

Лук'янчук О. П., к.т.н., доцент, Рокочинський А. М., д.т.н., професор, Волк П. П., д.т.н., доцент, Коптюк Р. М., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, o.p.lukyanchuk@nuwm.edu.ua)

ПОРІВНЯЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ГЛИБОКОГО РОЗПУШЕННЯ НА ОСУШУВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ҐРУНТАХ ЗАХІДНОГО ПОЛІССЯ УКРАЇНИ

Наявні виклики сучасності щодо енергетичної, водної та продовольчої криз, а також кліматичних змін визначають необхідність впровадження відповідних адаптивних заходів щодо підвищення рівня агровиробництва. Для застосування глибокого розпушення як адаптивного агрономеліоративного заходу щодо сучасних умов та вимог, запропоновано перехід від традиційних щільного та смугового розпушення до удосконалених за енергоефективними та вологорегулюючими принципами технологій суцільного пошарового розпушення ґрунту. Їх порівняльне оцінювання за основними показниками загальної ефективності було проведено на осушуваних мінеральних ґрунтах репрезентативного об'єкта в зоні Західного Полісся України. 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 та на 27% його вологозабезпеченість, на 20–30% підвищилася врожайність вирощуваних культур, а термін післядії зріс до 4 років. Удосконалені технології суцільного глибокого розпушення є рентабельним та інвестиційно вигідним адаптивним 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.

Ключові слова: оцінювання; технологія; технічні засоби; глибоке розпушення; осушуваний ґрунт.

Постановка проблеми. Наявні виклики сучасності щодо енергетичної, водної та продовольчої криз, а також кліматичних змін визначають необхідність впровадження відповідних адаптивних заходів щодо підвищення рівня агровиробництва.

Значна кількість продукції вирощується на землях з регульованим водним режимом. У зоні осушувальних меліорацій це можливо на підставі розробки комплексу адаптивних, в тому числі агромеліоративних заходів, спрямованих на ефективне регулювання водного режиму, зарегулювання і акумуляцію вологи в ґрунтовому профілі й в межах системи тощо [1].

Їх зміна повинна бути направлена на поліпшення водно-фізичних властивостей і акумулюючої здатності осушуваних ґрунтів на підставі удосконалення технологій і засобів глибокого розпушення ґрунтів за енергоефективними та ресурсозберігаючими принципами, що дасть змогу ефективно акумулювати вологу в ґрунтовому профілі і на осушуваному масиві в цілому, підвищити його вологозабезпеченість [1].

Актуальність досліджень, спрямованих на вдосконалення водорегулювання меліоративних об'єктів при дотриманні сприятливого водно-повітряного і поживного режимів осушуваних ґрунтів, економічних та екологічних вимог підтверджується положеннями Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року, адже глобальні та регіональні кліматичні зміни істотно вплинули на умови водозабезпечення України [2].

Глибоке розпушення є одним з традиційних і найбільш перспективних агромеліоративних заходів, яке відіграє важливу роль при регулюванні водно-повітряного режиму осушуваних мінеральних ґрунтів, оскільки їх водно-фізичні властивості і після дренажу часто залишаються 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 [1; 3].

Пряме застосування традиційного глибокого розпушення як ефективного адаптивного заходу в змінюваних природних умовах стримувалося недосконалістю існуючих технологій і засобів, які вже не забезпечували необхідну ефективність розпушення та відповідні змінюваним природним умовам водно-фізичні властивості

осушуваних мінеральних ґрунтів, а тому потребували внесення технологічних змін та конструктивного удосконалення [1; 3].

Аналіз попередніх досліджень. Для зменшення та усунення супутніх негативних наслідків осушення багато дослідників наголошує на необхідності суміщати влаштування дренажу з агроеліоративними заходами, спрямованими на покращення його макроструктури та водно-фізичних властивостей, збільшення акумуляційної здатності активного шару ґрунту тощо (С. Т. Вознюк, М. О. Клименко, В. Р. Гімбаржевський та ін.).

Позитивні аспекти застосування глибокого розпушення як ефективного агроеліоративного заходу на дерново-підзолистих оглеєних ґрунтах у Західному регіоні України показано в численних дослідженнях (С. М. Перехрест, І. Ф. Підпалій, В. С. Олійник, Д. А. Тютюнник, В. П. Кубишкін та ін.). При цьому відмічалася наявність негативних агроеліоративних та техногенних складових впливу на ґрунт технічними засобами для його здійснення [1; 3].

Деякі функціональні переваги застосування глибокого пошарового розпушення на перезволожених мінеральних ґрунтах за смуговою технологією були відмічені і в подальшому використанні Л. Ф. Кожушком на підставі розробок С. В. Кравця щодо безтраншейного багатоярусного укладача-розпушувача [4].

Залежно від гідрологічних, ґрунтових та інших умов традиційно розглядають і застосовують *суцільне, смугове або щільне розпушення (щілювання)* [1].

Суцільне розпушення – основний вид, направлений на розпушування всієї товщі ґрунту в оброблюваному шарі. Якщо з організаційних причин його неможливо виконати, то здійснюють смугове розпушення.

Смугове розпушення здійснюють вузькими роздільними смугами через 4–8 м. Нерозпушені ділянки служать своєрідною опорою для рушіїв тракторів під час наступних проходів, що підвищує тривалість ефективності розпушених смуг. В міру окультурення ґрунтів його доцільно застосовувати з подальшим переходом на суцільне глибоке меліоративне розпушування. На ділянках з великою кількістю «блюдець» на важких мінеральних ґрунтах смугове розпушення може доповнюватися кротуванням на глибині 0,7–0,75 м. Відстань між смугами тоді приймають рівною 2–2,5 м для глинистих і 3–4 м для суглинистих ґрунтів.

Щілювання – агромеліоративний захід, спрямований на руйнування ущільнених водотривких шарів підорних горизонтів до глибини 0,40–0,45 м, збільшення водопроникності та внутрішньогрунтового стоку за рахунок механічного утворення вертикальних щілин і тріщин на ширину 0,25–0,4 м.

Для глибокого розпушування застосовують досить прості в конструкції та надійні в роботі знаряддя, що включають раму зі встановленими на ній декількома розпушувальними або щілерізними робочими органами. Аграрні й агромеліоративні глибокорозпушувачі традиційної та сучасної конструкції являють собою стоякові або периметрові робочі елементи, які розпушують ґрунт на максимальну глибину в основному до 0,30–0,35 м – аграрні, і до 0,45–0,65 м – агромеліоративні [5].

