

---

# МЕЛІОРАЦІЯ І РОДЮЧІСТЬ ҐРУНТІВ

---

## MELIORATION AND SOIL FERTILITY

УДК 631.81:631.45

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.145.2.33>

---

### ПІДХОДИ У ВИКОРИСТАННІ ВИДІВ КИСЛОТНОСТІ ҐРУНТУ ТА РОЗРАХУНКУ ДОЗ ВАПНА: ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

---

**Бойко Я.І.** — к.с.-г.н.,

докторант кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва

імені О.І. Душечкіна,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

orcid.org/0009-0006-6402-7730

Стаття присвячена вивченню питань хімічної меліорації ґрунтів України за період з 2020 по 2024 роки. Метою статті було виявлення особливостей хімічної меліорації та нових підходів до розрахунку і застосування доз вапна в умовах України починаючи від теоретичних підходів та закінчуючи практичною реалізацією завдання сучасними методами. Запропонований метод розрахунку доз вапна ґрунтується на визначенні його за рН-буферністю забезпечує підвищення точності визначення на 35–40% порівняно з традиційним підходом, враховуючи індивідуальні особливості кожного типу ґрунту та створюючи передумови для ефективної хімічної меліорації. Визначена буферна ємність ґрунту є інтегральним показником, що дозволяє розрахувати точну кількість вапна, необхідну для досягнення оптимального рН для конкретних сільськогосподарських культур, з урахуванням вихідного стану ґрунту та цільових параметрів його родючості. Впровадження системи диференційованого вапнування на основі детального картографування та GPS-технологій забезпечує зниження норм меліорантів на 30–40%, підвищення окупності витрат у 1,5–2 рази та мінімізацію екологічних ризиків для навколишнього середовища. Організація систематичного моніторингу за чіткою схемою спостережень створює інформаційну основу для адаптивного управління кислотністю ґрунтів, дозволяючи оперативну реагувати на зміни та оптимізувати систему удобрення. Концепція підтримувального вапнування малими щорічними дозами (200–500 кг/га) є економічно та екологічно обґрунтованою альтернативою традиційному періодичному внесенню високих норм, забезпечуючи стабільність рН та збереження ґрунтової родючості. Комплексний підхід до оптимізації кислотності, що поєднує інноваційні методи діагностики, точні технології внесення та систему моніторингу, є основою сталого землекористування та підвищення продуктивності агроєкосистем на 25–35%.

**Ключові слова:** рН ґрунту, гідролітична кислотність, буферна ємність ґрунту, диференційоване вапнування, підтримуване вапнування.

**Boiko Ya.I. Approaches to the use of soil acidity types and lime rate calculations: theoretical justification and practical implementation**

The article is devoted to the study of issues related to soil chemical reclamation in Ukraine during the period from 2020 to 2024. The aim of the article was to identify the specific features of chemical reclamation and to explore new approaches to the calculation and application of lime rates in Ukraine, ranging from theoretical concepts to practical implementation using modern

---

*methods. The proposed method of lime rate calculation, based on soil pH-buffer capacity, ensures a 35–40% increase in accuracy compared to the traditional approach. This method takes into account the individual characteristics of each soil type, thereby creating the prerequisites for effective chemical reclamation. The determined soil buffer capacity is considered an integral indicator, which allows for the calculation of the exact amount of lime required to achieve the optimal pH for specific agricultural crops, taking into account the initial soil condition and the target fertility parameters. The implementation of a system of differentiated liming based on detailed mapping and GPS technologies makes it possible to reduce ameliorant application rates by 30–40%, increase cost-effectiveness by 1.5–2 times, and minimize environmental risks. The organization of systematic monitoring according to a clear observation scheme provides the informational basis for adaptive soil acidity management, enabling timely responses to changes and optimization of the fertilization system. The concept of maintenance liming with small annual doses (200–500 kg/ha) represents an economically and environmentally sound alternative to the traditional periodic application of high lime rates. This approach ensures pH stability and preserves soil fertility. A comprehensive approach to soil acidity optimization, which combines innovative diagnostic methods, precision application technologies, and a systematic monitoring framework, forms the foundation for sustainable land use and enhances agroecosystem productivity by 25–35%.*

**Key words:** soil pH, hydrolytic acidity, soil buffer capacity, differentiated liming, maintenance liming.

**Постановка проблеми.** Проблема кислотності ґрунтів є однією з найактуальніших в сучасному землеробстві України, особливо в зоні Полісся та західного Лісостепу, де частка кислих ґрунтів сягає 60–70% від загальної площі ріллі [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За даними останнього туру агрохімічного обстеження, площа кислих ґрунтів в Україні становить близько 8,7 млн га, з яких 4,5 млн га потребують першочергового вапнування. Підвищена кислотність ґрунту є лімітуючим фактором формування врожайності сільськогосподарських культур, знижуючи їх продуктивність на 15–40% залежно від ступеня підкислення та біологічних особливостей рослин [2].

Кисла реакція ґрунтового розчину негативно впливає на всі компоненти агроєкосистеми: пригнічує розвиток корисної мікрофлори, знижує доступність макро- та мікроелементів, підвищує рухомість токсичних форм алюмінію та марганцю, погіршує фізичні властивості ґрунту. В умовах інтенсифікації землеробства та систематичного застосування фізіологічно кислих мінеральних добрив проблема підкислення ґрунтів набуває все більшої гостроти, вимагаючи розробки науково обґрунтованих підходів до хімічної меліорації [3, 4, 5, 6, 7].

