\frac{0,05\sigma_m h^2}{(1+E_c/E_p)^3}\cdot\sum_n(\frac{2}{\left(1+\frac{1}{E_c/E_p}\right)^2})^n+\frac{\gamma ahl}{4}\cos\frac{l}{6R_к}], \quad (9)$$

де γ – сила тяжіння об’єму ґрунту; a – довжина робочого органа; f – коефіцієнт

тертя ґрунту по металу; h – висота ґрунтового шару, що подрібнюється; l – сумарна довжина дуг симетричних робочих органів на виході з них; σ_m – несуча здатність ґрунту; E_c, E_p – відповідно, модуль пружності в стиску та розтягу; n – необхідна кількість стадій подрібнення; $R_к$ – радіус робочих органів на виході.

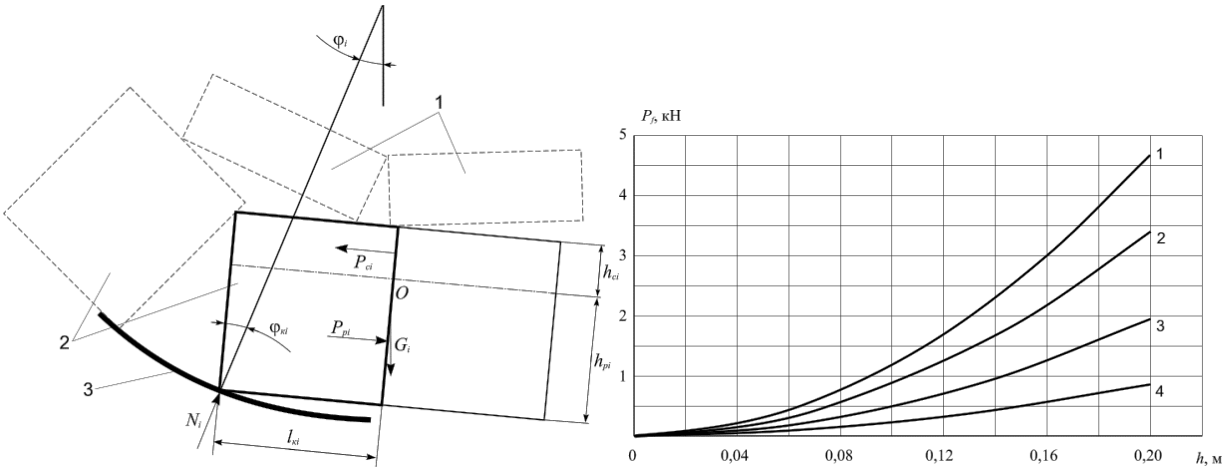


Рис. 17. Зусилля на подрібнення і переміщення поверхнею робочого органу: 1 – k_h= 4; 2 – k_h= 3,5; 3 – k_h= 3; 4 – k_h= 2,5; при γ= 20 кН/м^3; a= 0,25 м; l= 0,35 м; σ_m= 200 кПа; $l_к^{розр}$ =0,01 м; $R_к$ = 0,2 м; 1 – глина вологістю 55%, суглинок вологістю 23%, супісок вологістю 14%; 2 – глина вологістю 46%, суглинок вологістю 19%, супісок вологістю 12%; 3 – глина вологістю 36%, суглинок вологістю 15%, супісок вологістю 10%; 4 – глина вологістю 27%, суглинок вологістю 11%, супісок вологістю 7%

За схемою взаємодії стояка з ґрунтом (рис. 18) визначено залежність (8) для визначення динамічного опору розтинанню профілями різної форми (рис. 19).

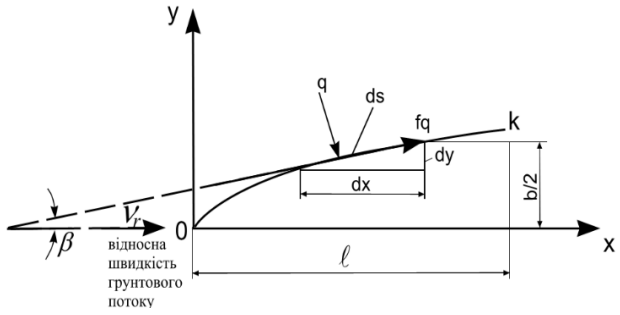
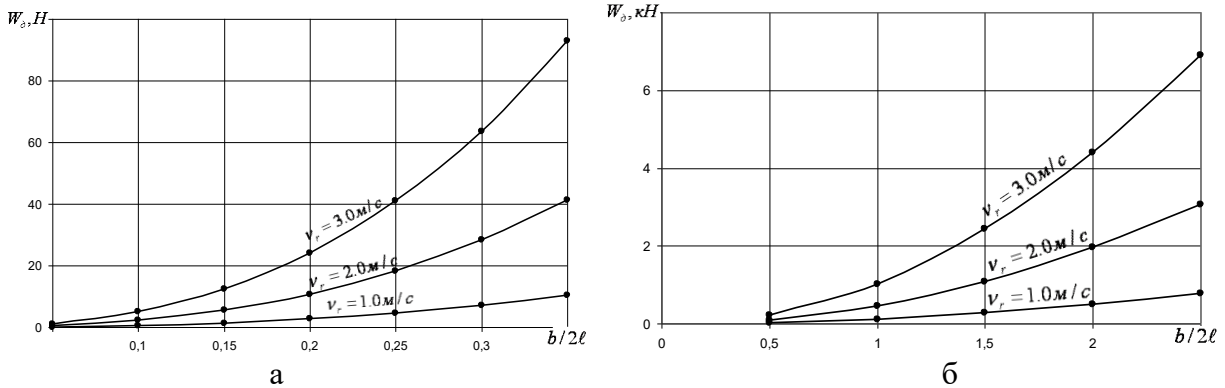


Рисунок 18 – Схема взаємодії стояка з ґрунтом

$$W_д = \rho_c B_k h_{кр} v_r^2 \sin\beta_{тр} (f + \frac{b}{2\ell})(\frac{b}{2\ell})^2 , \quad (10)$$

де ρ_c – щільність ґрунтового потоку; B_k – ширина ґрунтового потоку; l – довжина носової частини; v_r – відносна швидкість ґрунтового потоку; $h_{кр}$ – критична глибина різання (висота ярусу); $\beta_{тр}$ – кут нахилу ґрунторозсікача; f – коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні ґрунторозсікача стояка.



а б

Рис. 19. Залежності динамічного опору розтинанню: а – відносно тонкими профілями; б – відносно не тонкими профілями

Динамічний опір зростає із збільшенням відношення *b/(2l)* при заданій товщині ґрунторозсікача *b*, причому, більш інтенсивне зростання має місце для відносно тонких профілів, але по абсолютній величині суттєво більший опір мають відносно не тонкі профілі.

За схемою взаємодії ріжучих кромок долота стояків (ґрунторозсікача) з ґрунтом при блокованому різанні (рис. 20) визначено масимальну відносну глибину розущільнення ґрунту у верхньому (11) та нижніх (12) ярусах.

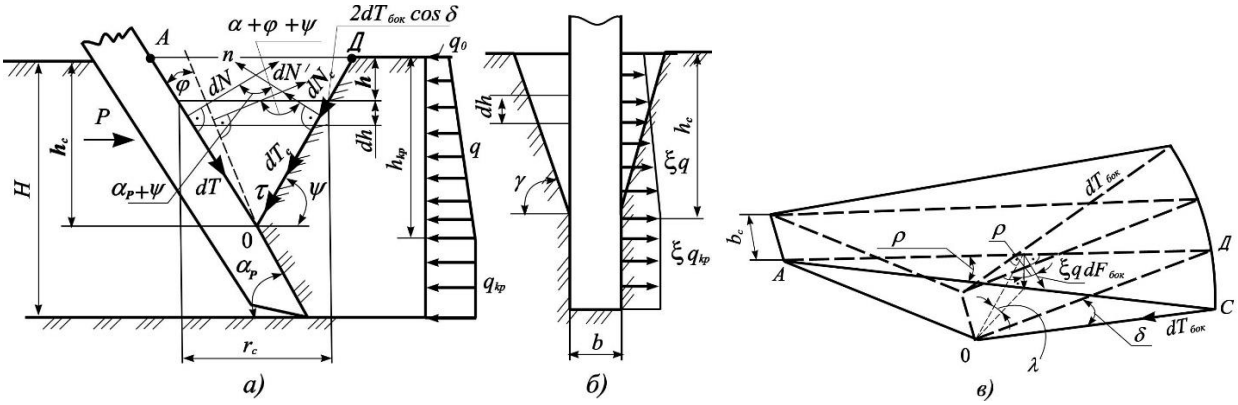


Рис. 20. Схема взаємодії ріжучих кромок долота стояків з ґрунтом при блокованому різанні: *а*) – у поздовжній площині; *б*) – у поперечній площині; *в*) – форма елемента стружки у процесі заглиблення ножа