Розпушування ґрунту периметровими глибокорозпушувачами здійснюється за рахунок різання в горизонтальній площині лемешем, у вертикальній площині – боковими ножами та за рахунок стиснення боковими стінками, після чого розпушений ґрунт під дією власної ваги осипається на дно нарізаної щілини. Конструкції глибокорозпушувачів такого типу дозволяють підвищити якість процесу розпушування, однак разом із цим зростає енергоємність розпушування за рахунок стиснення ґрунту між боковими ножами [6].

Глибокорозпушувачі цього типу мають невелику ширину захвату, а через додаткове стискання ґрунту боковими ножами збільшується сумарний опір різання ґрунту, що негативно впливає на енергоємність розпушування ґрунту. Через особливість конструкції глибокорозпушувач складно налаштувати для різних ґрунтових умов.

Стоякові глибокорозпушувачі вимагають значних затрат енергії при розпушуванні, оскільки при розпушуванні ґрунту на глибину 0,45–0,65 м ширина робочих елементів долота складає від 30 до 120 мм, з відповідною їм критичною глибиною різання – 0,1–0,5 м. Отже, ці глибокорозпушувачі частково працюють на закритичних глибинах, що суттєво збільшує їх енергоємність [6].

Традиційне глибоке розпушення осушуваних ґрунтів за щілинними чи смуговими технологіями застосовують лише як допоміжний захід для підвищення ефективності роботи дренажу із використанням глибокорозпушувачів переважно стоякового типу. При цьому фактично здійснюється тільки локальний вплив на

активну частину ґрунтового масиву (активний кореневмісний шар і зона аерації осушуваного ґрунту) з утворенням вертикальних фільтраційних каналів для інтенсифікації водовідведення поверхневого стоку. Це дійсно сприяє посиленню технологічного ефекту щодо дренажу, але одночасно з цим посилює і промивний водний режим у ґрунті, що з часом призводить до збіднення родючого шару і спричиняє негативний екологічний ефект.

Водночас конструкції традиційних глибокорозпушувачів виконують фактично досить грубе розпушення, яке не відповідає необхідній якості оструктурення ґрунтів відповідно до агротехнічних рекомендацій. Вони ущільнюють ґрунт стінок прорізуваних щілин, потребують при розпушенні значних енерговитрат, мають недостатню повноту розпушення та тривалість його післядії.

Отже, застосування глибокого розпушення як ефективного адаптивного заходу стримується недосконалістю існуючих технологій і засобів, які не забезпечують необхідну якість та ефективність розпушення відповідно до сучасних умов вимог, а тому потребують подальшого удосконалення [3]:

- 1) поліпшувати водно-фізичні властивості та макроструктуру ґрунту з дотриманням агротехнічних рекомендацій агропромисловості;
- 2) забезпечувати високу акумулюючу та сорбційну здатності ґрунту, підвищувати ефективність його водорегулювання;
- 3) забезпечувати тривалу післядію;
- 4) забезпечувати ресурсозбереження, високу економічну та енергетичну ефективність;
- 5) відповідати сучасним принципам адаптивного природокористування.

Тому для забезпечення реалізації необхідного удосконалення глибокого розпушення щодо сучасних умов та вимог пропонується *перехід від традиційних широкоживаних технологій щілинного та смугового розпушення до суцільного, удосконаленого за енергоефективними та вологорегулюючими принципами, диференційованого за глибиною пошарового глибокого розпушення ґрунту удосконаленими ярусними технічними засобами [7].*

Методика досліджень. Для порівняльного оцінювання ефективності застосування різних варіантів глибокого розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів на репрезентативному об'єкті для умов Західного Полісся України було здійснено експериментальні дослідження з використанням основних методів загальної теорії

експерименту (аналітичний, експериментальний та статистичний), математичне моделювання та машинний експеримент із використанням сучасних інформаційних та комп'ютерних технологій.

За отриманими експериментальними результатами було здійснено прогностичні розрахунки на основі використання відповідного комплексу прогностично-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 [3; 8].

Для наближеної оцінювання екологічної стійкості досліджуваних заходів, ступеня врахування факторів екологічної надійності їх функціонування, насамперед з точки зору підтримання сприятливих природно-меліоративних та ґрунтових режимів у межах проєктного терміну здійснювався розрахунок коефіцієнта екологічної надійності (k_n) функціонування меліоративної системи за сукупністю відповідних фізичних показників екологічної ефективності (показники водного режиму, показники сольового режиму та продуктивності осушуваних земель). Екологічно оптимальним варіантом вважається той, для якого коефіцієнт екологічної надійності знаходиться в інтервалі значень $k_n = 0,5-1,0$ [3; 8].

Результати досліджень. Здійснення суцільного глибокого розпушення з механічним переформатуванням макроагрегатного та гранулометричного складу ґрунтового масиву з його пошаровим розподілом згідно з агротехнічними рекомендаціями впливає на водно-фізичні властивості ґрунту і є визначальним для технологічних і фізичних передумов для створення сприятливих водно-повітряного та природно-меліоративного режимів, а отже, забезпечення необхідного економічного та екологічного ефектів [1].

При реалізації удосконалених технологій суцільне глибоке розпушення ґрунту проводять суцільним як по висоті профілю кожного шару, так і по площі поля, верхній шар розпушують до утворення середньо- та дрібногрудочкової структури у його верхній чверті і зернистої та дрібногрудочкової структури у нижніх трьох чвертях, а нижні шари розпушують до утворення крупно- та середньогрудочкової структури на глибину дещо меншу від глибини залягання дренажу.

Утворення зернистої та дрібногрудочкової структури дає можливість максимально ефективно використати

вологоакумуляючий потенціал ґрунту за рахунок утворення великої площі поверхні частинок ґрунту та малих проміжків між ними в зоні над плужною підшоєю, де потенційно розміщуються кореневі системи більшості сільськогосподарських культур.

Утворення крупно- та середньогрудочкової 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 середньогрудочкової 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 вологоакумуляюча структура, яка є відповідною до призначення кожного з них: з максимальним потенціалом вологоакумуляування у верхній частині та достатньою водопропускною спроможністю з одночасним акумулюванням деякої частини вологи у нижній частині ґрунтового профілю.

Через зміну макроструктури осушуваних мінеральних ґрунтів глибоке розпушення безпосередньо впливає на макроагрегатний стан ґрунтів, їх щільність і шпаруватість, а за тим, на їх водно-фізичні властивості, що відображається на умовах розвитку вирощуваних культур і їх урожайності [3].