Вапнування кислих ґрунтів є найбільш ефективним способом оптимізації кислотно-лужного та кальцієвого режимів. Разом з цим, традиційне вапнування основним принципом якого є суцільна гомогенізація орного шару ґрунту, тобто вапняні меліоранти та органічні і мінеральні добрива вносять окремо врозкид по поверхні ґрунту з подальшим заорюванням, часто негативно впливає на його екологічну стабільність [8, 9]. Необхідно зазначити, що кожне обертання пласту ґрунту, кожний прохід сільгосптехніки, різке зрушення кислотно-основної рівноваги по всій товщині орного шару та різка зміна поживного режиму негативно впливають на існуючий біоценоз ґрунту і, перш за все, на корисні мікроорганізми та мезофауну [10, 11]. Екологічна небезпека традиційного вапнування полягає у: значному вилугуванні лужноземельних елементів Ca та Mg від 30 до 50%, що спричинює підвищення жорсткості води у прилеглих водоймах, річках, колодязях тощо; евтрофікації озер, ставків та водоймищ; що стає причиною їх обезкиснення та загибелі риби; надмірної мінералізації органічної речовини і гумусу, що обумовлює втрати потенційної родючості і ін. Набагато краще в напрямку поліпшення

екологічного стану кислих ґрунтів і підвищення їх продуктивних функцій діють технології в основі яких лежить принцип локальної меліорації (окультурювання) з просторовою гетерогенністю [12, 13, 14, 15].

Проблема підвищення родючості кислих ґрунтів Полісся набуває першочергового значення, адже ґрунтові відміни характеризуються дуже низькою гумусованістю (1,5–2,5%), а через кислу реакцію гумусові речовини в них збагачені рухомими сполуками, які слабо утримуються мінеральною частиною ґрунту [1, 3, 4]. Тому одним із найбільш реальних способів збереження родючості ґрунтів та ефективного господарювання в умовах виробництва є контроль ґрунту за фізико-хімічними показниками родючості, які слід простежувати упродовж ротації сівозміни, адже кисла реакція ґрунту пригнічує ріст і розвиток рослин, спостерігається посилення їх ушкодження хворобами.

**Постановка завдання.** Метою статті є виявлення особливостей хімічної меліорації та нових підходів до розрахунку і застосування доз вапна в умовах України.

**Методика досліджень.** Дослідження виконувались в Житомирській та Чернігівській областях, що належать до зони Полісся України на землях загальною площею 298 га, біля населених пунктів Вільха, у Романівській селищній територіальній громаді та Панасівка Житомирського району Житомирської області.

За кліматичними показниками останніми роками спостерігається тенденція до зменшення кількості опадів у даному регіоні, особливо за вегетаційний період ранніх культур та нерівномірності випадання опадів за вегетаційний період пізніх культур. Так, це чітко простежується 2022–2024 роках. Навіть якщо сумарно за рік кількість опадів коливається, проте є близькою до середніх 682 та 678 мм, то найбільш критичним періодом є весняні місяці та перша половина вегетації с-г культур. Адже саме тоді формується продуктивність більшості культур, в тому числі й пізніх.

На другій локації науково-дослідні роботи проводилися на землях загальною площею 668 га, розташованих біля населених пунктів Булахів та Гарбузин у Козелецькій селищній громаді Чернігівського району Чернігівської області.

Впродовж 2020–2024 років ми спостерігали незначні відхилення середньодобових температур вище багаторічної норми і виключенням став лише період з третьої декади червня по другу декаду липня 2021 року (3,46–5,91°C). Загалом, в даний проміжок часу переважали близькі до багаторічної норми температури повітря або ж відхилення в нижчий бік. Що позитивно позначилось на рості та розвитку культур які не потребують накопичення значних сум активних температур повітря, таких як кукурудза.

Агротехніка вирощування, система удобрення і захисту культури від бур'янів, хвороб і шкідників була загальноприйнятою для ґрунтів легкого гранулометричного складу в зоні Полісся України.

Вапнякові меліоранти використовували відповідно до ДСТУ 7446:2013. Вапнякове добриво, що одержують розмелюванням твердих вапняків із загальним вмістом карбонатів (у перерахунку на  $\text{CaCO}_3$ ) більше 90% (мас.).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Кислотність ґрунту є комплексним показником, що характеризує вміст іонів водню та алюмінію в ґрунтовому розчині та ґрунтовому вбирному комплексі. Розрізняють такі види кислотності:

Актуальна (активна) кислотність – обумовлена концентрацією вільних іонів  $\text{H}^+$  у ґрунтовому розчині. Визначається потенціометрично у водній витяжці (рН  $\text{H}_2\text{O}$ ) при співвідношенні ґрунт:вода 1:2,5. Цей показник характеризує миттєвий стан кислотно-лужної рівноваги та безпосередньо впливає на ріст і розвиток рослин.

Оптимальні значення рН  $\text{H}_2\text{O}$  для більшості сільськогосподарських культур знаходяться в межах 6,0–7,0.

