

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-193>

Available at: <http://mivg.iwvim.com.ua/index.php/mivg/article/view/193>

УДК 631.421.2; 631.43

СИСТЕМА ЛАБОРАТОРНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ВОДНО-ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ

М.І. Ромащенко¹, докт. техн. наук, С.С. Коломієць², канд. с.-г. наук, докторант,
А.С. Білоброва³, аспірант

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-9997-1346>; e-mail: mi.romashchenko@gmail.com

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-4329-4382>; e-mail: kss2006@ukr.net

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0540-9492>; e-mail: anastasiabilobrova1993@gmail.com

Анотація. У зв'язку із глобальними змінами клімату для всіх ґрунтово-кліматичних зон України зрошення стало визначальним фактором у формуванні біопродукційних процесів нових сортів і гібридів сільськогосподарських культур. За цього ефективність зрошення значною мірою визначається достовірністю водно-фізичних властивостей ґрунтів. Метою комплексних гідрофізичних досліджень було визначення основних водно-фізичних властивостей ґрунтів та констант, що необхідні для створення сприятливих ґрунтових режимів на меліорованих землях та математичного моделювання водного режиму ґрунтів. Комплексні лабораторні гідрофізичні випробування зразків ґрунту непорушеної структури дозволяють визначити для одного зразка ґрунту гідрофізичні функції: водоутримувальної здатності, вологопровідності та водно-фізичні константи повної та найменшої вологомісткості, вологості в'янення і максимальної гігроскопічності, які в силу визначень на одному й тому ж зразку ґрунту розташовуються на одній кривій десорбції ґрунту від повної вологомісткості до максимальної гігроскопічної вологості. Первинне насичення зразка ґрунту під вакуумом до повної вологомісткості, що забезпечує одержання єдиної кривої водоутримувальної здатності з урахуванням структурної макропористості, є головною особливістю даної методики. Одержувана петля капілярного гістерезису за алгоритмом: швидка нерівноважна десорбція від повної вологомісткості та повільна рівноважна сорбція, дозволяє побудувати диференційну криву розподілу об'єму пор за радіусами, що характеризує структуру порового простору ґрунту. Ці структурні характеристики є чутливими до ґрунтових процесів, за якими визначається напрямок епігенетичних змін структури порового простору ґрунтів та напрямок еволюції ґрунтової матриці. З петлі одержаного капілярного гістерезису за співвідношенням радіусів менисків понад $n = \frac{r_{\text{сорб}}}{r_{\text{десорб}}} \geq 2$ встановлюється поріг утворення структурної макропористості ґрунту.

Загалом запропонована система лабораторного діагностування ґрунтів має переваги перед існуючими методами діагностування, суттєво підвищує інформативність комплексних гідрофізичних випробувань, надає якісно нову інформацію про ґрунти та забезпечує необхідними параметрами математичне моделювання процесів масообміну у ненасичених вологою ґрунтах зони аерації.

Ключові слова: лабораторне діагностування ґрунтів, водно-фізичні властивості та константи, гідрофізичні функції, капілярний гістерезис, структурна макропористість.

Актуальність дослідження. За оцінками Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН агроресурсний потенціал України дає змогу виробляти сільськогосподарську продукцію в обсягах, що забезпечують продуктами харчування не менш як 450–500 млн. осіб. Сьогодні ці можливості використовуються не більше ніж на третину, хоча Україна в повному обсязі забезпечує свою продовольчу безпеку, є найбільшим виробником та експортером соняшникової олії, третім світовим експортером кукурудзи, четвертим – ячменю, шостим – соєвих бобів, сьомим – курятини [16].

Недостатній рівень використання наявного агроресурсного потенціалу обмежується низкою факторів, головними з яких є неоптимальні умови природного вологозабезпечення на більш ніж половині території України, які постійно погіршуються у зв'язку із сучасними глобальними змінами клімату у бік аридизації [16], тому максимальне використання потенціалу нових сортів і гібридів сільськогосподарських культур можливе лише за цілеспрямованого регулювання водного режиму ґрунтів.

Застосування зрошення та дренажу дає змогу незалежно від погодних умов підвищувати врожайність сільськогосподарських

культур у два-три рази, порівняно з богарними землями.