У загальному випадку конструкція глибокорозпушувача для удосконаленого розпушення представляє собою раму з несучими стояками, на яких закріплені ґрунторозпушувальні робочі органи у вигляді спряження лемеша з увігнутих стріловидним ґрунторозпушувальним елементом змінної кривизни. Через форму і параметри поверхні цього елемента задається необхідна деформація, ступінь напруження, а отже, подрібнення розроблюваного шару ґрунту. Загальна компоновка глибокорозпушувача визначається просторовим рознесенням ґрунторозпушувальних робочих органів в трьох взаємно перпендикулярних напрямках (рис. 1) [5].

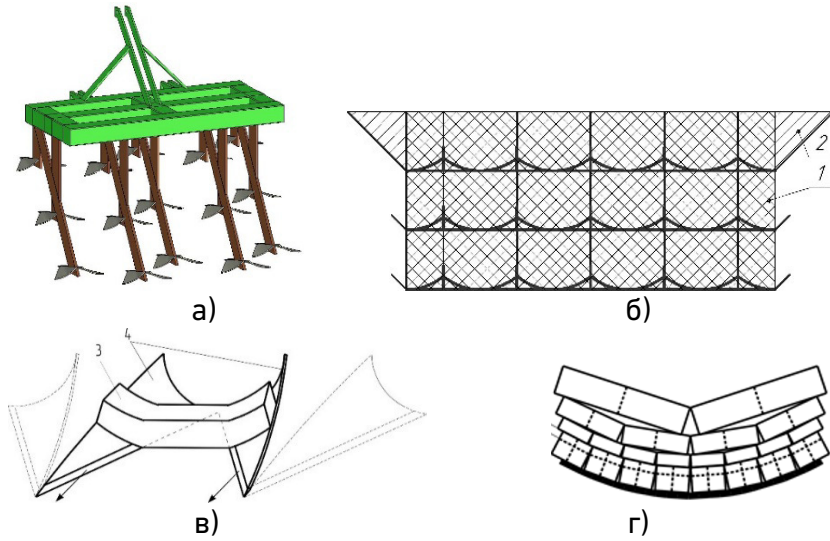


Рис. 1. Ярусний глибокорозпушувач:

- а) – конструкція, б) – повнота розпушення поперечного профілю;
в) – дія на елемент ґрунтової скиби, г) – принцип подрібнення ґрунту;
1 – структурне розпушення; 2 – розпушення сколом; 3 – ґрунтова скиба;
4 – робочі органи

Порівняльні польові виробничі випробування різних технологій та засобів глибокого розпушення було виконано на об'єкті ПСП «Мирне» Костопільського району Рівненської області на площі 25 га (рис. 2) [11].

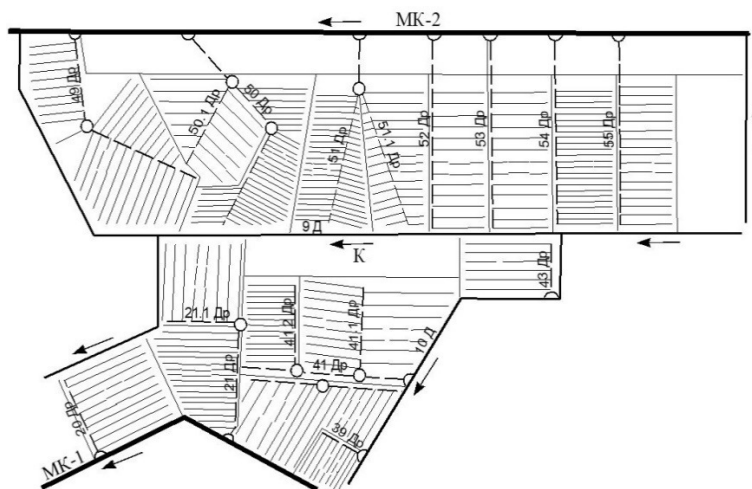


Рис. 2. Схема дослідної ділянки в ПСП «Мирне»: МК-1, МК-2 – магістральні канали; К – канал; Др – дрени

Ґрунтові умови: 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.

Вивчення впливу різних технологій (рис. 3) і засобів глибокого розпушення (рис. 4) на водно-фізичні властивості та агроеліоративний стан осушуваних мінеральних ґрунтів було вирішено шляхом проведення порівняльних виробничих випробувань за такими варіантами:

- 1 – щілинне розпушення;
- 2 – смугове розпушення;
- 3 – удосконалене суцільне розпушення;
- 4 – контрольний варіант без розпушення.

Показник якості розпушення визначався у вигляді коефіцієнта повноти розпушення, який для об'єктивності порівняльної оцінки за різними технологіями розпушення був приведений до об'єму ґрунту на масиві площею 1 га (100×100 м) потужністю 1 м.

Узагальнена порівняльна характеристика усереднених в часі (за терміном післядії) та просторі (за профілем ґрунту) значень основних показників водно-фізичних властивостей в шарі ґрунту 0,6 м за різними видами та варіантами його розпушення подані в табл. 1.

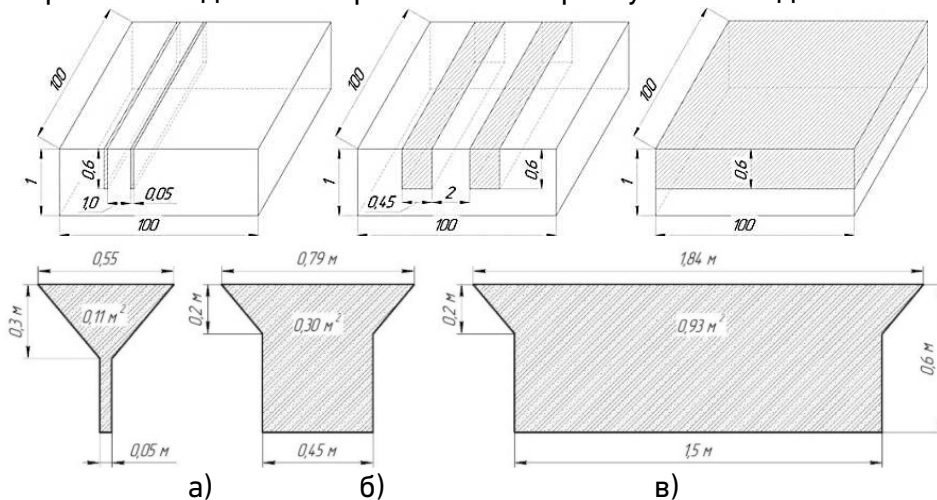


Рис. 3. Схеми розпушення ґрунту за площею (зверху) та профілем (знизу) на дослідній ділянці: а) щілинне розпушення; б) смугове розпушення; в) удосконалене суцільне розпушення