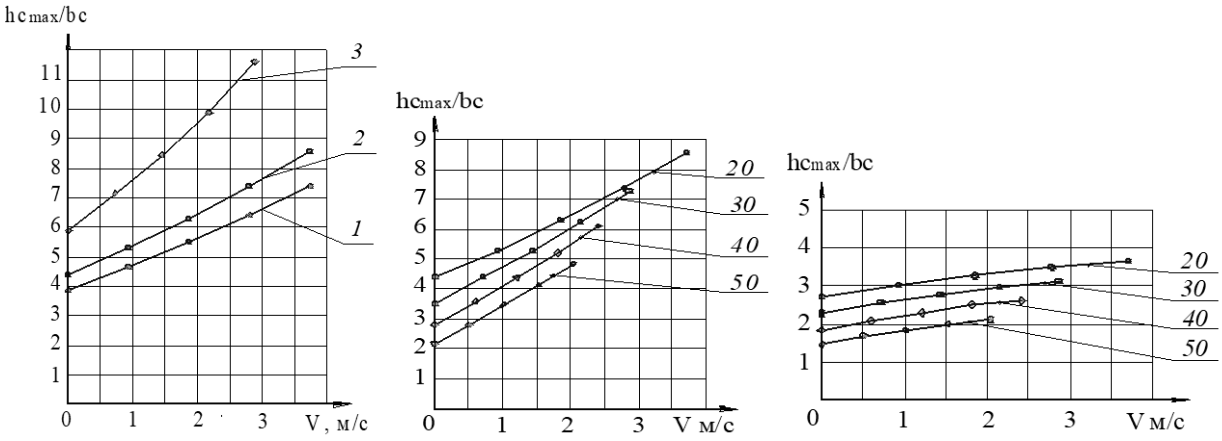
$$\frac{h_{c_1}}{b_c}=\frac{\left(1+\frac{v}{v_{кр}}\right)\left[q_0+\frac{q_{кр}-q_0}{2}\cdot k_{пер}+q_v\right]\cdot\frac{\sin\left(\alpha_p+\varphi+\varphi_0+\psi\right)}{\cos\varphi\cdot\cos\varphi_0\cdot\sin\alpha_p}-\frac{c}{\sin\psi}}{c\cdot\left(ctg\,\alpha_p+ctg\,\psi\right)\cdot\left(\frac{\rho}{\sin\psi}+\frac{\cos\delta}{\cos\lambda}\right)-\left(1+\frac{v}{v_{кр}}\right)\cdot q_v\cdot\frac{ctg\,\gamma}{2}\cdot\frac{\sin(\alpha_p+\varphi+\varphi_0+\psi)}{\cos\varphi\cdot\cos\varphi_0\cdot\sin\alpha_p}};\tag{11}$$

$$\frac{h_{c_2}}{b_c}=\frac{\left(1+\frac{v}{v_{кр}}\right)\left[q_0+\frac{q_{кр}-q_0}{2}\cdot k_{пер}+q_v\right]\cdot\frac{\sin\left(\alpha_p+\varphi+\varphi_0+\psi\right)}{\cos\varphi\cdot\cos\varphi_0\cdot\sin\alpha_p}-\frac{c}{\sin\psi}}{\left(ctg\,\alpha_p+ctg\,\psi\right)\left[\left(1+\frac{v}{v_{кр}}\right)\cdot\xi\left(q_0+\frac{q_{kp}+q_0}{3}\cdot k_{пер}+q_v\right)\cdot tg\,\varphi_0+c\right]};\tag{12}$$

$$q_v=\frac{\gamma_{гр}\cdot\cos\psi\cdot\cos\varphi\cdot\sin^2\alpha_p}{g\cdot\sin(\alpha_p+\psi)\cdot\sin(\alpha_p+\varphi)}\cdot v^2,\tag{13}$$

де q_0, $q_{кр}$ – відповідно мінімальний тиск на денній поверхні та максимально можливий тиск по несучій спроможності ґрунту (критичний тиск); $k_{пер}$ – відношення глибини гарантованого сколювання ґрунту h_c до критичної глибини різання $h_{кр}$ ($k_{пер}$=0,9-0,95); b_p – ширина різця; φ – кут зовнішнього тертя ґрунту; α_p – кут різання різця; ψ – кут зсуву ґрунту різцем в поздовжній площині; φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту; c – коефіцієнт зчеплення ґрунту; ξ – коефіцієнт бокового тиску елемента ґрунтової стружки; ρ, δ, λ – кути між боковою площиною сколювання і вертикальною боковою стінкою траншеї.

Для обґрунтування раціональної швидкості руху машинного агрегату по полю встановлено залежність відносної глибини сколювання ґрунтів від швидкості різання ножа у верхньому так і в нижніх ярусах рис. 21.



а) б) в)

Рис. 21. Залежність відносної глибини сколювання ґрунтів від швидкості різання: а – у верхньому ярусі з кутом різання 20º для тугопластичної глини (1), напівтвердого суглинку (2); твердого супіску (3); б, в – відповідно, у верхньому та нижньому ярусах для напівтвердого суглинку при різних кутах різання

В залежності від типу ґрунту, що підлягає розпушенню, та його призначення, компоновка робочих органів може бути здійснена у різних варіантах враховуючи форму поперечного профілю розпушеного ґрунту.

Згідно проведених розрахунків найкращим з точки зору питомих витрат на структурне розпушення ґрунту буде варіант з клиновим розміщенням робочих органів в ярусі незалежно від форми утворених профілів розпушеного ґрунту, рис. 22. В таких робочих органах коефіцієнт загальної повноти розпушення поперечного профілю лежить в межах 0,63–1,04. Значення коефіцієнтів зменшуються при зміні прямокутного профілю і наближенні його до трикутного.

Тяговий опір триярусного глибокорозпушувача з шириною захвату 2 м для суглинистих ґрунтів при різних формах профілю розпушення лежить в досить широких межах 11–50 кН, рис. 23. Варіант з клиновим розміщенням робочих елементів в ярусі буде більш вигідним за тягою відносбо інших на 12–17%.

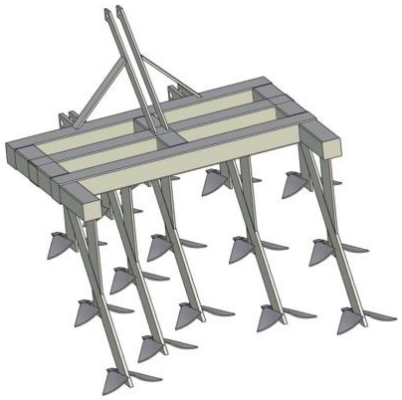


Рис. 22. Просторова конфігурація робочих органів глибокорозпушувача

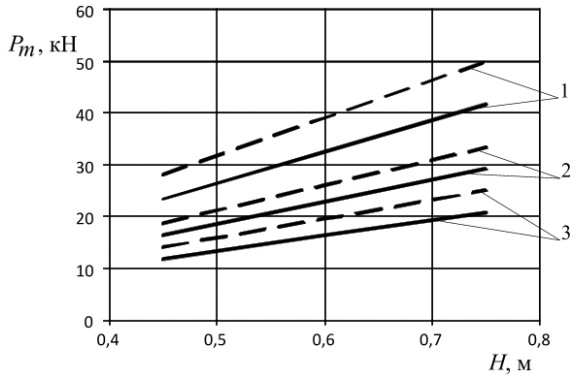


Рис. 23. Тяговий опір глибокорозпушувача: 1 – прямокутний профіль; 2 – трапецієвидний профіль; 3 – трикутний профіль; штрихова лінія – рядне розміщення робочих органів в ярусі; суцільна лінія – клинове розміщення робочих органів в ярусі

Ефективність розроблених рішень щодо удосконалення технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення було перевірено за комплексом показників різної направленості.

У сьомому розділі *«Порівняльне оцінювання ефективності удосконалених технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення на осушуваних мінеральних ґрунтах Західного Полісся України»* приведено загальну характеристику об'єктів досліджень, описано методи оцінювання та приведено результати оцінювання показників агротехнічної, енергетичної, технологічної, еколого-економічної та інвестиційної ефективності різних технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення.

Порівняльне оцінювання загальної ефективності застосування різних варіантів глибокого розпушення було здійснено комплексом показників різної направленості (рис. 24) на репрезентативних об'єктах Західного Полісся України в Рівненській області: ПСП «Мирне», ТОВ «СВК Горинь», ПСП «Світанок».