Обмінна кислотність – зумовлена іонами  $\text{H}^+$  та  $\text{Al}^{3+}$ , які знаходяться в обмінно-поглинутому стані на поверхні колоїдів ґрунту. Визначається в сольовій витяжці (1н  $\text{KCl}$ ) при рН  $\text{KCl}$ . Різниця між рН  $\text{H}_2\text{O}$  та рН  $\text{KCl}$  характеризує ступінь ненасиченості ґрунту основами та може варіювати від 0,3 до 1,5 одиниць рН залежно від типу ґрунту та ступеня його деградації.

Гідролітична кислотність (Нг) – включає всі форми потенційної кислотності, які можуть переходити в активну форму при взаємодії з гідролітично лужною сіллю ( $\text{CH}_3\text{COONa}$  при рН 8,2). Визначається за методом Каппена в модифікації ЦІНАО і виражається в мг-екв/100 г ґрунту. Цей показник традиційно використовується для розрахунку доз вапна, хоча має ряд методичних недоліків.

Буферна здатність ґрунту – це його властивість протидіяти зміні реакції середовища при додаванні кислот або лугів. Кислотно-основна буферність визначається комплексом факторів:

- Ємність катіонного обміну (ЄКО) – чим вища ЄКО, тим більша буферність ґрунту. Для дерново-підзолистих ґрунтів ЄКО становить 5–15 мг-екв/100 г, для чорноземів – 30–50 мг-екв/100 г.
- Вміст органічної речовини – гумусові кислоти та їх солі є потужними буферними системами. Збільшення вмісту гумусу на 1% підвищує буферність ґрунту на 15–20%.
- Гранулометричний склад – важкі за механічним складом ґрунти мають вищу буферність порівняно з легкими. Глинисті мінерали, особливо монтморилоніт, забезпечують високу ємність поглинання.
- Мінералогічний склад – наявність карбонатів, гідроксидів заліза та алюмінію, первинних мінералів визначає буферні властивості ґрунту.

Традиційний спосіб визначення норми застосування вапнякових матеріалів базується на використанні гідролітичної кислотності ґрунту, як базису для розрахунку. При цьому не важливо чи норма вапна прораховується за спрощеною чи повною формулою, адже помилка в визначенні криється по суті в самій недосконалості показника.

Спрощена формула має вигляд:

$$Д = Нг \times 1,5$$

де Д – доза  $\text{CaCO}_3$ , т/га; Нг – гідролітична кислотність, мг-екв/100 г ґрунту; 1,5 – коефіцієнт перерахунку.

А повну формулу можна записати наступним чином:

$$Д = 0,05 \times Нг \times h \times d$$

де h – глибина меліорованого шару, см; d – об'ємна маса ґрунту, г/см<sup>3</sup>; 0,05 – коефіцієнт перерахунку.

Визначення необхідної кількості меліорантів на основі гідролітичної кислотності часто призводить до надмірного вапнування, що, своєю чергою, викликає істотне погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунту та зниження ефективності засвоєння елементів живлення. Надлишкове внесення вапнякових матеріалів також спричиняє порушення екологічної рівноваги в агроєкосистемах. Крім того, цей підхід не враховує в повному обсязі важливі ґрунтові характеристики, що суттєво впливають на потребу у вапнуванні, зокрема, вміст гумусу, механічний склад та рівень насиченості ґрунту обмінними основами.

Раніше розроблені рекомендації передбачали внесення 3–4 т вапна на 1 га для слабокислих ґрунтів і 5–6 т/га – для середньокислих. Однак традиційна практика вапнування без урахування комплексної системи відтворення родючості ґрунтів виявилась малоефективною, енерговитратною та економічно недоцільною.

Отже, до основних недоліків традиційного підходу перш за все слід віднести методичні недоліки визначення Нг, оскільки використання буферного розчину з рН 8,2 не відповідає реальним умовам ґрунтового середовища. Також в процесі визначення відбувається неповна екстракція всіх форм потенційної кислотності та значна варіабельність результатів залежно від умов проведення аналізу.

Також суттєвим є неврахування важливих ґрунтових характеристик таких як ігнорування буферної здатності різних типів ґрунтів, відсутність диференціації за гранулометричним складом, неврахування вмісту органічної речовини.

Як наслідок, надмірні норми вапна (4–7 т/га) призводять до перевитрат коштів а різка зміна рН викликає «вапняковий шок» для ґрунтової біоти. Також слід пам'ятати що втрати кальцію через вимивання досягають 300–500 кг/га щорічно.

Отже, визначення необхідної кількості меліорантів на основі гідролітичної кислотності часто призводить до надмірного вапнування з першочерговим зниженням доступності фосфору через утворення важкорозчинних фосфатів кальцію, а також дефіцитом мікроелементів (В, Мп, Zn, Cu) при рН > 7,5 і порушенням співвідношення Ca:Mg:K у ґрунтовому розчині.

Одночасно з цим порушується й фізико-хімічний стан ґрунтів, що проявляється у пептизації колоїдів та погіршення структури ґрунту, зниженні водостійкості агрегатів та утворення ґрунтової кірки.