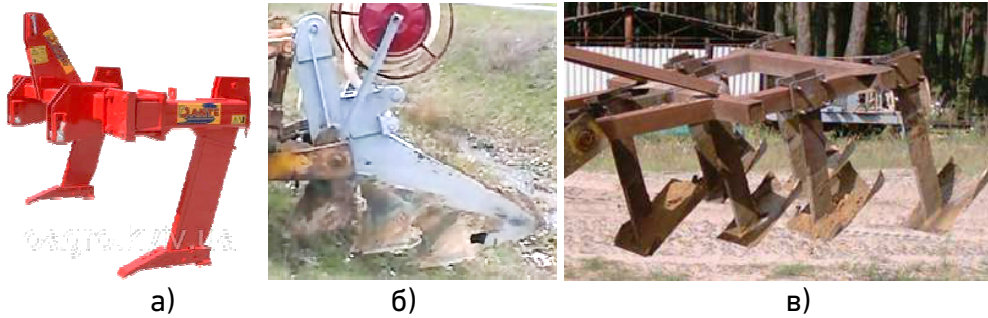


Рис. 4. Засоби глибокого розпушення: а) – двостояковий глибокорозпушувач (щілинне розпушення); б) – одностояковий ярусний глибокорозпушувач (смугове розпушення); в) – ярусний глибокорозпушувач (суцільне розпушення)

Таблиця 1

Порівняльна характеристика водно-фізичних властивостей шару ґрунту 0,6 м за варіантами розпушення

Показники Варіанти розпушення	Щільність (γ), т/м ³			Шпаруватість (A), %			Водопроникність (k_{ϕ}), м/добу		
	абс. знач.	відх. від контролю		абс. знач.	відх. від контролю		абс. знач.	відх. від контролю	
		т/м ³	%		т/м ³	%		т/м ³	%
Без розпушення	1,45	–	–	42,2	–	–	0,12	–	–
Щілинне	1,41	0,04	2,9	46,1	3,9	9,2	0,25	0,13	206
Смугове	1,32	0,13	8,9	47,3	5,1	12	0,36	0,24	296
Суцільне	1,15	0,30	21	54,9	12,7	30	0,53	0,41	443

Термін ефективної технологічної післядії розглянутих способів глибокого розпушення осушуваного мінерального ґрунту склав відповідно: щілинного – 1 рік; смугового – 3 роки, суцільного – до 4 років.

Узагальнену порівняльну характеристику усереднених значень основних агроеліоративних показників шару розпушеного ґрунту 0,6 м щодо зміни запасу продуктивної вологи та за найбільш універсальним показником продуктивності вирощуваних культур щодо варіантів його розпушення наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика основних агрометеорологічних показників шару ґрунту 0,6 м за варіантами розпушення

Показники Варіанти розпушення	Запас продуктивної вологи (Wh), м ³ /га			Продуктивність культур за ККД ФАР, %		
	абсолют. значення, м ³ /га	відхилення від контролю		абсолют. значення, %	відхилення від контролю	
		м ³ /га	%		%	%
Без розпушення (контроль)	316	–	–	0,80	–	–
Щільне	594	278	49,0	0,88	0,08	10,0
Смугове	655	339	51,0	0,99	0,19	24,0
Суцільне	711	395	55,5	1,16	0,36	45,0

Зведені результати застосування нової технології показують ефективність суцільного пошарового глибокого розпушення та представлені через графічні залежності отриманих експериментально фізичних, енергетичних та фільтраційних характеристик за коефіцієнтом повноти розпушення ґрунту R_c в досліджуваному масиві потужністю 0,6 м, (рис. 5).

Найкращі результати глибокого розпушення мінеральних ґрунтів досягнуті при застосуванні суцільного розпушення на основі використання багатоярусного глибокорозпушувача. При цьому щільність ґрунту в орному шарі зменшилась до 1,1–1,15 т/м³, у підорному – до 1,2–1,3 т/м³. Крім того, була доведена можливість прогнозувати і отримувати бажану структуру в будь-якому горизонті вертикального профілю розпушеного ґрунту внаслідок можливості регулювання параметрів робочого органу глибокорозпушувача. При цьому, на відміну від інших технологій, була досягнута оптимальна структура розпушеного ґрунту: в орному шарі 55–60% за масою ґрунтових агрегатів з розміром поперечника 10–50 мм і решта 40% – за сумарною масою агрегатів з поперечником меншим за 10 мм та більшим за 50 мм, а у підорному горизонті відповідно з поперечником 20–50 мм – 70–80%, та сумарно агрегатів з поперечниками меншими за 20 мм і більшими за 50 мм – 20–30%.

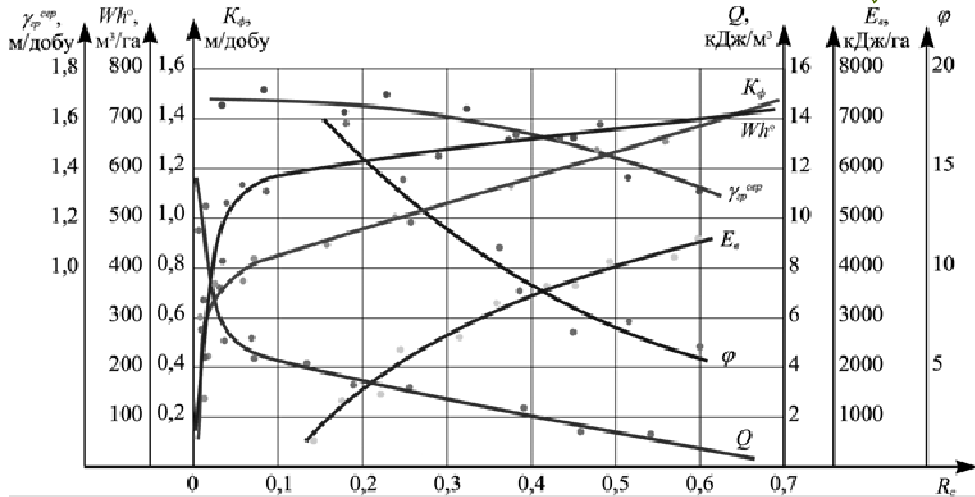


Рис. 5. Залежність фізичних, енергетичних та фільтраційних показників від коефіцієнта повноти розпушення ґрунту R_c в дослідному масиві потужністю 0,6 м: $\gamma_{gp}^{ср}$ – усереднена щільність ґрунту на дослідній ділянці в шарі ґрунту 0,6 м; E_e – інтегральний показник витрати енергії; Q – показник питомої витрати енергії на розпушення 1 м³; φ – коефіцієнт енергетичного еквіваленту (потенціалу) отриманої сільськогосподарської продукції; K_ϕ – коефіцієнт фільтрації; Wh° – максимальний запас продуктивної вологи активного шару ґрунту

За отриманими експериментальними результатами було здійснено прогностні розрахунки урожайності на основі використання відповідного комплексу прогностно-імітаційних моделей, що реалізуються на основі довгострокового прогнозу [1; 7].