Згідно зі Стратегією зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 р., що була розроблена за участі фахівців ІВПіМ та схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 р. № 688-р, передбачається введення в Україні додаткових площ зрошення понад 1180 тис. гектарів. У зв'язку з цим розроблення підходів до визначення водно-фізичних властивостей ґрунтів, на основі яких створюють сприятливі ґрунтові режими на меліорованих землях, є актуальною проблемою сучасної аграрної науки. Зокрема це стосується вдосконалення методів визначення гідрофізичних функцій: водоутримувальної здатності та вологопровідності ґрунтів, необхідних для кількісного моделювання їх водного режиму на основі ґрунтової термодинаміки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Системні дослідження вологонасичення і випаровування з пористих середовищ, зокрема ґрунтів, розпочалися на початку минулого століття. Зокрема П.С. Коссовичем [13] на прикладі ґрунту вперше був обґрунтований тристадійний механізм випаровування вологи з капілярно-пористого матеріалу, саме йому належить широко вживаний нині термін «найменша вологомісткість». Надалі основні положення механізму сушіння ґрунту були розвинуті А.Ф. Лебедевим [14], який вперше експериментально довів, що характер пересування вологи у ненасиченому ґрунті визначається формою зв'язку вологи з ґрунтовим каркасом.

Багато вчених займалися дослідженням встановлення категорій зв'язку вологи з ґрунтом та обґрунтуванням водно-фізичних констант і методів їх визначень [3; 4; 15].

Масштабні проекти меліорації в СРСР і Україні у 60–80-ті роки минулого століття зробили затребуваними термодинамічні методи досліджень водно-фізичних властивостей первинно ненасичених водою ґрунтів зони аерації [4; 7].

Важливе значення для цього мала оглядова робота О.М. Глобуса «Експериментальная гидрофизика почв» [4] створена за оглядом публікацій переважно зарубіжних вчених. І хоча сам прилад для вимірювання капілярного потенціалу вологи в ґрунті (тензіометр), який став основою термодинамічних методів, був створений В.Г. Корневим ще на початку 20-х років минулого століття у СРСР [12], однак теорія і математичні моделі пересування вологи у ґрунтах розроблялись переважно за рубежом [4,5,8,9,10].

Аналіз існуючих методів та методик визначення основних водно-фізичних характеристик ґрунтів показує, що всі вони мають такі недоліки як значна трудомісткість та довготривалість проведення досліджень, недостатньо компетентні розміри зразків, недосконалість апаратури та ін. Використання водно-фізичних констант, які не мають термодинамічного обґрунтування, у плануванні режимів зрошення із застосуванням великих поливних норм на первинно освоєваних територіях зрошення призводило до великих інфільтраційних втрат поливної води та швидкого зростання рівнів ґрунтових вод з подальшими негативними екологічними наслідками у вигляді осолонцювання і засолення ґрунтів та підтоплення меліорованих територій [7]. Концептуальні засади формування водоощадливих та екологічно безпечних режимів зрошення сільськогосподарських культур були сформовані понад двадцять років тому, де вказано на необхідність коригування водно-фізичних властивостей зрошуваних ґрунтів [19]. Однак на той час було відсутнє кількісне термодинамічне обґрунтування такого коригування [19]. Все це спонукало до пошуку нових методів та розробки точніших та інформативніших методик визначення параметрів термодинамічного взаємозв'язку вологи з пористим середовищем ґрунтів.

Метою комплексних гідрофізичних досліджень є визначення основних водно-фізичних властивостей ґрунтів та констант, необхідних для ефективного проектування і управління водним режимом ґрунтів при вирощуванні сільськогосподарських культур на зрошуваних і осушуваних землях.

Пересування вологи в ґрунті обумовлено сукупністю фізичних і фізико-хімічних властивостей ґрунту. Найважливішими з них є основна гідрофізична характеристика (ОГХ), тобто залежність водоутримувальної здатності ґрунту від капілярного тиску, і функція вологопровідності, оскільки вони детермінують швидкість і напрямок пересування ґрунтової вологи, а отже інтенсивність зволоження і висихання, а також визначають термодинамічну доступність вологи для рослин. Тому важливим є розроблення методів для отримання залежностей, які пов'язують ємкісні властивості та силу стабілізації порового розчину каркасом ґрунтів. ОГХ визначає зв'язок тиску ґрунтової вологи (або еквівалентного термодинамічного потенціалу) з вмістом вологи в ґрунті, а функція вологопровідності визначає зв'язок коефіцієнта вологопровідності з потенціалом ґрунтової вологи, як основи градієнтної структури ґрунту.