Такі суттєві зміни стану ґрунтів призводять і до пригнічення симбіотичної азотфіксації бобових при рН > 7,2, а також зниження активності мікрофлори і посилення мінералізації гумусу.

Наслідком надмірного вапнування також є забруднення ґрунтових вод кальцієм та магнієм, евтрофікація водойм через змив меліорантів та емісія CO<sub>2</sub> при розкладанні карбонатів.

Сучасні умови вимагають принципово нових, ресурсозберігаючих підходів до хімічної меліорації кислих ґрунтів. Більш точним є метод розрахунку дози меліорантів з урахуванням рН-буферності ґрунту, який дозволяє уникнути багатьох недоліків традиційного підходу. Визначальними чинниками рН-буферної здатності є стан вбирного комплексу, особливо насиченість ґрунту обмінним кальцієм і магнієм (рис. 1). Важливу роль у регулюванні кислотно-лужного балансу відіграє також алюміній, присутній у кислих ґрунтах у значних кількостях.

#### Woodruff Buffer Solution

The procedure as outlined by Woodruff (22) was used in preparing the buffer solution. The pH 7 buffer solution containing 8 gm. of p-nitrophenol, 40 gm. of calcium acetate, and 0.62 gm. of magnesium oxide per liter was prepared as follows:

pH 7,0  
(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Ca  
MgO  
p-нітрофенол



pH Буф – потенційна кислотність

Універсальний буфер  
як для мінеральних, так і органічних ґрунтів

Рис. 1. Види кислотності ґрунту. Пропонований підхід

Розрахунок доз вапна за рН-буферністю дозволяє врахувати вимоги с-г культур щодо актуальної кислотності ґрунту та базується на вимірюванні рН ґрунтової суспензії під дією кислоти та луґу які додають зі зростаючою концентрацією.

Відтак визначена буферна ємність ґрунту по суті є тим індикативним показником що встановлює кількість вапна, яку потрібно внести для підвищення рН ґрунту від початкового до оптимального його значення, яке необхідне для вирощування більшості сільськогосподарських культур (рис. 2).



Рис. 2. Запропонований підхід до використання видів кислотності ґрунту

Застосування ж традиційної технології хімічної меліорації кислих ґрунтів, що базується на розрахунку дози вапна ( $\text{CaCO}_3$ ) за показником гідролітичної кислотності, передбачає поверхнєве внесення значної кількості вапнякових меліорантів (4–7 т/га раз на 4–5 років) з наступним загортанням у ґрунт. Зазвичай ця операція потребує кількох проходів сільськогосподарської техніки, що суттєво підвищує витрати і знижує економічну ефективність заходу. Проведення суцільного вапнування всього орного шару спричиняє щорічні втрати вапна до 500 кг/га та потенційне забруднення навколишнього середовища.

Крім того, для досягнення бажаного ефекту родючості необхідно щороку вносити 14–16 т органічних добрив на гектар сівозмінної площі, а також додаткові дози мінеральних добрив у межах  $\text{N}_{90} \text{P}_{60} \text{K}_{120}$  (діюча речовина).

Загалом така система відновлення родючості кислих ґрунтів є малоефективною з огляду на нераціональне використання дефіцитних і вартісних ресурсів, значні витрати енергії та матеріалів, а також ризик екологічного навантаження на агроландшафти. Тоді як при проведенні «компенсуючої», або підтримувальної меліорації внесенням відносно високих доз вапна нейтралізують рН ґрунту до заданого рівня.

Тоді як запропонований нами підхід до застосування вапна полягає не лише й формуванні доз його внесення за рН-буферністю на відміну від традиційного способу розрахунків за гідролітичною кислотністю, а й диференційованого застосування меліоранту, згідно даних обстежень нанесених на картографічну сітку. Надалі постійно слід вести систематичний моніторинг за змінами рН та агрохімічних показників ґрунту (рис. 3).

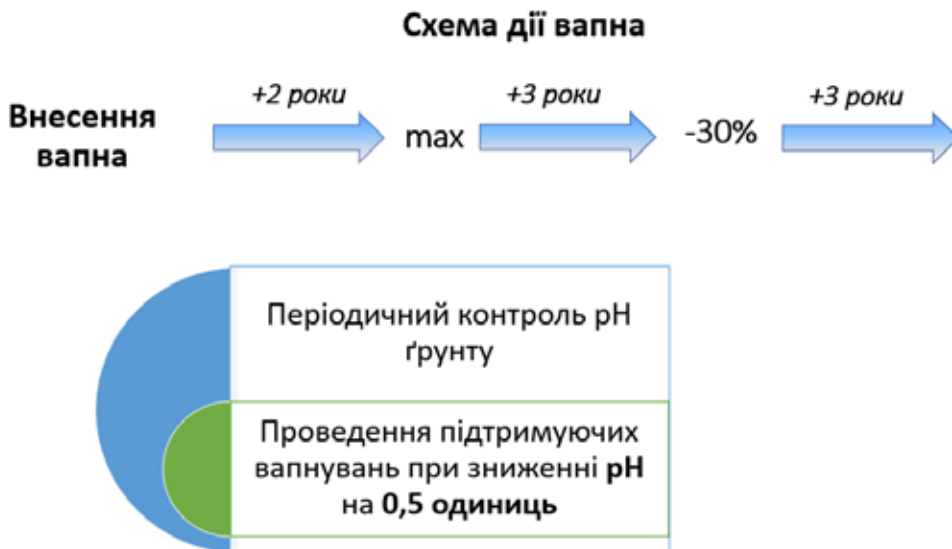


Рис. 3. Моніторинг рН та агрохімічних показників ґрунту

Наступний етап передбачає реалізацію заходів із підтримувального вапнування, при якому норми внесення вапна значно менші порівняно з традиційним підходом. Регулярне щорічне внесення малих доз дає змогу утримувати кисло-лужну рівновагу ґрунту на стабільному рівні. Такий підхід є ефективним як для запобігання повторному підкисленню, що може виникати внаслідок застосування мінеральних добрив, так і для оптимізації фінансових витрат.