Порівняльну характеристику прогностного врожаю вирощуваних сільськогосподарських культур проектної сівозміни на осушуваних мінеральних ґрунтах за варіантами їх глибокого розпушення з урахуванням умов тепло- й вологозабезпеченості розрахункових років наведено в табл. 3.

За результатами досліджень, глибоке розпушення також позитивно впливає на температурний режим ґрунту, особливо орного горизонту, де при підвищенні температури повітря максимальна температура в розпушеному ґрунті ставала на 0,1–0,5° С нижче ніж без розпушення.

Таблиця 3

Прогнозний врожай вирощуваних культур проєктної сівозміни за варіантами розпушення

№ з/п	Варіанти розпушення	Культури	Вид продукції	Урожай культур (ц/га) по розрахункових роках, р %					Прогнозний врожай, ц/га
				10	30	50	70	90	
1	Без розпушення (контроль)	Багаторічні трави	зелена маса	134,8	230,7	251,9	154,1	102,1	183,2
		Ярі зернові	зерно	12,9	22,0	30,1	27,8	18,6	23,6
		Озимі зернові	зерно	10,3	20,8	29,5	27,6	18,3	22,7
		Картопля	бульба	164,2	38,4	216,8	148,3	83,0	136,0
2	Щілинне	Багаторічні трави	зелена маса	151,7	255,2	261,5	177,8	116,7	201,1
		Ярі зернові	зерно	14,5	24,7	32,4	29,3	20,5	25,6
		Озимі зернові	зерно	11,6	23,4	31,8	28,5	20,2	24,5
		Картопля	бульба	184,7	42,4	233,9	156,7	91,8	147,6
3	Смугове	Багаторічні трави	зелена маса	168,6	287,5	280,2	217,9	142,6	228,7
		Ярі зернові	зерно	16,1	28,8	36,6	32,4	23,8	29,0
		Озимі зернові	зерно	12,9	27,2	35,9	31,6	23,6	27,8
		Картопля	бульба	205,2	50,2	227,7	185,9	110,8	160,8
4	Суцільне	Багаторічні трави	зелена маса	209,6	331,7	318	263,9	173,1	269,2
		Ярі зернові	зерно	22,2	33,4	42,5	35,4	26,2	33,4
		Озимі зернові	зерно	17,8	31,5	41,4	34,9	26,2	32,0
		Картопля	бульба	262,2	58,7	267,7	231,6	126,5	194,9

Під дією глибокого розпушення на 8–12 см зменшується глибина промерзання ґрунту, а навесні на 2–3 доби пришвидшується відтавання. Особливо це характерно для першого року післядії.

У тісному взаємозв'язку з температурним і водним режимом знаходиться випаровування вологи. Глибоке розпушення, порушуючи капілярний зв'язок у верхніх горизонтах, зменшує інтенсивність капілярного живлення й відповідно дещо зменшує її випаровування з поверхні ґрунту.

Згідно з [9], глибоке розпушення може бути механізмом, що також сприяє зменшенню випаровування інших парникових газів з поверхні ґрунту за рахунок стимулювання їх накопичення та

поглинання глибоко в ґрунтовому масиві, а не у верхньому шарі ґрунту. При чому макроагрегати розпушеного ґрунту діаметром 2–8 мм характеризуються на 51% кращим поглинаючими властивостями (за сукупний 20-денний період) ніж макроагрегати ґрунту з діаметром до 2 мм.

Крім того, відповідно проведене глибоке розпушення буде сприяти транслокаційним процесам переміщення ґрунтового органічного вуглецю у глибину масиву, які є одним із способів його секвестрації. Вимірювані норми секвестрації вуглецю ґрунтом складають від 50 до 1000 кг/га/рік. Глобальний потенціал секвестрації вуглецю становить 0,9–10,3 Пг/рік, що може компенсувати від однієї чверті до однієї третини річного збільшення атмосферного вуглекислого газу, що оцінюється в 3,3 Пг/рік. Сукупний потенціал секвестрації вуглецю ґрунтом за 25–50 років становить 30–60 Пг [10].

Порівняльну характеристику енергетичної ефективності застосування різних технологій глибокого розпушення ґрунту за відповідними показниками представлено в табл. 4.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика показників енергетичної ефективності за варіантами глибокого розпушення шару ґрунту 0,6 м

Варіанти розпушення \ Показники	Загальна енергія на розпушення, Дж/га	Витрата енергії на 1 м ³ розпушеного ґрунту, Дж/м ³	Коефіцієнт енергетичного еквіваленту	Енергетична оцінка врожаю, Дж/га
Щілинне	1286,8	7,39	6,12	7912,8
Смугове	3675,76	4,53	7,05	25898,1
Суцільне	4594,61	0,77	9,69	44500,4

Порівняльну ефективність застосування різних варіантів глибокого розпушення на осушуваних мінеральних ґрунтах за результатами польових експериментів наведено в табл. 5.

Отримані результати щодо врожаю вирощуваних культур (багаторічні трави, ярі зернові, озимі зернові, картопля) адекватно відображають досягнутий ступінь поліпшення умов їх вирощування та забезпечують в середньому їх приривок за варіантами глибокого розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів: щілинне – 5–10%; смугове – 10–20%; суцільне (удосконалене) – 20–40%.

Таблиця 5

Порівняльна ефективність застосування глибокого розпушення на осушуваних мінеральних ґрунтах

№ з/п	Варіанти	Рік дії	Культура	Приріст врожаю,		Термін окупності, років
				ц/га	%	
1	Щілинне розпушення	1	цукровий буряк	13,1	4,5	1
		2	озимі зернові	1,8	6,1	
		3	ярові зернові	1,4	5,3	
2	Смугове розпушення	1	цукровий буряк	51,6	18,1	1
		2	озимі зернові	4,6	15,9	
		3	ярові зернові	2,5	9,4	
3	Суцільне розпушення	1	цукровий буряк	93,25	32,3	1
		2	озимі зернові	6,5	22,3	
		3	ярові зернові	5,1	19,3	

Результати енергетичного аналізу показують, що суцільне розпушення забезпечує більшу прибавку врожаю вирощуваних культур ніж при щілинне чи смугове, що не тільки покриває витрати на його реалізацію, але й створює відповідний прибуток. Коефіцієнт енергетичної ефективності значно більший при удосконаленому суцільному розпушенні ґрунту, ніж при традиційному щілинному та смуговому способах, що дає змогу більш ефективно використовувати потенціал меліорованого ґрунту.