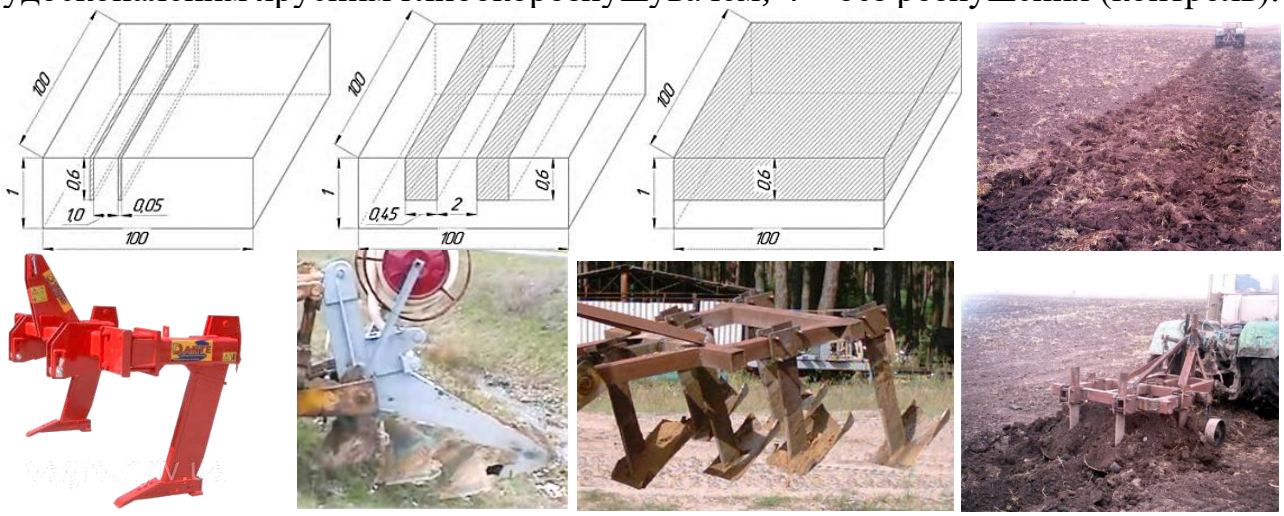
Рис. 24. Комплекс показників оцінювання загальної ефективності технологій і технічних засобів глибокого розпушення

Ґрунтові умови дослідної ділянки в ПСП «Мирне» на площі 25 га: дерново-підзолисті глейові супіщані ґрунти з коефіцієнтом фільтрації орного шару ґрунту (0–20 см) – 0,13–0,4 м/добу, а на глибині 20 см і більше – 0,13–0,003 м/добу. Глибина закладання дренажу – 0,8–1,2 м; відстань між дренами – 10–20 м.

Виробничі потужності ТОВ «СВК Горинь» загальною площею 513 га характеризуються переважно темно-сірими опідзоленими чорноземами та суглинистими ґрунтами щільністю 1,43–1,56 г/см^3 з вологістю 14–18% на глибині до 0,6 м де проводиться вирощування зернових (кукурудзи) та олійних (ріпак) культур. За довідковими даними рівні залягання ґрунтових вод 0,75–2,0 м.

Виробничі потужності ПСП «Світанок» розташовані в межах осушувальної системи «Деражне-Постійне» з відкритою мережею каналів у сполученні з гончарним дренажем. Площа сільськогосподарських угідь 3554 га. Рельєф поверхні рівнинний. Ґрунти на системі дернові середньо-підзолисті, піщані. Зустрічаються легкі і важкі, сірі і брудно-сірі супіски.

Варіанти впливу на водно-фізичні властивості та агромеліоративний стан осушуваних мінеральних ґрунтів були наступними (рис. 25): 1 – щілинне розпушення двохстояковим глибокорозпушувачем; 2 – смугове розпушення одностояковим ярусним глибокорозпушувачем; 3 – суцільне розпушення удосконаленим ярусним глибокорозпушувачем; 4 – без розпушення (контроль).



а) б) в) г)

Рис. 25. Способи і засоби глибокого розпушення: а) – двохстояковий глибокорозпушувач (щілинне розпушення); б) – одностояковий ярусний глибокорозпушувач (смугове розпушення); в) – ярусний глибокорозпушувач (суцільне розпушення); г) –ярусний глибокорозпушувач у виробничих умовах

За отриманими експериментальними результатами було здійснено прогнозні розрахунки на основі використання відповідного комплексу прогнозно-імітаційних моделей, що включає модель клімату місцевості, моделі водного режиму та технологій водорегулювання осушуваних земель, модель розвитку та формування врожаю вирощуваних культур, що реалізуються на основі довгострокового прогнозу.

За результатами оцінювання різних технологій глибокого розпушення визначено, що порівняно з традиційними, удосконалені за енергоефективними та вологорегулюючими принципами технології та технічні засоби суцільного глибокого розпушення мають перевагу за всіма основними показниками: агротехнічними, водно-фізичними, енергетичними, технологічними, екологічними та економічними, зокрема, в 6–10 разів зменшилася питома енергоємність робочого процесу розпушення ґрунту, на 6–50% зросла вологоакумулююча здатність ґрунту (рис. 26) та на 27% його вологозапезпеченість, на 20–30% підвищилася врожайність вирощуваних культур, термін післядії – до 4 років.

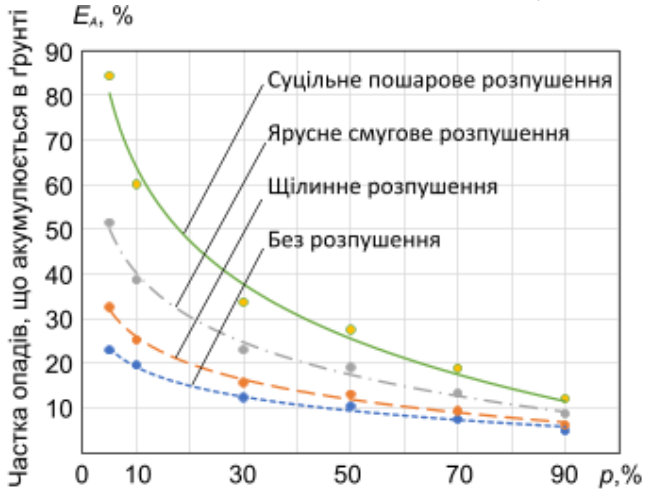


Рис. 26. Ефективність акумуляції опадів в ґрунті при різних умовах тепло- вологозабезпеченості

Узагальнені результати порівняльного оцінювання ефективності удосконалених технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення мінеральних ґрунтів з регульованим водним режимом за комплексом складових загальної ефективності наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Результати оцінювання ефективності технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів

№ з/п	Показники ефективності	Зміна значень показників щодо варіанту без розпушення, %		Зміна значень показників удосконаленої технології щодо щілинного, %
		Традиційне щілинне розпушення	Удосконалене суцільне розпушення	
Агротехнологічні				
1	Щільність ґрунту	–3…–6	–24…–27	–21…–23
2	Шпаруватість ґрунту	+9…+10	+29…+32	+19…+23
3	Акумулююча ємність ґрунту	+51…+54	+165…+175	+111…+124
4	Продуктивність вирощуваних культур	+7…+13	+33…+65	+20…+58
5	Термін післядії розпушення, роки	1…3*	3…4*	+100…+300
Енергетичні				
6	Питомі затрати енергії на розпушення до зернистої структури 1 м^3 ґрунту, Дж/м^3	7,5…8,2*	0,8…0,9*	–88…–90
Вологорегулюючі				
7	Величина інфільтрації на осушуваних землях та її вплив на навантаження роботи дренажа	+9…+18	–21…–22	–30…–40
8	Тривалість відведення надлишкової води дренажем у критичних умовах перезволоження ґрунту	+8…–6	–5…–35	–13…–29
9	Величина живлення активного кореневмісного шару меліорованого ґрунту з рівня ґрунтових вод	+5…+15	–15…–36	–20…–51
10	Продуктивні запаси вологи в меліорованому ґрунті за рахунок підвищення ефективності використання опадів та поливної води	+27…+42	+86…+134	+44…+107
Екологічні				
11	Інтенсивність промивного водного режиму на осушуваних землях	+9…+18	–21…–22	–30…–40
12	Ризик відновлення та розвитку процесу вторинного засолення на зрошуваних земля	+5…+15	–15…–36	–20…–51
Економічні				
13	Термін окупності поточних витрат на розпушення ґрунту в умовах діючої меліоративної системи, роки	1*	1*	–
Інвестиційні				
14	Дисконтований термін окупності інвестицій у проєкт нового будівництва/реконструкції меліоративної системи із застосуванням розпушення ґрунту, роки	24…27*	5…7*	–71…–81

Отже, удосконалені технології суцільного глибокого меліоративного розпушення є рентабельним та інвестиційно вигідним адаптивним агромеліоративним заходом у змінюваних кліматичних умовах.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі теоретично узагальнено наявні підходи й запропоновано нове вирішення актуальної науково-практичної проблеми удосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів за енергоефективними та вологорегулюючими принципами для підвищення їх вологозабезпеченості та поліпшення еколого-меліоративного стану щодо сучасних змінюваних умов та вимог.