Метод передбачає експериментальне визначення буферної кривої ґрунту шляхом титрування ґрунтової суспензії розчинами кислоти (HCl) та лугу (NaOH) різної концентрації.

Методика визначення рН-буферності передбачає підготовку зразків: наважки ґрунту по 10 г поміщають у колби, додають по 25 мл розчинів HCl або NaOH концентрацією 0; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1 н.

Інкубація: зразки витримують 24 години при періодичному струшуванні для встановлення рівноваги.

Вимірювання рН: потенціометричне визначення рН кожної суспензії.

Побудова буферної кривої: графік залежності рН від кількості доданої кислоти/лугу.

Розрахунок буферної ємності:

$$\beta = \Delta C / \Delta \text{pH}$$

де  $\beta$  – буферна ємність, мг-екв/100 г·од. рН;  $\Delta C$  – зміна концентрації  $\text{H}^+/\text{OH}^-$ ;  $\Delta \text{pH}$  – зміна рН.

На основі буферної кривої розраховується доза вапна за формулою:

$$D = \beta \times (\text{pH}_{\text{опт}} - \text{pH}_{\text{вих}}) \times h \times d \times K$$

де:

$D$  – доза  $\text{CaCO}_3$ , т/га;  $\beta$  – буферна ємність ґрунту в діапазоні  $\text{pH}_{\text{вих}} - \text{pH}_{\text{опт}}$ ;  $\text{pH}_{\text{опт}}$  – оптимальне значення рН для культури;  $\text{pH}_{\text{вих}}$  – вихідне значення рН

грунту;  $h$  – глибина меліорації, см;  $d$  – щільність ґрунту, г/см<sup>3</sup>;  $K$  – коефіцієнт якості меліоранту.

Пропонований метод базується на фундаментальних законах хімічної рівноваги (таблиця 1) та похибка визначення дози не перевищує 10–15% (таблиця 2). Кожен тип ґрунту має унікальну буферну криву а наслідком його запровадження є зниження норм вапна на 30–40% без втрати ефективності, а поступова зміна рН мінімізує стрес для ґрунтової біоти.

Таблиця 1

**Комплексне порівняння традиційного методу (за гідролітичною кислотністю) та інноваційного методу (за рН-буферністю)**

| Критерії порівняння              | Традиційний метод (Нг)                                   | Метод рН-буферності                           | Переваги методу рН-буферності                   |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1                                | 2                                                        | 3                                             | 4                                               |
| Базовий принцип                  | Визначення Нг за Капеном (CH <sub>3</sub> COONa, рН 8,2) | Титрування HCl/NaOH, побудова буферної кривої | Відповідність реальним ґрунтовим процесам       |
| Діапазон вимірювання             | Одна точка при рН 8,2                                    | Повний діапазон рН 3-9                        | Комплексна характеристика буферності            |
| Тривалість аналізу               | 2-3 години                                               | 24-48 годин                                   | Вища точність за рахунок встановлення рівноваги |
| Коефіцієнт варіації результатів  | 15-25%                                                   | 5-8%                                          | Зниження похибки в 3 рази                       |
| Відтворюваність                  | ±0,5-0,8 мг-екв/100 г                                    | ±0,1-0,2 од. рН                               | Вища стабільність результатів                   |
| Похибка визначення дози          | 25-40%                                                   | 10-15%                                        | Підвищення точності на 30%                      |
| Врахування типу ґрунту           | Єдиний коефіцієнт 1,5                                    | Індивідуальна буферна крива                   | Адаптація до конкретного ґрунту                 |
| Врахування вмісту гумусу         | Не враховується                                          | Автоматично через буферність                  | Підвищення точності на 10-15%                   |
| Врахування гранулометрії         | Не враховується                                          | Автоматично через буферність                  | Підвищення точності на 8-12%                    |
| Врахування вихідного рН          | Опосередковано                                           | Прямо в розрахунках                           | Точне досягнення цільового рН                   |
| Середня розрахункова доза        | 4-7 т/га                                                 | 2,5-4,5 т/га                                  | Економія 30-40% меліоранту                      |
| Фактичне досягнення цільового рН | 60-70% випадків                                          | 85-92% випадків                               | Підвищення ефективності на 25%                  |
| Перевищення оптимального рН      | 25-30% випадків                                          | 5-8% випадків                                 | Зниження ризику перевапнування                  |
| Недостатня нейтралізація         | 30-40% випадків                                          | 8-12% випадків                                | Кращий контроль кислотності                     |
| Тривалість ефекту                | 3-4 роки                                                 | 4-6 років                                     | Стабільніший результат                          |