За таких змін клімату, що мають місце у сучасних умовах, кількість атмосферних опадів на території України змінилася неістотно, проте помітними стали зміни інтенсивності та характеру їх випадання. Підвищення температури повітря та нерівномірний розподіл опадів, які часто мають зливовий та локальний характер випадання у теплий період, не забезпечують ефективне накопичення вологи ґрунту, що призводить до критичних умов формування їх водного режиму [12].

Узагальнені результати дослідження спільної дії дренажу та різних технологій глибокого розпушення щодо нерозпушеного осушуваного мінерального ґрунту у критичних умовах при випадінні добових максимумів опадів різної забезпеченості на прикладі досліджуваного об'єкта наведено в табл. 6.

За експериментально встановленими параметрами впливу різних видів розпушення на зміну водно-фізичних показників ґрунту (щільність, водопроникність, акумуляційна здатність) в критичних умовах перезволоження щодо добових максимумів опадів різної забезпеченості визначено, що, порівняно з традиційним, глибоке

суцільне розпушення дає змогу зберегти через акумулювання в ґрунті від 9% до 38% добових максимумів опадів при забезпеченості від 5% до 90%, що у 2–5 разів краще ніж при щілинному та смуговому розпушенні, а також призводить до зменшення величини поверхневого стоку, величини інфільтрації та навантаження на дренаж на 20–50%.

Таблица 6

Ефективність використання акумуляційної здатності ґрунту при різних варіантах розпушення та роботи дренажу в критичних умовах

Значення показників	Розрахункова забезпеченість добових максимумів опадів						
	p , %	5%	10%	30%	50%	70%	90%
Без розпушення $K_i = 0,12$ м/добу; $Wh^0 = 316$ м ³ /га;	P_{τ} , мм	89,0	73,0	49,0	42,0	31,0	21,0
	S_{τ} , мм	23,68	19,42	13,04	11,17	8,25	5,58
	A_{τ} , мм	12,17	8,77	3,95	2,90	1,58	0,72
	P'_{τ} , мм	53,14	44,79	32,00	27,91	21,16	14,68
	t , (діб)	4,19	3,11	1,95	1,62	1,13	0,72
	E'_{A} , %	22,90	19,58	12,34	10,39	7,47	4,90
Щілинне $K_i = 0,25$ м/добу; $Wh^0 = 594$ м ³ /га;	S_{τ} , мм	20,14	16,52	11,09	9,50	7,01	4,75
	A_{τ} , мм	16,90	11,37	5,12	3,76	2,05	0,94
	P'_{τ} , мм	51,94	45,09	32,78	28,72	21,93	15,30
	t , (діб)	3,86	3,14	2,01	1,68	1,18	0,76
	E'_{A} , %	32,54	25,22	15,62	13,09	9,35	6,14
Смугове $K_i = 0,36$ м/добу; $Wh^0 = 655$ м ³ /га;	S_{τ} , мм	17,56	14,40	9,67	8,29	6,11	4,14
	A_{τ} , мм	24,26	16,32	7,35	5,40	2,91	1,35
	P'_{τ} , мм	47,16	42,26	31,97	28,30	21,93	15,50
	t , (діб)	3,35	2,86	1,94	1,65	1,18	0,77
	E'_{A} , %	51,44	38,62	22,99	19,08	13,27	8,71
Суцільне $K_i = 0,53$ м/добу; $Wh^0 = 711$ м ³ /га;	S_{τ} , мм	14,21	11,65	7,82	6,70	4,9	3,35
	A_{τ} , мм	34,19	23,00	10,36	7,61	4,14	1,90
	P'_{τ} , мм	40,58	38,33	30,80	27,67	21,90	15,74
	t , (діб)	2,70	2,49	1,85	1,50	1,08	0,68
	E'_{A} , %	84,25	60,01	33,64	27,50	18,90	12,07

Примітка: K_i – коефіцієнт фільтрації ґрунту за варіантами дослідження, м/добу $h^0 = 0,6$ м; t – час зниження рівня ґрунтових вод до безпечного рівня; Wh^0 – максимальна можливий запас продуктивної вологи розрахункового шару ґрунту), м³/га; P_{τ} – максимальна кількість опадів, що випала за добу, мм; P'_{τ} – частина опадів добового максимуму опадів, що попадає в розпушений ґрунт; A_{τ} – акумулююча ємність розпушеного ґрунту в зоні аерації, залежно від вихідної вологості; E'_{A} – частка опадів, що акумулюється в ґрунті.

За результатами прогнозно-імітаційного моделювання з використанням відповідного комплексу моделей [3; 8], було визначено ефективність застосування удосконаленого суцільного розпушення впродовж вегетаційного періоду у поєднанні з різними способами водорегулювання осушуваних мінеральних ґрунтів на прикладі досліджуваного об'єкта (ґрунт – супіщаний, площа – 10 га, культура – багаторічні трави на сіно) для розрахункового сухого за умовами тепло- й вологозабезпеченості періоду вегетації ($p=70\%$).

У табл. 7 наведено фрагменти узагальнених результатів за такими варіантами:

1 – попереджувальне шлюзування (ПШ);

2 – попереджувальне шлюзування з суцільним глибоким розпушенням (ПШ+ГР);

3 – попереджувальне шлюзування з суцільним глибоким розпушенням з післядією в 1 рік (ПШ+ГР+1р);

4 – зволожувальне шлюзування (ЗШ, підґрунтове зволоження).