1. У розвиток науково-методичних засад щодо удосконалення глибокого меліоративного розпушення за співставленням дії природних і техногенних факторів на меліорований ґрунт показано, що наявні енергетична, продовольча та водна кризи, що загострюються в умовах змін клімату як на планетарному, так і регіональному рівнях, а також зростання вартості енергетичних ресурсів і незадовільний еколого-меліоративний стан осушуваних ґрунтів, *зумовлюють необхідність* зміни вимог для раціонального використання водних і земельних ресурсів меліорованих земель, зміни підходів до функціонування водогосподарсько-меліоративних об’єктів та застосування ефективних адаптивних щодо змінюваних сучасних умов і вимог агромеліоративних заходів, спрямованих на енергоефективне регулювання водного режиму, зарегулювання і акумуляцію вологи в ґрунтовому профілі в межах меліоративної системи, підвищення вологозабезпеченості ґрунтів, зокрема, *шляхом* удосконалення глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів за енергоефективними та вологорегулюючими принципами.

2. У розвиток науково-системних підходів до удосконалення технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення в структурі меліоративної системи за енергоефективними та вологорегулюючими принципами на основі застосування системної методології встановлено, що визначальними чинниками цих принципів є врахування закономірностей енергетичного взаємозв’язку між параметрами технологічно-конструктивних структурних блоків складної природно-технічної еколого-економічної меліоративної системи, таких як: фактори впливу на споживчі властивості глибокого меліоративного розпушення, макроструктура розпушеного ґрунту, водно-фізичні властивості ґрунтових шарів, водні потоки, вологоакумулююча та сорбційна здатність ґрунту, навантаження на дренаж, технологічний і робочий процес, конструкція робочих органів і ґрунторозпушувального агрегату в цілому, приріст врожайності агрокультур.

3. За результатами досліджень зміни параметрів макроструктури мінерального ґрунту при розпушенні на основі аналітичного та фізичного моделювання ймовірного просторового розміщення його макроагрегатів отримано закономірності впливу макроструктури ґрунтового середовища на водно-фізичні властивості, згідно яких встановлено, що найвищі значення коефіцієнта розпушення спостерігаються при відносній вологості ґрунту 10-40%; найбільш енергетично доцільною для підвищення вологоакумулюючих властивостей є орієнтація на дрібногрудочковату структуру розпушеного ґрунту з макроагрегатами розміром 4–5 мм, а для забезпечення більш фільтраційних і

частково акумулюючих показників ґрунту – на середньогрудочковату структуру з макроагрегатами розміром 6–25 мм. За експериментальним визначенням енергетичного коефіцієнта пропорційності для теорії Бонда, залежно від типу ґрунту, визначено, що питома енергоємність розпушення ґрунту є обернено пропорційною до розміру його макроструктури після розпушення і становить: для утворення дрібногрудочковатої структури – 100–220 кДж/м^3, для утворення середньогрудочковатої – 50–130 кДж/м^3.

4. За розробленими вологорегулюючими принципами обґрунтовано доцільність здійснення суцільного за площею але диференційованого за профілем та глибиною пошарового глибокого розпушення ґрунту до утворення дрібногрудочковатої та середньо-, крупногрудочковатої макроструктури ґрунту з урахуванням призначення ґрунтових шарів і формуванням різного профілю розпушеної смуги ґрунту, що дає змогу на основі вертикально-горизонтальної переорієнтації низхідних водних потоків шляхом збільшення акумуляційної здатності активного кореневмісного шару ґрунту внаслідок зміни його макроагрегатного стану і водно-фізичних властивостей вплинути на формування водно-повітряного режиму та досягти підвищення ефективності вологорегулювання в різні за умовами тепло- і вологозабезпеченості періоди вегетації зменшенням кількості відведення надлишкової вологи та навантаження на дренаж у вологі періоди, а також підвищенням його вологозабезпеченості у посушливі, що забезпечує зростання врожайності вирощуваних агрокультур та сприятливий еколого-меліоративний стан осушуваного масиву.

5. За розробленими енергоефективними принципами обґрунтовано конструкцію удосконаленого глибокорозпушувача, що представляє собою раму з несучими стояками, на яких, для здійснення докритичноглибинної неблокованої розробки окремих шарів ґрунту поярусно закріплені робочі органи у вигляді спряження долота-леміша з увігнутими стріловидними ґрунторозпушувальними елементами змінної кривизни, через форму і параметри якої задається необхідна величина напруження і ступінь подрібнення розроблюваного ґрунту поступовим двостороннім розущільненням макроагрегатної структури ґрунту згином та розтягом в кожному шарі окремо. Загальна компоновка глибокорозпушувача визначається просторовим рознесенням робочих органів в трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

6. За удосконаленими науково-методичними підходами обґрунтовано технологічні параметри глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів (кількість і глибина шарів, площа розпушення, форма профілю, величина макроагрегатів ґрунту) для здійснення суцільного глибокого меліоративного розпушення щодо різних ґрунтових умов та технологічних вимог: для меліорованих ділянок з частково працюючим дренажем, з непрацюючим дренажем, для посушливих періодів, з переущільненими підорними шарами. Глибоке меліоративне розпушення для ділянок з частково працюючим дренажем є базовим, його суцільним по площі поля і по висоті прямокутного профілю розробки, верхній культурний шар розпушують до утворення середньо- та дрібногрудочковатої структури у верхній його чверті та зернистої, дрібногрудочковатої структури у нижніх трьох чвертях, а нижні шари

розпушують до утворення крупно- та середньогрудочкуватої структури на глибину дещо меншу від глибини залягання дренажу. На відміну від базового, для ділянок з непрацюючим дренажем, розпушення здійснюють з трапецевидним або трикутним профілем розробки; для посушливих періодів у верхній чверті культурного шару здійснюють вертикальне щілювання; для ділянок з переущільненими підорними шарами здійснюють взаємний обмін суміжних нижніх шарів по горизонтах залягання.

7. За удосконаленими науково-методичними підходами обґрунтовано конструктивні параметри технічних засобів глибокого меліоративного розпушення (ярусність і горизонтальне зміщення робочих органів, їх кількість, форми грунторозсікача і робочих органів та їх розміри) глибокорозпушувачів з урахуванням форми профілю розпушення, швидкості руху, водно-фізичних властивостей і відносної глибини розущільнення ґрунту окремо в кожному шарі. Ярусність конструкції визначається функціональністю ґрунтових шарів та відносною глибиною розущільнення; найбільш вигідним компонуванням глибокорозпушувача за питомими показниками буде 3-ярусний варіант з клиновим розміщенням робочих органів в плані кожного ярусу; значення кінцевого радіусу ґрунторозпушувальних робочих органів для верхніх протиерозійних шарів 0,18–0,22 м, для кореневмісних шарів –0,15–0,18 м, для фільтраційних шарів – 0,22–0,25 м; розрахункові значення відносної глибини розущільнення для доліт крайніх визначальних стояків знаходяться відповідно в межах (при зміні кута різання $\alpha_р$=50°…20°): для тугопластичної глини 1,74–3,12; для напівтвердого суглинку 1,76–3,27; для твердого супіску 1,78–3,75; для напівтвердої глини 1,71…3,08. При загальній ширині захвату робочих органів 2 м, для глибокого розпушення на 0,75 м та робочій швидкості 2 м/с або для розпушення на 0,25 м та швидкості 4 м/с, необхідно мати потужність технічних засобів 170–240 кВт для супіщаних ґрунтів і 390–440 кВт для суглинистих ґрунтів.