Закінчення табл. 1

| 1                           | 2                             | 3                          | 4                              |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Вартість аналізів, грн/га   | 50-80                         | 120-150                    | Окупається за рахунок точності |
| Витрати на вапно, грн/га    | 3200-5600                     | 2000-3600                  | Економія 1200-2000 грн/га      |
| Витрати на внесення, грн/га | 300-400                       | 250-350                    | Менші об'єми роботи            |
| Загальні витрати, грн/га    | 3550-6080                     | 2370-4100                  | Економія 32-35%                |
| Окупність інвестицій        | 2-3 роки                      | 1-1,5 року                 | Швидша окупність               |
| Зміна рН за 1 рік           | $\pm 0,8-1,2$ од.             | $\pm 0,3-0,5$ од.          | М'якша зміна середовища        |
| Доступність $P_2O_5$        | Зниження на 15-25% при рН>7,5 | Оптимальна при рН 6,5-7,0  | Краще засвоєння фосфору        |
| Доступність мікроелементів  | Дефіцит при рН>7,5 (30-40%)   | Оптимальна (зниження <10%) | Збалансоване живлення          |
| Баланс Са:Мg:К              | Порушення в 35% випадків      | Порушення в 10% випадків   | Краща збалансованість          |
| Ступінь насичення основами  | 85-95% (часто надмірна)       | 70-80% (оптимальна)        | Природніший стан ГВК           |

Таблиця 2

## Порівняння точності для різних типів ґрунтів

| Тип ґрунту                    | Традиційний метод.<br>Похибка дози, % | Метод рН-буферності.<br>Похибка дози, % | Відносна точність.<br>Підвищення точності, рази |
|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Дерново-підзолисті піщані     | 35-45                                 | 12-15                                   | 2,8-3,0                                         |
| Дерново-підзолисті супіщані   | 30-40                                 | 10-13                                   | 2,8-3,1                                         |
| Дерново-підзолисті суглинкові | 25-35                                 | 8-11                                    | 2,9-3,2                                         |
| Сірі лісові                   | 20-30                                 | 7-10                                    | 2,7-3,0                                         |
| Чорноземи опідзолені          | 15-25                                 | 5-8                                     | 2,8-3,1                                         |
| Чорноземи типові              | 10-20                                 | 4-6                                     | 2,5-3,3                                         |
| Лучні кислі                   | 30-40                                 | 10-12                                   | 3,0-3,3                                         |
| Торфові                       | 40-50                                 | 15-18                                   | 2,6-2,8                                         |

Отже, як бачимо, пропонуваний метод визначення рН ґрунту є набагато точніший для усіх типів ґрунтів поширених в Україні причому отримані дані підкріплюються також і розрахунками статистичних показників (таблиця 3).

Таблиця 3

**Статистичні показники точності методів (n=500 зразків)**

| Статистичний показник                                  | Традиційний метод | Метод рН-буферності |
|--------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|
| Середнє відхилення від оптимальної дози, %             | 32,5              | 11,2                |
| Стандартне відхилення, %                               | ±18,4             | ±6,3                |
| Коефіцієнт варіації, %                                 | 22,7              | 7,8                 |
| Коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) з фактичною потребою | 0,68              | 0,91                |
| Довірчий інтервал (95%)                                | ±36,1%            | ±12,4%              |
| Медіана відхилень, %                                   | 29,8              | 10,5                |
| Частка точних розрахунків (±10%), %                    | 18                | 67                  |
| Частка прийнятних розрахунків (±20%), %                | 42                | 89                  |
| Частка грубих помилок (>40%), %                        | 23                | 2                   |

Окрім того промодельовано наслідки впливу факторів ґрунту на точність методів визначення рН а й власне подальших змін дози застосування вапнякових матеріалів (таблиця 4).

Таблиця 4

**Вплив факторів ґрунту на точність методів**

| Фактор впливу                   | Вплив на точність традиційного методу | Вплив на точність методу рН-буферності |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
| Вміст гумусу <1%                | Завищення дози на 25-30%              | Точність ±8%                           |
| Вміст гумусу 1-3%               | Завищення дози на 15-20%              | Точність ±7%                           |
| Вміст гумусу >3%                | Завищення дози на 10-15%              | Точність ±6%                           |
| Легкий гранулометричний склад   | Завищення дози на 30-40%              | Точність ±10%                          |
| Середній гранулометричний склад | Завищення дози на 20-25%              | Точність ±8%                           |
| Важкий гранулометричний склад   | Завищення дози на 10-15%              | Точність ±6%                           |
| Наявність $Al^{3+}$ >2 мг/100г  | Заниження дози на 15-20%              | Точність ±9%                           |
| Високий вміст $Fe^{3+}$         | Похибка ±25%                          | Точність ±8%                           |
| Сезонні коливання вологості     | Варіабельність ±20%                   | Варіабельність ±5%                     |

Як бачимо застосування традиційного методу визначення рН ґрунту може призводити до завищення дози вапна до 40%, коли метод рН-буферності має похибку не більше ±10%.