Таблиця 7

Порівняльна характеристика показників технологічної та екологічної ефективності за варіантами досліджень

Показники Варіанти	WPh^0 , м ³ /га	WP , м ³ /га	$n(IW)$	OR , м ³ /га	EF , м ³ /га	K_y	Y_ϕ , ц/га	H , м	k_n
ПШ	355	117	0,22	2937	3997	0,46	17,3	1,047	0,49
ПШ + ГР	545	227	0,28	2957	4027	0,49	18,4	1,036	0,51
ПШ + ГР + 1р	420	136	0,22	2944	4038	0,48	17,8	1,043	0,5
ЗШ	355	204	0,28	2934	4743	0,61	22,9	0,908	0,49
Зміна значень показників відносно ПШ, %									
ПШ + ГР	53,5	94,0	27,0	0,7	0,8	6,5	6,4	1,1	4,1
ПШ + ГР + 1	18,3	16,2	0,0	0,2	1,0	4,3	2,9	0,4	2,0

Примітка: WPh^0 – продуктивний запас вологи у розрахунковому шарі ґрунту, м³/га; WP – середньозважений продуктивний запас вологи у розрахунковому шарі ґрунту за вегетаційний період, м³/га; $n(IW)$ – тривалість (частка) оптимальної вологозабезпеченості розрахункового шару ґрунту за вегетацію; OR – величина ефективних атмосферних опадів за вегетацію, м³/га; EF – величина ефективного значення сумарного випаровування за вегетацію, м³/га; K_y – коефіцієнт зниження врожаю культури; Y_ϕ – фактичний урожай, ц/га; H – середньозважений рівень ґрунтових вод, м; k_n – коефіцієнт екологічної надійності

Наведені дані засвідчують, що застосування удосконаленого суцільного розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів на фоні попереджувального шлюзування в розрахунковий сухий за умовами тепло- й вологозабезпеченості періоду вегетації на понад 90% збільшує акумулювання опадів впродовж періоду вегетації і підвищує вологозабезпеченість ґрунту за показником $n(IW)$ на 27%, при чому позитивний ефект частково зберігається через 1 рік післядії з достатньою екологічною надійністю.

За розглянутою сукупністю технологічних та екологічних показників така прогресивна технологія водорегулювання осушуваних земель (ПШ+ГР) за своєю ефективністю наближається до застосування зволожувального шлюзування (ЗШ, підґрунтове зволоження), але при цьому не потребує додатково витрат поливної води на зволоження ґрунтового масиву при менших матеріальних затратах.

Узагальнені результати з визначення економічної ефективності інвестицій при реконструкції та модернізації дренажних систем з використанням різних технологій та засобів глибокого розпушення за відповідними методами і моделями, згідно з [13], наведено в табл. 8.

Таблиця 8

Основні показники економічної ефективності інвестицій

№ з/п	Показник	Варіанти розпушення			
		Без розпушення	Щілинне	Смугове	Суцільне
1	Індекс прибутковості	0,59	1,03	1,95	3,06
2	Чистий дисконтований прибуток, грн/га	- 4908	377	11369	24708
3	Дисконтований термін окупності, роки	-	27	9	5

Здійснені розрахунки з визначення порівняльної економічної ефективності та інвестиційного оцінювання різних варіантів глибокого розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів підтверджують достатню доцільність їх застосування в проектах реконструкції та модернізації дренажних систем у зоні Західного Полісся України.

Таким чином, всі розглянуті технології глибокого розпушення є рентабельними та економічно вигідними, при цьому найбільш ефективним є удосконалене суцільне глибоке розпушення,

застосування якого є інвестиційно вигідним також при реалізації проєктів нового будівництва та реконструкції осушувальних систем в означеній зоні.

Удосконалені за енергоефективними та вологорегулюючими принципами технології та засоби глибокого суцільного розпушення, на відміну від традиційних щільового та смугового розпушення, дають змогу пошарово поліпшити макроструктуру активного шару осушуваних мінеральних ґрунтів на достатню глибину, щоб через їх щільність і шпаруватість, опосередковано впливати на їх водно-фізичні властивості, які формують водну, повітряну, теплову та інші складові природно-меліоративного режиму ґрунтового масиву, що в свою чергу, позитивно відображається на умовах розвитку агрокультур і їх урожайності.

В умовах наростаючого дефіциту вологи через зміни клімату реалізація удосконаленого суцільного глибокого розпушення дає можливість частково адаптуватися до них, зокрема, через високу вологоакумулюючу здатність макроструктури розпушеного ґрунту вирішити задачу накопичення природної вологи різного походження в активному шарі ґрунту для підвищення вологозабезпеченості в посушливі періоди, зменшити парникові випаровування з поверхні поля, а також техногенний вплив та питомі енерговитрати технічних засобів.

Технічну ефективність реалізації удосконалених технологій суцільного глибокого розпушення забезпечує застосування енергоефективних ярусних технічних засобів нової конструкції та принципу дії.

Висновок. 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 та на 27% його вологозабезпеченість, на 20–30% підвищилася врожайність вирощуваних культур, а термін післядії зріс до 4 років.

Удосконалені технології суцільного глибокого розпушення є рентабельним та інвестиційно вигідним адаптивним заходом (з

окупністю 1 рік), що відповідає сучасним принципам адаптивного землекористування у змінюваних кліматичних умовах та може бути ефективною альтернативою дорогої реконструкції і модернізації існуючих дренажних систем.

1. Науково-методичні рекомендації щодо створення та функціонування дренажних систем у змінних сучасних умовах / за заг. ред. В. А. Сташука, А. М. Рокочинського, П. П. Волка. Рівне : НУВГП, 2021. 113 с. ISBN 978-966-327-509-3. **2.** Вплив кліматичних змін на вологозабезпечення території України та виробництво сільськогосподарської продукції / Ромащенко М. І. та ін. «Вода для всіх»: присвячено Всесвітньому дню водних ресурсів : Міжнар. наук.-практ. конференція: тези доп. Київ, 2019. С. 179–180. **3.** Меліорація та облаштування Українського Полісся : колективна монографія / за ред. д.с.-г.н., професора, акад. НААН Я. М. Гадзала, д.т.н., професора, член-кор. НААН В. А. Сташука, д.т.н., професора А. М. Рокочинського. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. Т. 1. 932 с. **4.** Кожушко Л. Ф. Удосконалення дренажних фільтрів : монографія. Рівне : Вид-во РДТУ, 2001. 280 с. **5.** Ткачук В. Ф., Лук'янчук О. П., Рижий О. П. Агромеліоративні багатоярусні глибокорозпушувачі : монографія. Рівне, 2011. 190 с. ISBN 978-966-327-167-5. **6.** Кравець С. В., Скоблюк М. П., Стіньо О. В., Зоря Р. В. Критичноглибинні двоярусні ґрунторозпушувачі : монографія / за заг. редакцією С.В. Кравця. Рівне : НУВГП, 2018. 235 с. **7.** Лук'янчук О. П., Рокочинський А. М. Вдосконалення технологій і технічних засобів глибокого розпушення осушуваних мінеральних ґрунтів на основі системної методології. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 2(98). С. 92–109. **8.** Рокочинський А. М. Наукові та практичні аспекти оптимізації водорегулювання осушуваних земель на еколого-економічних засадах : монографія / за ред. акад. УААН М. І. Ромащенко. Рівне : НУВГП, 2010. 351 с. **9.** V. Chaplot, K. Abdalla, M. Alexis, H. Bourennane and other. Surface organic carbon enrichment to explain greater CO₂ emissions from short-term no-tilled soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2015. Vol. 203. P. 110–118. **10.** R. Lal. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 2004. Vol. 123. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>. (дата звернення: 12.11.2023). **11.** Науково-методичні рекомендації до застосування глибокого розпушення на осушуваних мінеральних ґрунтах Західного Полісся України / В. С. Гавриш, В. Ф. Ткачук, П. І. Мендусь, Г. І. Сапсай та ін. Рівне, 2013. 46 с. **12.** Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво / М. І. Ромащенко, Ю. В. Гусев, А. П. Шатковський та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 1. С. 5–22. **13.** Тимчасові рекомендації з оцінки інвестиційних проектів будівництва і реконструкції водогосподарських об'єктів та меліоративних систем / А. М. Рокочинський, В. А. Сташук, В. Д. Дупляк, Н. А. Фроленкова та ін. Рівне, 2013. 43 с.