Матеріали і методи дослідження. На основі стандартизованих методів [6; 8; 9] була розроблена удосконалена методика комплексних гідрофізичних досліджень із визначенням петлі капілярного гістерезису, що суттєво розширює інформативність випробувань, зокрема характеризує структуру порового простору досліджуваного ґрунту. Методика визначення гідрофізичних функцій обґрунтована на основі алгоритму розрахунку, здійсненого М.Ю. Дзекуновим та В.М. Солопенком [7], за певних технологічних уточнень проведення випробувань. Зокрема у запропонованій методиці зменшено опір керамічної мембрани зменшенням кількості фазових переходів, замість «рідина-рідина мембрани-повітря» реалізована схема «рідина-рідина мембрани-рідина». Методологія цих досліджень опублікована у [7; 11].

Надзвичайно важливою метою лабораторних досліджень є визначення водно-фізичних констант: повної вологомисткості (ПВ), найменшої вологомисткості (НВ), вологості в'янення (ВВ) та максимальної гігроскопічності (МГ) на єдиній кривій водоутримувальної здатності реальних ґрунтів, що поєднує ємнісні властивості та силу стабілізації води у гетерогенній системі ґрунту. Зокрема визначення цих водно-фізичних констант та ОГХ на одному зразку ґрунту виключає просторову варіабельність властивостей у ґрунтовому середовищі, що мінімізує кількість статистичних повторень.

Комплексність досліджень зразка ґрунту суттєво розширює їх інформативність. Визначення на частині порушеного ґрунту МГ у відповідності з вимогами чинного ГОСТ 28268–89 [4] дозволяє розрахувати вологість в'янення, питому поверхню ґрунту (S , м²/г) [2], адже визначення МГ теж носить термодинамічний характер. Тому ці визначення є інтегруючими властивостями ґрунтів і можуть співставляватись з гідрофізичними визначеннями водоутримувальної здатності у діапазоні доступної для рослин вологи. Суттєву перевагу також має методологія визначення петлі капілярного гістерезису при часовій асиметрії взаємодії вологи з ґрунтом на гілках швидкої десорбції від ПВ та повільної рівноважної сорбції. Теоретичною основою цього алгоритму є новостворена фізична модель порового простору ґрунту у вигляді гофрованого еквівалентного капіляра [11], яка

дозволяє отримувати нові знання про властивості ґрунту.

Зокрема окрім кривих водоутримувальної здатності або основної гідрофізичної характеристики (ОГХ) $\theta = f(P)$ на основі петлі капілярного гістерезису дана методика дозволяє оцінити структуру порового простору ґрунту як сумарний об'єм пор певного радіусу, що затискається у ґрунті між кривими десорбції та сорбції $V = f(r_a)$, що візуально відображає крива структурної характеристики. На основі кінетики десорбції є також можливість розрахунку значень вологопровідності ненасиченого ґрунту залежно від капілярного тиску або вологонасичення $K_p = f(P)$ [6], а також визначення на нормованому графіку кінетики десорбції значень найменшої вологомисткості.

Комплексні гідрофізичні дослідження зразків ґрунту непорушеної структури проводяться за радіальною схемою з центральним робочим зондом та двома контрольними тензіометрами на утворюючій циліндра (рис. 1).