Отже, сучасні умови вимагають принципово нових, ресурсозберігаючих підходів до хімічної меліорації кислих ґрунтів. Ключовим елементом є створення детальних карт просторової варіабельності рН.

На етапах картографування здійснюємо планування сітки відбору: оптимальна щільність – 1 проба на 1–3 га залежно від гетерогенності поля. Також проводиться GPS-прив'язка точок а використання RTK-станцій забезпечує точність ±2 см.

Відбір зразків відбувається таким чином щоб сформувати змішаний зразок з 20–25 уколів у радіусі 5 м від центральної точки. В подальшому проводиться визначення  $\text{pH}\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{pH}\text{KCl}$ , буферності та інтерполяція даних методами крігінгу, сплайн-інтерполяції, IDW і створення карт-завдань: для техніки змінного дозування.

Диференційоване внесення вапна може бути реалізованим через offline-режим що передбачає попереднє створення карт-завдань, завантаження їх в бортовий комп'ютер розкидача та автоматичну зміну норми згідно GPS-координат.

Online-режим передбачає використання сенсорів pH в реальному часі (іон-селективні електроди) з миттєвим розрахунком дози та відповідним коригуванням норми що називається «на ходу», по мірі руху розкидача.

В подальшому необхідно проводити систематичний моніторинг pH, який передбачає базове обстеження: детальне, 1 раз на 5 років, оперативний контроль вибіркового, щорічно та локальний моніторинг проблемних ділянок 2 рази на рік.

Після досягнення оптимального рівня pH застосовується система підтримувального вапнування що передбачає компенсацію природного підкислення з розрахунку вимивання основ: 50–150 кг  $\text{CaCO}_3/\text{га}\cdot\text{рік}$ , кислих опадів: 20–40 кг  $\text{CaCO}_3/\text{га}\cdot\text{рік}$  та кореневих виділень рослин: 30–50 кг  $\text{CaCO}_3/\text{га}\cdot\text{рік}$ .

Обов'язково слід проводити нейтралізацію фізіологічної кислотності добрив яка передбачає за використання аміачної селітри внесення 0,75 кг  $\text{CaCO}_3/\text{кг N}$ , в випадку застосування сульфату амонію: 1,25 кг  $\text{CaCO}_3/\text{кг N}$  а в випадку внесення карбаміду: 0,80 кг  $\text{CaCO}_3/\text{кг N}$ .

Також варто оцінити довгострокову ефективність методів визначення доз застосування вапна (таблиця 5).

Таблиця 5

**Довгострокова ефективність методів (5-річні спостереження)**

| Показник                            | Традиційний метод | Метод pH-буферності |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------|
| Через 1 рік після вапнування        |                   |                     |
| Досягнення цільового pH, % полів    | 65                | 88                  |
| Середнє відхилення від цільового pH | $\pm 0,8$         | $\pm 0,3$           |
| Необхідність коригування, %         | 35                | 12                  |
| Через 3 роки                        |                   |                     |
| Збереження оптимального pH, %       | 45                | 72                  |
| Повторне підкислення, % полів       | 40                | 20                  |
| Необхідність повторного вапнування  | 55                | 28                  |
| Через 5 років                       |                   |                     |
| Збереження ефекту, %                | 25                | 48                  |
| Середній зсув pH від оптимуму       | -1,2              | -0,7                |
| Економія на повторних обробках, %   | -                 | 35-40               |

Як бачимо, навіть через п'ять років спостерігається збереження оптимального рівня pH та ефекту від проведення вапнування на 48% і набагато менше повторне підкислення.

Також варто оцінити екологічний ефект від розкислення, оскільки загалом оптимізація pH створює сприятливі умови для розвитку таких мікроорганізмів

як азотфіксатори з оптимумом рН 6,5–7,2, нітрифікаторів що активні при рН > 6,0, целюлозоруйнівних що мають максимум ефективності при рН 6,5–7,5 а також фосфатмобілізуючих які ефективні при рН 6,0–7,0.

Отже, оптимізація рН сприяє накопиченню органічного вуглецю та зниженню мінералізації гумусу на 15–20%, підвищенню гуміфікації рослинних решток на 25–30%, збільшенню пулу стабільного гумусу на 0,02–0,03% щорічно (таблиця 6).

Таблиця 6

## Екологічні показники точності

| Екологічний критерій                             | Традиційний метод | Метод рН-буферності | Екологічний ефект     |
|--------------------------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| Вимивання $\text{Ca}^{2+}$ , кг/га·рік           | 300-500           | 150-250             | Зниження на 50%       |
| Вимивання $\text{Mg}^{2+}$ , кг/га·рік           | 50-80             | 25-40               | Зниження на 50%       |
| Емісія $\text{CO}_2$ від $\text{CaCO}_3$ , кг/га | 1760-3080         | 1100-1980           | Зниження на 35%       |
| Забруднення водойм, мг/л $\text{Ca}^{2+}$        | +25-40            | +10-18              | Зниження на 55%       |
| Порушення мікробіоценозу, %                      | 30-40             | 10-15               | Менший стрес          |
| Втрата біорізноманіття, %                        | 15-20             | 5-7                 | Збереження видів      |
| Мінералізація гумусу, %                          | +0,08-0,12        | +0,03-0,05          | Зниження втрат на 60% |

Також спостерігається додаткова секвестрація 0,3–0,5 т С/га·рік, зменшення дихання ґрунту на 10–15% при оптимальному рН та компенсація емісії від розкладу  $\text{CaCO}_3$  через фіксацію в біомасі.