8. За результатами порівняльного оцінювання загальної ефективності технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення за комплексом різнорідних технічних, технологічних, економічних, екологічних, інвестиційних параметрів встановлено, що порівняно з традиційними, удосконалені за енергоефективними та вологорегулюючими принципами технології та технічні засоби суцільного глибокого розпушення мають перевагу за всіма основними показниками: агротехнічними, водно-фізичними, енергетичними, технологічними, екологічними та економічними, зокрема, в 6–10 разів зменшилася питома енергоємність робочого процесу розпушення ґрунту, на 6–50% зросла вологоакумулююча здатність ґрунту та на 27% його вологозабезпеченість, на 20–30% підвищилася врожайність вирощуваних культур, а термін післядії зріс до 4 років. Також доведено, що удосконалені технології суцільного глибокого меліоративного розпушення є рентабельним та інвестиційно вигідним адаптивним агромеліоративним заходом з окупністю 1 рік, що відповідає сучасним принципам адаптивного землекористування у змінюваних кліматичних умовах та може бути ефективною альтернативою дорогій реконструкції і модернізації існуючих дренажних систем.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

З метою удосконалення технологій глибокого меліоративного розпушення мінеральних ґрунтів рекомендовано до використання виробництву:

- розроблені вологорегулюючі принципи удосконалення технологій глибокого меліоративного розпушення мінеральних ґрунтів з регульованим водним режимом з переорієнтацією водних потоків у ґрунтовому масиві на вертикально-горизонтальні з акумуляцією вологи в розпушеному ґрунті для підвищення в середньому на 27% його вологозабезпеченості;
- розроблені енергоефективні принципи удосконалення пасивних технічних засобів глибокого меліоративного розпушення з горизонтальною пошаровою диференціацією потоків техногенної енергії з почерговою горизонтальною докритичноглибинною неблокованою розробкою окремих шарів ґрунту поступовим двостороннім розущільненням макроагрегатної структури ґрунту згином та розтягом робочими органами зі зменшеними до 40% питомими енергозатратами;
- метод обґрунтування технологічних параметрів глибокого меліоративного розпушення з суцільним за площею але диференційованим за профілем і глибиною пошаровим макроагрегатним розущільненням шарів ґрунту з урахуванням їх (дрібно-, середньо- або крупно-) грудочкуватої структури та водно-фізичних властивостей, що, порівняно з традиційними, дає змогу в загальному підвищити врожайність вирощуваних культур на осушуваних мінеральних ґрунтах на 20–30%;
- метод обґрунтування конструктивних параметрів пасивних технічних засобів глибокого меліоративного розпушення з ярусно-клиновою просторовою конфігурацією робочого обладнання та розрахунку робочих органів з урахуванням форми і пошаровості профілю розпушення, водно-фізичних властивостей, швидкості руху і відносної глибини розущільнення окремо в кожному шарі ґрунту.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Монографії, розділи в монографіях:

1. Ткачук В. Ф., **Лук’янчук О. П.**, Рижий О. П. Агромеліоративні багатоярусні глибокорозпушувачі : монографія. Рівне : НУВГП, 2011. 190 с. ISBN 978-966-327-167-5. URL: http://search.nbuv.gov.ua/publ/REF-0000274202 *(8,6 а.а.; особистий внесок: проведено детальний аналіз конструкцій агромеліоративних глибокорозпушувачів, підготовлено розділи 1–4, 5,1 а.а.).*

2. Кравець С. В., Кованько В. В., **Лук’янчук О. П.** Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 322 с. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/3203/1/126not_all_zah.pdf *(14,6 а.а.; особистий внесок: проведено аналіз критеріїв якості та вагомості параметрів енергоємності структурного розпушення ґрунтів, підготовлено розділ 6, підрозділи 1.5, 8.9, 1,1 а.а.)*.

3. Турченюк В. О., **Лук’янчук О. П.,** Заєць В. В. Способи і засоби глибокого розпушування осушуваних мінеральних ґрунтів Західного Полісся. *Меліорація та облаштування Українського Полісся* : колективна монографія / за ред.

Я. М. Гадзала, А. М. Рокочинського. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. Т. 1. С. 636–646. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/15540 *(38,0 а.а.; особистий внесок: проведено аналіз моделі робочого процесу розпушення, розроблена конструкція розпушувача, підрозділ 21.3, 0,4 а.а.)*.

4. **Лук'янчук О. П.**, Волк П. П. Підвищення дренованості та рівномірності фільтрації по площі та профілю карт-чеків на основі глибокого розпущення ґрунтів рисових зрошувальних систем. *Рисові зрошувальні системи України: підвищення ефективності їх функціонування* : колективна монографія / за ред. д.с.-г.н., проф., акад. НААН Р. А. Вожегової, д.т.н., проф. А. М. Рокочинського. Київ-Херсон-Рівне : НУВГП, 2023. С. 278–291. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/25344 *(19,2 а.а.; особистий внесок: опрацьовані показники ефективності глибокого розпушення на зрошувальних ґрунтах, підрозділ 10.2, 0,6 а.а.).*

5. **Лук'янчук О. П.,** Рокочинський А. М. Удосконалення технологій і технічних засобів глибокого розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів на основі системної методології. **Лук'янчук О. П.,** Рокочинський А. М., Волк П. П., Турченюк В. О., Коптюк Р. М. Удосконалене глибоке розпушення як ефективний адаптивний агромеліоративний захід на осушуваних землях. *Підвищення ресурсного потенціалу Українського Полісся :* монографія / за ред. д.с.-г.н., проф. В. С. Мошинського, д.т.н., проф. А. М. Рокочинського та ін. Рівне : НУВГП, 2024. С. 432–457. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/30397 *(36,0 а.а.; особистий внесок: опрацьовано системні підходи до обґрунтування принципів удосконалення глибокого меліоративного розпушення як адаптивного агромеліоративного заходу, розділи 18, 19; 1,2 а.а.).*

Публікації у наукових виданнях іноземних держав та у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз:

6. **Lukianchuk O. P.**, Ryzhyi O. P., Ihnatiuk R. M. Design of tiered operating unit for deep differentiat-ed tillage. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. Vol. 4. Pp. 43–48. (Scopus, Q3) URL: https://nvngu.in.ua/index.php/en/component/jdownloads/summary/69-04/8688-04-2017-lukianchuk (*0,3 а.а.; особистий внесок: виконано порівняльну оцінку різних підходів до обґрунтування основних параметрів глибокорозпушувачів, 0,2 а.а.*).

7. **Lukianchuk O. P.** etc. Necessity and possible approaches to applying deep loosening when cultivating rice / O. P. Lukianchuk, V. O. Turcheniuk, N. V. Prykhodko, P. P. Volk, A. M. Rokochinskiy. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57(1). Pp. 199–206. (Scopus, Q3) URL: https://www.researchgate.net/publication/333201525_Necessity_and_possible_approaches_to_applying_deep_loosening_when_cultivating_rice *(0,4 а.а.; особистий внесок: опрацьовані показники ефективності застосування різних технологій глибокого розпушення, 0,3 а.а.).*

8. **Lukyanchuk O.** Experimental Determination of the Relationship between Soil Structure Parameters and Indicators of Water Saturation and Filtration. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. 2023. Vol. 70. Pp. 89–100. (Scopus, Q4) DOI: https://doi.org/10.2478/heem-2023-0006 *(0,5 а.а.).*

9. Kravets S. V., **Lukianchuk O. P.**, Kosiak O. V., Gaponov O. O. Determination of critical depth of cutting soil by cutters with building excavators. *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations.* Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 73. Pp. 631–640. (Scopus, Q4). DOI: 10.1007/978-3-030-42939-3_62. (*0,5 а.а.; особистий внесок: виконано обґрунтування параметрів розробки ґрунту в напівблокованих умовах, 0,3 а.а.*).

10. Mazhayskiy Yu., Rokochynskiy A., **Lukianchuk O.**, Turcheniuk V., Volk P., Chernikova O. Deep loosening as effective adaptive agromeliorative practice on drained mineral soil of European Polesie in variable climatic conditions. *Engineering for rural development :* 19th International Scientific Conference, Jelgava 20–22.05.2020. Pp. 28–35. (Scopus). DOI: 10.22616/ERDev2020.19.TF009 *(0,3 а.а.; особистий внесок: виконано оцінювання показників макроструктури ґрунту після розпушення, 0,2 а.а.).*

11. Mazhayskiy Y., Rokochynskiy A., **Lukianchuk O.**, Volk P., Turcheniuk V., Chernikova O. Research of energy capacity of structural comminution in deep loosing of sandy and loamy soil. *Engineering for rural development :* 20th International Scientific Conference. Vol. 20. Pp. 57–62. (Scopus). DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF013 (*0,3 а.а.*; *особистий внесок: виконано оцінку енергоємності процесу розпушення ґрунту, 0,2 а.а.*).

12. **Lukianchuk O. P.,** Rokochynskiy A. M., Volk L. R., Volk P. P., Kovalchuk N. S. The influence of deep loosening on the ecological and meliorational state of drained mineral soils / Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP *Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254(1), 012106. (Scopus) DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012106 *(0,4 а.а.; особистий внесок: виконано оцінювання впливу глибокого розпушення на еколого-меліоративний стан осушуваних мінеральних ґрунтів за комплексом показників, 0,2 а.а.).*

13. **Lukyanchuk O.,** Turcheniuk V., Koptyuk R. Improvement Deep Loosening as an Effective Adaptive Agromeliorative Practice. Improving the Natural and Ecological Conditions of the Polesie Zone : Handbook of Research / Anatoliy Rokochynskiy, Lyudmyla Kuzmych, Pavlo Volk, et al. IGI Global, 2023. Pp. 222–242. (Scopus) DOI: 10.4018/978-1-6684-8248-3 *(0,9 а.а.; особистий внесок: обґрунтовано застосування глибокого меліоративного розпушення як адаптивного заходу, 0,7 а.а.)*.