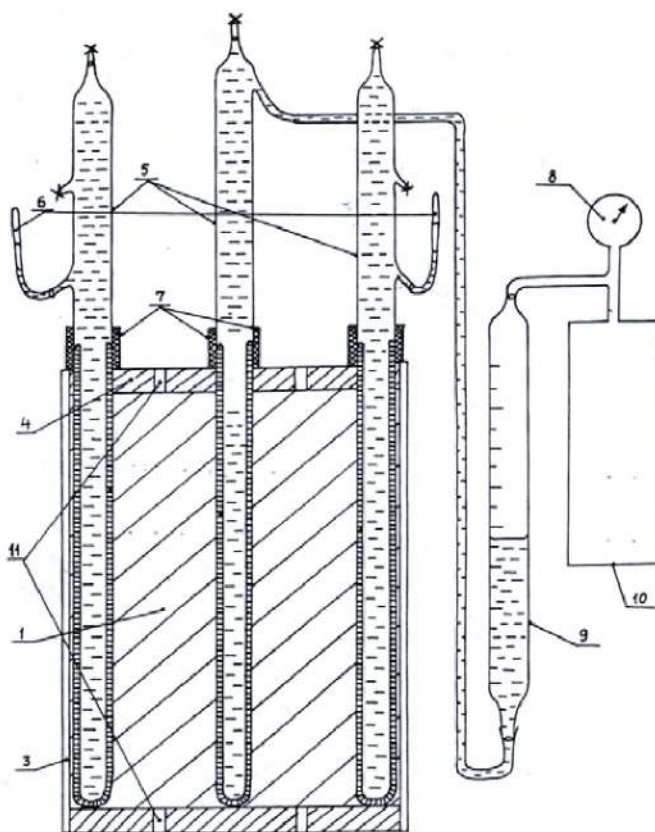


Рис. 1. Схема оснащення моноліту ґрунту:

- 1 – ґрунт; 2 – керамічні зонди; 3 – обойма;
- 4 – парафіно-бітумні корки; 5 – скляні газозловлювачі;
- 6 – індикаційні капіляри; 7 – резиніві з'єднувальні кільця;
- 8 – контрольний вакуумметр; 9 – вимірвальна бюретка;
- 10 – баластна ємність; 11 – отвори у корках, для зв'язку з атмосферою та подачі води

Джерело: [11]

Відповідно до поставленої мети у лабораторних дослідженнях визначено такі основні види робіт:

- відбір зразка ґрунту непорушеної структури (моноліту) у циліндричне кільце $\varnothing 12,0$ см і висотою 15,0 см в польових умовах, оснащення в лабораторії зразка ґрунту двома парафіно-бітумними корками, що жорстко фіксують об'єм зразка та вимірювання висоти цього циліндричного зразка, встановлення у зразку трьох керамічних зондів: двох зондів контрольних тензіометрів на боковій поверхні циліндра та центрального робочого зонда, через який проводять сорбцію та десорбцію ґрунту, згідно зі схемою рис. 1;

- насичення зразка у вакуумній камері до повної вологомісткості;

- монтаж системи контролю тиску та забезпечення зміни вологонасичення;

- проведення довготривалих (1–2 місяці) гідрофізичних випробувань за алгоритмом: швидка десорбція від ПВ – повільна рівноважна сорбція – повторна швидка десорбція;

- демонтаж оснащення, відбір з моноліту двох зразків ґрунту у ріжучі кільця та визначення кінцевої вологості і щільності його складення;

- розрахунки кривих водоутримувальної здатності, НВ, коефіцієнтів вологопровідності та побудова графіків $\theta = f(P)$, $K_p = f(P)$ та $V = f(r_a)$.

Результати дослідження і їх обговорення.

У свій час відомий вчений у царині гідрології ґрунтів О.О. Роде написав: «Гистерезис, который в настоящее время при термодинамической трактовке почвенно-гидрологических явлений обычно сознательно исключается из учета, представляет собой явление огромной важности не только в теоретическом отношении, но и при решении вполне практических задач» [17]. Аналіз одержаної у випробуваннях петлі капілярного гістерезису несе інформацію про структуру порового простору ґрунту [19]. Найінформативнішою є крива швидкої десорбції від ПВ, адже кожний поворот цієї кривої характеризує зміну сумарного об'єму певної групи пор.

Комплексні гідрофізичні випробування зразків ґрунту забезпечують визначення коефіцієнта вологопереносу K_p (вологовідності), який базується на кінетиці десорбції ґрунту, розрахунок яких був започаткований М.Ю. Дзекуновим та В.М. Солопенком [7]. При повному насиченні він відповідає коефіцієнту фільтрації – емпіричному параметру, що інтегрально відображає властивості порового простору проводити воду насиченого водою ґрунту.

При проведенні розрахунків використовуються експериментальні дані по циклу десорбції від ПВ, по яких будуються такі графіки:

- графік залежності вологості ґрунту від капілярного тиску вологи $\theta = f(P)$, тобто ОГХ;

- графік кінетики десорбції ґрунту $\theta = f(t)$ та графік $P = f(t)$.

ОГХ для будь-якого зразка ґрунту унікальна, оскільки безпосередньо пов'язана з гранулометричним, мікроагрегатним, агрегатним складом ґрунту, питомою поверхнею ґрунтових частинок і тому інтегрально характеризує структуру порового простору ґрунту і розподіл його за розмірами (радіусами).