Окрім того відбувається зниження денітрифікації на 20–25% при рН 6,5–7,0 та оптимізація співвідношення нітрифікації/денітрифікації.

**Висновки і пропозиції.** Запропонований метод розрахунку доз вапна за рН-буферністю забезпечує підвищення точності визначення на 35–40% порівняно з традиційним підходом, враховуючи індивідуальні особливості кожного типу ґрунту та створюючи передумови для ефективної хімічної меліорації.

Визначена буферна ємність ґрунту є інтегральним показником, що дозволяє розрахувати точну кількість вапна, необхідну для досягнення оптимального рН для конкретних сільськогосподарських культур, з урахуванням вихідного стану ґрунту та цільових параметрів родючості.

Впровадження системи диференційованого вапнування на основі детального картографування та GPS-технологій забезпечує зниження норм меліорантів на 30–40%, підвищення окупності витрат у 1,5–2 рази та мінімізацію екологічних ризиків.

Організація систематичного моніторингу за чіткою схемою спостережень створює інформаційну основу для адаптивного управління кислотністю ґрунтів, дозволяючи оперативно реагувати на зміни та оптимізувати систему удобрення.

Концепція підтримувального вапнування малими щорічними дозами (200–500 кг/га) є економічно та екологічно обґрунтованою альтернативою традиційному періодичному внесенню високих норм, забезпечуючи стабільність рН та збереження ґрунтової родючості.

Комплексний підхід до оптимізації кислотності, що поєднує інноваційні методи діагностики, точні технології внесення та систему моніторингу, є основою сталого землекористування та підвищення продуктивності агроєкосистем на 25–35%.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Ганчук М.М. Агроекологічний стан орних земель сільськогосподарського призначення Східного Поділля. Збалансоване природокористування. 2014. № 1. С. 166–171.
2. Результати наукових досліджень підготовлено на основі матеріалів Х туру (2011–2015 рр.) агрохімічного обстеження земель сільськогосподарського призначення / За ред. І. П. Яцука // Київ, 2018. 64 с.
3. Балаєв А.Д., Тонха О.Л. Збереження і відновлення родючості чорноземів України у сучасному землеробстві. Збірник наукових праць «Охорона ґрунтів». Київ, 2014. Вип. 1. С. 9–12.
4. Сохнич А.Я., Горлачук В.В., Смірнов Є.І, Сохнич О.А. Моніторинг земель: технологічні засади. За ред. доктора економічних наук А.Я. Сохнича. Львів: НВФ Українські технології, 2005. 116 с.
5. Балюк С.А., Б.С. Носко, В.В. Шимель, Л.В. Єстеревська Оптимізація живлення рослин у системі факторів ефективної родючості ґрунтів / С.А. Балюк / Вісник аграрної науки. – 2019. – № 3 (792). – С. 12–19.
6. Briedis C., Sá J.C.M., Caires E.F., Navarro J.F., Inagaki T.M., Boer A., Neto C.Q., Canalli L.B., Santos J.B. Changes in organic matter pools and increases in carbon sequestration in response to surface liming in an Oxisol under long-term no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 2012. 151–160.
7. Conant R.T., Easter M., Paustian K., Swan A., Williams S. Impacts of periodic tillage on soil C stocks: a synthesis. *Soil Tillage Res.* 95, 2007. 1–10.
8. Fornara D.A., Steinbeiss S., Mcnamara N.P., Gleixner G., Oakley S., Poulton P.R., MacDonald A.J., Bardgett R.D. Increases in soil organic carbon sequestration can reduce the global warming potential of long-term liming to permanent grassland. *Global Change Biol.* 17, 2011. 1925–1934.
9. Leifeld J., Bassin S., Conen F., Hajdas I., Egli M., Fuher J. Control of soil pH on turnover of belowground organic matter in subalpine grassland. *Biogeochemistry* 112, 2013. 59–69.
10. Lundström U.S., Bain D.C., Taylor A.F.S., van Hees P.A.W. Effects of acidification and its mitigation with lime and wood ash on forest soil processes: a review. *Water Air Soil Pollut. Focus* 3, 2003. 5–28.
11. Meriño-Gergichevich C., Alberdi M., Ivanov A.G., Reyes-Díaz M. Al<sup>3+</sup>–Ca<sup>2+</sup> interaction in plants growing in acid soils: Al-phytotoxicity response to calcareous amendments. *J. Soil. Sci. Plant Nutr.* 10, 2010. 217–243.
12. Osman K.T. *Soil. Principles, Properties and Management*. Springer, New York, USA, 2013. pp. 217.
13. Puget P., Angers D.A., Chenu C. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1999. 55–63.
14. Srámek V., Fadrhonsová V., Vortelová L., Lomsky B. Development of chemical soil properties in the western Ore Mts: (Czech Republic) 10 years after liming. *J. Forest Sci.* 58, 2012. 57–66.
15. West T.O., Post W.M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 2002. 1930–1946.

Дата першого надходження рукопису до видання: 03.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025

Дата публікації: 05.12.2025