REFERENCES:

1. Naukovo-metodychni rekomendatsii shchodo stvorennia ta funkcionuvannia drenaznykh system u zminnykh suchasnykh umovakh / za zah. red. V. A. Stashuka, A. M. Rokochynskoho, P. P. Volka. Rivne : NUVHP, 2021. 113 с. ISBN 978-966-327-509-3.
2. Vplyv klimatychnykh zmin na volohozabezpechennia terytorii Ukrainy ta vyrobnytstvo silskohospodarskoi produktsii / Romashchenko M. I. ta in. «*Voda dlia vsikh*»: prysviacheno Vsesvitnomu dniu vodnykh resursiv : Mizhnar. nauk.-prakt. konferentsiia : tezy dop. Kyiv, 2019. S. 179–180.
3. Melioratsiia ta oblashtuvannia Ukrainського Polissia : kolektyvna monohrafiia / za red. d.s-h.n., profesora, akad. NAAN Ya. M. Hadzala, d.t.n., profesora, chlenkor. NAAN V. A. Stashuka, d.t.n., profesora A. M. Rokochynskoho. Kherson : OLDI-PLluS, 2017. T. 1. 932 s.
4. Kozhushko L. F. Udoshkonalennia drenaznykh filtriv : monohrafiia. Rivne : Vyd-vo RDTU, 2001. 280 s.
5. Tkachuk V. F., Lukianchuk O. P., Ryzhyi O. P. Ahromelioratyvni bahatoiarusni hlybokorozpushuvachi : monohrafiia. Rivne, 2011. 190 s. ISBN 978-966-327-167-5.
6. Kravets S. V., Skobliuk M. P., Stino O. V., Zoria R. V. Krytychnohlybynni dvoiarusni hruntorozpushuvachi : monohrafiia / za zah. redaktsiieiu S. V. Kravtsia. Rivne : NUVHP, 2018. 235 s.
7. Lukianchuk O. P., Rokochynskiy A. M. Vdoskonalennia tekhnolohii i tekhnichnykh zasobiv hlybokoho rozpushennia osushuvanykh mineralnykh gruntiv na osnovi systemnoi metodolohii. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky* : zb. nauk. prats. Rivne : NUVHP, 2022. Vyp. 2(98). S. 92–109.
8. Rokochynskiy A. M. Naukovi ta praktychni aspekty optymizatsii vodrehuliuvannia osushuvanykh zemel na ekoloho-ekonomichnykh zasadakh : monohrafiia / za red. akad. UAAN M. I. Romashchenka. Rivne : NUVHP, 2010. 351 s.
9. V. Chaplot, K. Abdalla, M. Alexis, H. Bourennane and other. Surface organic carbon enrichment to explain greater CO₂ emissions from short-term no-tilled soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2015. Vol. 203. P. 110–118.
10. R. Lal. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 2004. Vol. 123. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>. (data zvernennia: 12.11.2023).
11. Naukovo-metodychni rekomendatsii do zastosuvannia hlybokoho rozpushennia na osushuvanykh mineralnykh gruntakh Zakhidnoho Polissia Ukrainy / V. S. Havrysh, V. F. Tkachuk, P. I. Mendus, H. I. Sapsai ta in. Rivne, 2013. 46 s.
12. Vplyv suchasnykh klimatychnykh zmin na vodni resursy ta silskohospodarske vyrobnytstvo / M. I. Romashchenko, Yu. V. Husev, A. P. Shatkovskiy ta in. *Melioratsiia i vodne gospodarstvo*. 2020. № 1. S. 5–22.
13. Tymchasovi rekomendatsii z otsinky investytsiinykh proektiv budivnytstva i rekonstruktsii vodohospodarskykh obiektiv ta melioratyvnykh system / A. M. Rokochynskiy, V. A. Stashuk, V. D. Dupliak, N. A. Frolenkova ta in. Rivne, 2013. 43 s.

Lukianchuk O. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Rokochynskyi A. M., Doctor of Engineering, Professor, Volk P. P., Doctor of Engineering, Associate Professor, Koptiuk R. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

COMPARATIVE ASSESSMENT OF DIFFERENT DEEP LOOSENING TECHNOLOGIES ON DRAINED MINERAL SOILS OF THE WESTERN POLISSIA OF UKRAINE

The current challenges of the energy, water and food crises, as well as climate changes, determine the need to implement appropriate adaptive measures to increase the level of agricultural production. For the application of deep loosening as an adaptive agromelioration measure in relation to modern conditions and requirements, a transition from traditional slotted and strip loosening to improved technologies of continuous layer-by-layer soil loosening based on energy-efficient and moisture-regulating principles is proposed. Their comparative evaluation according to the main indicators of overall efficiency was carried out on drained mineral soils of a representative object in the Western Polissia zone of Ukraine. According to the results of the evaluation of various technologies of deep loosening, it was determined that compared to traditional, improved technologies and technical means of continuous deep loosening based on energy-efficient and moisture-regulating principles, they have an advantage in all main indicators: agrotechnical, water-physical, energy, technological, ecological and economic, in particular, the specific energy intensity of the work process of loosening the soil decreased by 6–10 times, the moisture-accumulating capacity of the soil increased by 6–50% and its moisture availability by 27%, the yield of cultivated crops increased by 20–30%, and the after-effect period increased to 4 years. Improved 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: assessment; technology; technical means; deep loosening; drained soil.