14. **Lukyanchuk O.** Energy Intensity of Structural Grinding of the Soil by Deep Loosening. Improving the Natural and Ecological Conditions of the Polesie Zone : Handbook of Research / Anatoliy Rokochynskiy, Lyudmyla Kuzmych, Pavlo Volk, et al. IGI Global, 2023. Pp. 243–257. (Scopus) DOI: 10.4018/978-1-6684-8248-3 *(0,7 а.а.).*

Публікації у фахових виданнях України:

15. Ткачук В. Ф., **Лук'янчук О. П.,** Форсюк С. П., Музичук І. М. Визначення нормальних і тангенціальних напружень при згині анізотропних матеріалів. *Вісник НУВГП :* зб. наук. праць. 2006. Вип. 2 (34). Ч. 2. С. 145–150. *(0,3 а.а.; особистий внесок: розроблено і опрацьовано математичну модель зміни напружень при згині ґрунтової скиби, 0,2 а.а.).*

16. Ткачук В. Ф., **Лук'янчук О. П.**, Рижий О. П. Методика визначення основних параметрів ярусних глибокорозпушувачів. *Вісник НУВГП :* зб. наук. праць. 2006. Вип. 2 (34). Ч. 2. С. 151–160. *(0,5 а.а.; особистий внесок: здійснено аналіз вагомості впливу параметрів робочого процесу на параметри конструкції глибокорозпушувачів, 0,3 а.а.).*

17. Ткачук В. Ф., **Лук'янчук О. П.**, Форсюк С. П. Про деякі закономірності руйнування анізотропних матеріалів згином. *Вісник НУВГП :* зб. наук. праць. 2007. Вип. 3 (39). Ч. 2. С. 252–257. *(0,3 а.а.; особистий внесок: розроблено математичну модель закономірності подрібнення ґрунтової скиби, 0,2 а.а.).*

18. Ткачук В. Ф., **Лук'янчук О. П.**, Мельник А. В. Дослідження моделі подрібнення ґрунтової скиби на кривизні робочих поверхонь ґрунторозпушувача. *Вісник НУВГП :* зб. наук. праць. 2008. Вип. 2 (42). Ч. 1. С. 374–380. URL: https://scholar.google.com/scholar?cluster=14738341183936451 58&hl=en&oi=scholarr *(0,3 а.а.; особистий внесок: визначено та проаналізовано показники структурного подрібнення ґрунтової скиби, 0,2 а.а.).*

19. Кравець С. В., **Лук'янчук О. П.**, Романовський О. Л., Косяк О. В. Визначення зусилля деформування ґрунту багатоярусними робочими органами. *Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних і дорожніх машин :* зб. наук. праць. Дніпропетровськ : ПДАБА, 2010. Вип. 57. С. 61–68. URL: http://smm.pgasa.dp.ua/article/view/140870 *(0,3 а.а.; особистий внесок: проаналізовано закономірності зміни щільності ґрунту в процесі його пошарової розробки, 0,2 а.а.).*

20. Кравець С. В., **Лук'янчук О. П.**, Савін Р. М. Вплив швидкості на процес глибокого різання ґрунтів. *Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних і дорожніх машин :* зб. наук. праць. Дніпропетровськ : ПДАБА, 2010. Вип. 57. С. 51–57. URL: http://smm.pgasa.dp.ua/article/view/66906 *(0,3 а.а.; особистий внесок: проаналізовано вплив швидкості на процес глибокого різання ґрунтів, 0,1 а.а.).*

21. Кравець С. В., **Лук'янчук О. П.**, Косяк О. В. Визначення оптимальної форми і динамічного опору розсікача ґрунтового потоку. *Вісник НУВГП :* зб. наук. праць. 2010. Вип. 1 (49). С. 94–99. *(0,3 а.а.; особистий внесок: визначено та проаналізовано вплив форми поперечного перерізу вертикального грунторозсікача на його динамічний опір, 0,1 а.а.).*

22. **Лук'янчук О. П.** Аналіз критеріїв якості та енергоємності структурного розпушення ґрунтів. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2013. Вип. 1 (61). С. 172–182. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/1042 *(0,5 а.а.).*

23. Кравець С. В., **Лук'янчук О. П.,** Косяк О. В. Удосконалення принципу створення землерийно-ярусних машин. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.* 2013. Вип. 57. С. 30–35. URL: https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/322?mode=full *(0,3 а.а.; особистий внесок: проаналізовано недоліки конструкцій існуючих багатоярусних робочих органів з точки зору енергоємності процесу, 0,1 а.а.).*

24. Кравець С. В., **Лук'янчук О. П.** Аналіз математичної моделі впливу швидкості на процес глибокого різання ґрунтів. *Будівництво.*

Матеріалознавство. Машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних і дорожніх машин : зб. наук. праць. Дніпропетровськ : ДВУЗ ПДАБА, 2018. Вип. 103. С. 62–68. URL: http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/7695 *(0,3 а.а.; особистий внесок: розроблено апроксимаційні моделі впливу швидкості на процес глибокого різання ґрунтів, 0,2 а.а.).*

25. **Лук'янчук О. П.** Моделювання структури розпушеного ґрунту після дії криволінійним робочим елементом ярусного глибокорозпушувача. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2019. Вип. 2 (86). С. 225–238. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/16625 *(0,6 а.а.).*

26. Кравець С. В., **Лук'янчук О. П.**, Хомич А. В. Вплив конструктивних параметрів двоярусного критичноглибинного розпушувача на зусилля опору різання ґрунту. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2020. Вип. 1 (89). С. 177–189. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/19309 *(0,6 а.а.; особистий внесок: проаналізовано аналітичні моделі зміни сил опору різання ґрунту двоярусного критичноглибинного розпушувача, 0,3 а.а.).*

27. **Лук'янчук О. П.** Аналіз тягового опору багатоярусного глибокорозпушувача при різній компоновці. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2021. Вип. 1 (93). С. 158–167. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/22648 *(0,5 а.а.)*.

28. **Лук'янчук О. П.,** Рокочинський А. М. Вдосконалення технологій і технічних засобів глибокого розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів на основі системної методології. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2022. Вип. 2 (98). С. 92–109. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/24919. *(0,8 а.а.; особистий внесок: обґрунтовано науково-методичні підходи до удосконалення технологій та технічних засобів глибокого розпушення мінеральних ґрунтів, 0,5 а.а.).*

29. **Лук'янчук О. П.**, Рокочинський А. М. Теоретичні передумови удосконалення глибокого розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів за критерієм енергоефективності *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2022. Вип. 3 (99). С. 3–13. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/25729 *(0,5 а.а.; особистий внесок: формалізовано і проаналізовано складові ланцюга енергетичних перетворень від робочих органів глибокорозпушувача до приросту врожаю, 0,3 а.а.).*

30. **Лук'янчук О. П.,** Рокочинський А. М., Волк П. П., Коптюк Р. М. Порівняльне оцінювання різних технологій глибокого розпушення на осушуваних мінеральних ґрунтах Західного Полісся України. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2022. Вип. 4 (100). С. 13–33. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/25841 *(0,9 а.а.; особистий внесок: опрацьовані показники ефективності різних технологій глибокого розпушення на осушуваних мінеральних ґрунтах, 0,5 а.а.).*

31. **Лук'янчук О. П.,** Степанюк Б. І. Визначення раціонального компонування грунторозробного обладнання за побудою 3d-моделей елементів тіл сколу ґрунту. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2024. Вип. 1 (105). С. 3–17. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/31525 *(0,7 а.а.; особистий внесок: обґрунтовано*

залежності для опору переміщення ґрунторозпушувача, 0,4 а.а.).

32. **Лук'янчук О. П.,** Степанюк Б. І., Форсюк С. Л. Експериментальне дослідження зміни зусилля різання залежно від умов розробки ґрунту. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки.* 2024. Вип. 2 (106). С. 3–13. URL: http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/32394 *(0,5 а.а.; особистий внесок: здійснено планування експерименту та обґрунтовано фактори, 0,2 а.а.).*

Публікації апробаційного характеру:

33. **Лук'янчук О. П.** Робочий орган для глибокого диференційованого оструктурення ґрунту. *Матеріали XVIII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*, 29–30 жовтня 2014 р., Тернопіль, 2014. С. 40–41. URL: https://drive.google.com/file/d/1KFwXZm3zixaOSknepboh0ZKAKxOeN7Vn/view?usp=sharing *(0,1 а.а.).*

34. Турченюк В. О., Рокочинський А. М., **Лук'янчук О. П.** Щодо можливості застосування глибокого розпушення при вирощуванні рису. *Природа для води* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів, 22 березня 2018 р., Київ, 2018. С. 217–220. URL: https://drive.google.com/file/d/1iB8-1JN6jCgDzogXBZF82d7fssdFrohm/view *(0,2 а.а.; особистий внесок: опрацьовано моделі та показники застосування глибокого розпушення на зрошувальних ґрунтах, 0,1 а.а.).*

35. **Лук'янчук О. П.,** Волк П. П., Рокочинський А. М. Необхідність та можливі підходи до удосконалення засобів глибокого розпушення меліорованих ґрунтів у змінних кліматичних умовах. *East–West :* The Third International scientific congress of scientists of Europe‖. Proceedings of the III International Scientific Forum of Scientists (January 11, 2019). Premier Publishing s.r.o. Vienna, Austria. 2019. Pp. 477–453. ISBN 978-3-903197-91-6. URL: https://drive.google.com/file/d/1ThPXypw-KTkI5JnO-DP56OsHcYQvN1pv/view?usp=drive_link *(0,3 а.а.; особистий внесок: обґрунтовано критерії системного підходу до удосконалення глибокого розпушення, 0,1 а.а.).*

36. Волк П. П., Рокочинський А. М., **Лук'янчук О. П.** Шляхи підвищення ефективності використання осушуваних земель зони Полісся з урахуванням змін клімату. *Вода для всіх :* матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів, 21 березня, Київ, 2019. С. 144–145. URL: https://igim.org.ua/2019/03/22/міжнародна-науково-практична-конфер-8/ *(0,1 а.а.; особистий внесок: опрацьовано показники ефективності глибокого розпушення як адаптивного заходу, 0,05 а.а.).*

37. Волк П. П., **Лук'янчук О. П.**, Рокочинський А. М. Підвищення ефективності функціонування дренажних систем у змінних кліматичних умовах за рахунок розпушення ґрунту. *Водні екосистеми у контексті євроінтеграції: реалії та перспективи* : матеріали міжнародної наук.-практ. конф. приуроченої до всесвітнього дня водних ресурсів, 21–22 березня 2019 р. Житомир : ЖНАЕУ, 2019. С. 61–64. URL: https://drive.google.com/file/d/1oP2jAYxS3yjms11BXBRbiyCJeG2t56tQ/view?usp=drive_link *(0,2 а.а.; особистий внесок: опрацьовано показники впливу різних*

технологій глибокого розпушення на функціонування дренажних систем, 0,05 а.а.).

38. **Lukianchuk O. P.**, Volk P. P., Rokochinskiy A. M., Ermolin A. Advanced deep loosening work equipment to improve rice fields. *Perspectives of science and education :* The 13th International youth conference, November 22, 2019. SLOVO\WORD, New York, USA. 2019. Pp. 85–94. ISBN 978-1-77192-403-0. URL: https://drive.google.com/file/d/1U_Wq1d3R2Exli3VfF4uVn_tEBdhCzShW/view?usp=sharing *(0,4 а.а.; особистий внесок: опрацьовано ефективність глибокого розпушення на зрошувальних ґрунтах, 0,2 а.а.).*

39. Рокочинський А. М., Турченюк В. О., Волк П. П., **Лук'янчук О. П.** Нові енергоощадні технології та засоби глибокого розпушення для ефективного використання зрошуваних ґрунтів в умовах змін клімату. *Наукове забезпечення та практичний досвід ґрунтозберігаючого землеробства* : зб. матеріалів засідання Круглого столу, присвяченого Всесвітньому дню ґрунтів. Херсон : ІЗЗ НААН, 2020. С. 84–86. URL: https://drive.google.com/file/d/1BDX6Dv4S1C47g16GozF1Nimq_TmXdY7X/view?usp=sharing *(0,1 а.а.; особистий внесок: обґрунтовано принципи удосконалення глибокого розпушення в умовах змін клімату, 0,05 а.а.).*

40. Кравець С. В., **Лук'янчук О. П.**, Хомич А. В. Конструкція та параметри двоярусного критичноглибинного розпушувача. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь :* VI Всеукраїнська науково-практична конференція : зб. тез. Житомир, 2020. С. 119–122. URL: https://zhatk.zt.ua/wp-content/uploads/2023/03/zbirnik-tez-zhitomir-2020.pdf *(0,1 а.а.; особистий внесок: опрацьовано аналітичні моделі тягового опору глибокорозпушувача, 0,05 а.а.).*

41. **Lukianchuk O.**, Rokochinskiy A., Gritsevich M. Applying deep loosening to improve rice fields. *Topical aspects of modern science and practice :* The I th International scientific and practical conference (September 21–24, 2020). Frankfurt am Main, Germany, 2020. Pp. 362–365. URL: https://isg-konf.com/topical-aspects-of-modern-science-and-practice-en/ *(0,2 а.а.; особистий внесок: обґрунтовано параметри глибокого розпушення на зрошувальних ґрунтах, 0,1 а.а.).*

42. **Лук'янчук О. П.**, Рокочинський А. М. Адаптивні заходи для раціонального використання водних ресурсів продуктивних земель в змінюваних природніх умовах. *Стратегічні пріоритети розвитку науки, освіти та суспільства :* зб. тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Полтава, 22 червня 2022 р.) : у 2 ч. Полтава : ЦФЕНД, 2022. Ч. 2. С. 18–19. URL: https://www.economics.in.ua/2022/07/2.html *(0,1 а.а.; особистий внесок: опрацьовано вагомість впливових факторів агромеліоративного заходу, 0,05 а.а.).*

43. **Лук'янчук О. П.**, Рокочинський А. М. Адаптивний агромеліоративний захід для осушуваних мінеральних ґрунтів у змінюваних кліматичних умовах. *Євроінтеграція екологічної політики України :* матеріали Четвертої Всеукраїнської науково-практичної конференції. Одеса : Одеський державний екологічний університет, 2022. С. 321–324. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/10913/1/Збірник%20матеріалів%20конф

еренції%20Екополітика%202022.pdf *(0,2 а.а.; особистий внесок: обґрунтовано застосування глибокого розпушення як основи адаптивного заходу, 0,1 а.а.).*

44. **Лук'янчук О. П.**, Рокочинський А. М. Ефективність удосконаленого глибокого розпушення мінеральних ґрунтів як адаптивного агромеліоративного заходу у змінюваних природніх умовах. *Інновації: теорія і практика :* матеріали III Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції. Кропивницький : Академія Прикладних Наук, 2022. С. 66–68. URL: https://apn.biz.ua/publication/51 *(0,1 а.а.; особистий внесок: опрацьовано показники ефективності глибокого розпушення у змінюваних природніх умовах, 0,05 а.а.).*

45. **Лук'янчук О.,** Гнатишин М. Енергоємність подрібнення при розробці супіщаних і суглинистих ґрунтів. *Інновації: теорія і практика :* матеріали III Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції. Кропивницький : Академія Прикладних Наук, 2022. С. 111–113. URL: https://apn.biz.ua/publication/82 *(0,1 а.а.; особистий внесок: опрацьовано показники енергоємності подрібнення ґрунту при його розпушенні, 0,05 а.а.).*

46. **Лук'янчук О. П.** Моделювання структури розпушеного ґрунту для акумуляції та фільтрації ґрунтового стоку. *Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії :* зб. наук. праць. Херсон : ХДАЕУ, 2022. Вип. 4. С. 52–57. URL: https://drive.google.com/file/d/1s-CbBe3AptBf7kVNk93nRn992c7hgzZs/view?usp=drive_link *(0,3 а.а.).*

47. **Лук'янчук О. П.,** Гапонюк М. М., Кузьмич А. А., Волк П. П., Коптюк Р. М., Рокочинський А. М. Удосконалення технологій водорегулювання осушуваних мінеральних ґрунтів. *Прискорення змін для подолання водної кризи в Україні :* зб. тез XI міжнародної науково-практичної онлайн-конференції, присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів, 22 березня 2023 р. Київ : Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2023. С. 83–84. URL: https://doi.org/10.31073/mivg2023. *(0,1 а.а.; особистий внесок: розкрито підходи до удосконалення технологій глибокого розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів, 0,05 а.а.).*

48. **Лук'янчук О.** Шляхи підвищення енергоефективності глибокого розпушення ґрунту за формалізацією перетворень його складових. *ІННОВАЦІЇ: теорія і практика :* матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Кропивницький : Академія Прикладних Наук, 2023. С. 22–23. URL: https://apn.biz.ua/publication/125 *(0,1 а.а.).*

49. Приходько Н. В., Ричко Д. М., **Лук'янчук О. П.,** Волк Л. Р., Волк П. П., Рокочинський А. М. Покращення вологозабезпеченості меліорованих угідь у змінюваних кліматичних умовах на основі підвищення вологоакумуляційної здатності ґрунту. *Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії* : зб. наук. праць. Кропивницький-Херсон : ХДАЕУ, 2024. Вип. 6. 174 с. С. 121–127. URL: https://www.ksau.kherson.ua/files/konferencii/2024/06/mater_04_06_24.pdf *(0,3 а.а.; особистий внесок: опрацьовані моделі зміни показників вологозабезпеченості при розпушенні осушуваних мінеральних ґрунтів, 0,1 а.а.).*

50. **Лук'янчук О. П.,** Рокочинський А. М., Волк П. П. Принципи адаптивного

вдосконалення глибокого меліоративного розпушення мінеральних ґрунтів з регульованим водним режимом. *Управління та моніторинг ґрунтів: сучасні вимірювання та постводнє відновлення* : зб. матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченій Всесвітньому Дню ґрунту 2024 (World Soil Day 2024), 4 грудня 2024 року. Одеса : ІКОСГ НААН, 2024. С. 82–86. URL: https://icsanaas.com.ua/wp-content/uploads/2025/02/Збірник-матеріалів-конференції-04-грудня-2024-року.pdf *(0,2 а.а.; особистий внесок: обґрунтовано принципи удосконалення технологій глибокого розпушення мінеральних ґрунтів з регульованим водним режимом, 0,1 а.а.)*.

Патенти на винаходи та корисні моделі:

51. Глибокорозпушувач: пат. 150082 Україна: МПК A01B 13/08, A01B 13/14. № u202104357; заявл. 26.07.21; опубл. 29.12.21, Бюл. № 52. 4 с. *(Лук'янчук О. П., Рокочинський А. М., Волк П. П.).*
52. Спосіб глибокого розпушення ґрунту: пат. 150485 Україна: МПК A01B 79/00, A01B 13/14, A01B 49/02. № u202105250; заявл. 16.09.21; опубл. 23.02.22, Бюл. № 8. 4 с. *(Лук'янчук О. П., Рокочинський А. М., Волк П. П.).*
53. Спосіб регулювання водного режиму осушуваних мінеральних ґрунтів: пат. 154112 Україна: МПК E02B11/00, A01B13/14. № u202301213; заявл. 23.03.23; опубл. 11.10.23, Бюл. № 41. 4 с. *(Рокочинський А. М., Волк П. П., Гапонюк М. М., Лук'янчук О. П., Волк Л. Р., Коптюк Р. М., Приходько Н. В., Кузьмич А. А.).*
54. Ґрунторозпушувач: пат. 157731 Україна: МПК A01B13/08, A01B13/14. № u202401060; заявл. 28.02.24; опубл. 20.11.24, Бюл. № 47. 4 с. *(Лук'янчук О. П.).*

АНОТАЦІЯ

Лук'янчук О. П. Науково-практичні засади вдосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 06.01.02 – сільськогосподарські меліорації (технічні науки) – Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуальної науково-практичної проблеми з удосконалення технологій та технічних засобів глибокого меліоративного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів за енергоефективними та вологорегулюючими принципами як адаптивного агромеліоративного заходу щодо сучасних змінюваних умов та вимог для підвищення їх вологозабезпеченості та поліпшення еколого-меліоративного стану на основі системного розгляду енергетичного взаємозв'язку між параметрами різнорідних за природою структурних елементів підсистем меліоративної системи як складної природно-технічної еколого-економічної системи.

Обґрунтовано доцільність переходу від традиційних технологій щілинного та смугового розпушення до суцільного, диференційованого за профілем і глибиною, пошарового енергоефективного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів, що дає змогу на основі вертикально-горизонтальної переорієнтації низхідних водних потоків шляхом збільшення акумуляційної здатності активного кореневмісного шару ґрунту внаслідок зміни його макроагрегатного стану і водно-фізичних властивостей вплинути на формування водно-повітряного режиму та досягти підвищення ефективності вологорегулювання в різні за умовами тепло- і вологозабезпеченості періоди вегетації зменшенням кількості відведення надлишкової вологи та навантаження на дренаж у вологі періоди, а також підвищенням його вологозабезпеченості у посушливі, що забезпечує зростання врожайності вирощуваних агрокультур та сприятливий еколого-меліоративний стан осушуваного масиву.

Впровадження удосконалених за енергоефективними та вологорегулюючими принципами технологій і технічних засобів глибокого меліоративного розпушення дасть змогу покращити еколого-меліоративний стан осушуваних мінеральних ґрунтів, в 6–10 разів зменшити питому енергоємність робочого процесу розпушення ґрунту, на 6–50% підвищити вологоакумулюючу здатність ґрунту, в середньому на 27% збільшити його вологозабезпеченість, і, як наслідок, підвищити врожайність вирощуваних культур на 20–30% з терміном післядії до 4 років.

Ключові слова: глибоке меліоративне розпушення, вологозабезпеченість, енергоефективність, технологія, технічні засоби.

ANNOTATION

Lukyanchuk O. P. Scientific and practical principles of improving technologies and technical means of deep reclamation loosening of drained mineral soils. – Manuscript.

Dissertation is presented for the scientific degree of Doctor of Engineering Sciences on specialty 06.01.02 – Agricultural Melioration (Engineering Sciences). National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, 2025.

The dissertation work is devoted to solving the current scientific and practical problem of improving technologies and technical means of deep reclamation loosening of drained mineral soils according to energy-efficient and moisture-regulating principles as an adaptive agro-reclamation measure in relation to modern changing conditions and requirements for increasing their moisture supply and improving the ecologically and reclaimed state based on a systematic consideration of the energy relationship between the parameters of structural elements of subsystems of the reclamation system that are heterogeneous in nature as a complex natural-technical, ecological and economic system.

The current state of draining mineral soils was analyzed and researched, the need, principles and ways to improve deep reclamation loosening were substantiated to improve the ecologically reclaimed state of soils and regulate their water regime.

The feasibility of transitioning from traditional technologies of slot and strip loosening to continuous, differentiated by profile and depth, layer-by-layer energy-efficient loosening of drained mineral soils is substantiated, which allows, based on

the vertical-horizontal reorientation of descending water flows by increasing the accumulation capacity of the active root-containing layer of soil due to changes in its macroaggregate state and water-physical properties, to influence the formation of the water-air regime and achieve increased efficiency of moisture regulation in different periods of vegetation in terms of heat and moisture supply by reducing the amount of excess moisture removal and the load on the drainage in wet periods, as well as increasing its moisture supply in dry periods, which ensures an increase in the yield of cultivated crops and a favorable ecological and reclamation state of the drained massif.

Moisture-regulating principles for improving technologies for deep reclamation loosening of mineral soils with a regulated water regime have been developed based on the reorientation of water flows in the soil massif to vertical-horizontal with moisture accumulation in the loosened soil to increase its moisture supply.

Energy-efficient principles for improving passive technical means of deep reclamation loosening have been developed based on horizontal layer-by-layer differentiation of technogenic energy flows with alternate horizontal subcritical-depth unblocked development of individual soil layers with gradual two-sided loosening of the soil macroaggregate structure by bending and stretching by working bodies.

The method of substantiating the technological parameters of deep land reclamation loosening has been improved with respect to the transition, in contrast to the traditional one, to continuous in profile and area but differentiated in depth layer-by-layer macroaggregate loosening of soil layers, taking into account their (fine, medium or coarse) lumpy structure and water-physical properties.

The method of substantiating the design parameters of passive technical means of deep land reclamation loosening has been improved in terms of the use, in contrast to the most common traditional passive technical means, of a tiered-wedge spatial configuration of working equipment and the calculation of working bodies taking into account the shape and layering of the loosening profile, water-physical properties, speed of movement and relative depth of loosening separately in each soil layer.

The introduction of technologies and technical means of deep loosening improved according to energy-efficient and moisture-regulating principles will make it possible to improve the ecologically improved condition of drained mineral soils, to reduce the specific energy intensity of the work process of soil loosening by 6–10 times, to increase the moisture-accumulating capacity of the soil by 6–50%, by 27% to increase its moisture availability, and, as a result, to increase the yield of cultivated crops by 20–40% with an aftereffect period of up to 4 years. Advanced technologies of continuous deep loosening are a cost-effective and investment-friendly adaptive measure with a payback of 1 year, which corresponds to modern principles of adaptive land use in changing climatic conditions and can be an effective alternative to expensive reconstruction and modernization of existing drainage systems.

Keywords: deep reclamation loosening, moisture supply, energy efficiency, technology, technical means.