Визначення гістерезису водоутримувальної здатності ґрунту за алгоритмом: швидка десорбція від ПВ – повільна рівноважна сорбція, фактично дозволяє побудувати графічно диференційну криву розподілу сумарного об'єму затиснутого повітря у порах певного радіусу. Але це лише один важливий аспект використання параметрів петлі капілярного гістерезису як різниці вологонасичення системи ґрунту за фіксованих значень капілярного тиску. Іншим, не менш важливим, аспектом інформативності гістерезису є використання співвідношення капілярного тиску (або радіусів пористості, згідно з формулою Жюрена) на гілках сорбції та швидкої десорбції за фіксованих значень вологонасичення. Фактично співвідношення $n = \frac{r_{\text{сорб}}}{r_{\text{десорб}}} \geq$

інтегрально характеризує співвідношення радіусів мінімального, коли дана група пор осушується, розкривається, та максимального радіусу групи пор, коли вони закриваються при сорбції.

За геометричними побудовами модельного простору з дисперсного матеріалу, що утворюють кульки однакового розміру, співвідношення $\frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{min}}}$ становить для кубічної, найпухкішої укладки кульок $n_{\text{куб}} = \frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{min}}} = 1,77$,

а для найщільнішої гексогональної упаковки кульок $n_{\text{гекс}} = 1,86$. Загалом для такого модельного середовища можна прийняти, що співвідношення радіусів елементарної пористості не перевищує $n \leq 2$. Для реального полідисперсного (складеного частками різних діаметрів) ґрунту може бути прийнято співвідношення $n \leq 2$, що характеризує первинну елементарну пористість між частками. Однак за параметрами гістерезису з певного радіусу (капілярного тиску) значення становить $n \geq 2$, що характеризує вже структурну макропористість.

Для функціонування ґрунту ця структурна макропористість є найціннішою, адже вона відіграє у ґрунті роль центрів термодинамічної нерівноважності і кислотних центрів (ЦТН+КЦ). Фактично значення $n = 2$ може бути прийнято за поріг, з якого поровий простір становить собою структурні макропори. Логічно, що розмір (r) цієї структурної макропористості для різних за дисперсністю ґрунтів (мул, пил, пісок) буде суттєво різним і може бути визначеним інтегрально лише за співвідношенням радіусів $\frac{r_{max}}{r_{min}}$. Це фактично робить непотрібною класифікацію [21], побудовану лише за радіусами пористості, але без врахування розмірів твердих часточок.

Отже іншим важливим аспектом використання петлі капілярного гістерезису, одержаною за пропонованим алгоритмом випробувань, є визначення розміру (радіусу) формування структурної макропористості за розмахом петлі гістерезису по тиску за фіксованої вологості ґрунту.

Процес повторної десорбції необхідний для зниження вологонасичення зразка ґрунту та визначення кінцевої вологості і щільності складення ґрунту без порушення його структури.

Проведення комплексних лабораторних гідрофізичних досліджень за цією удосконаленою методикою є порушуючим методом досліджень, тобто у процесі випробувань порушується структура ґрунту, що підтверджується неспівпадінням кривих першого і другого циклу десорбції.

Значення найменшої вологомісткості ґрунту поділяє нормовану криву кінетики швидкої десорбції $\theta = f(t)$, де перша похідна по часу $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 1$, на дві частини: інтенсивного гравітаційного стікання води за значень $\theta_i > НВ$; та гілку повільного зниження вологості, де $\theta_i < НВ$, на якій десорбція відбувається за рахунок всіх можливих способів – пересування плівкової води, пароподібної втрати води, споживання коренями рослин тощо.

Зазвичай одержані таким способом значення НВ є нижчими за одержані польовим способом заливних майданчиків, що загалом підвищує точність визначення НВ та знижує ризик виникнення непродуктивних інфільтраційних втрат поливної води при їх використанні у формуванні режимів зрошення. Нині дана методика визначення значень НВ проходить патентування.

Методика також дозволяє визначити МГ і її похідних характеристик: ВВ, питомої поверхні ґрунту (S), діапазону активної води (ДАВ=ПВ-ВВ), а також встановлення гранулометричного класу ґрунту за значеннями ВВ за [2]. Визначення МГ проводяться відповідно до вимог чинного ГОСТ 28268–89 [6].

На рис. 2–4 та у таблицях 1, 2 наведено приклад представлення результатів комплексних гідрофізичних досліджень ґрунтів ДП «ДГ «Брилівське».

Висновки. Комплексні лабораторні гідрофізичні випробування зразків ґрунту непорушеної структури, що доповнені визначенням

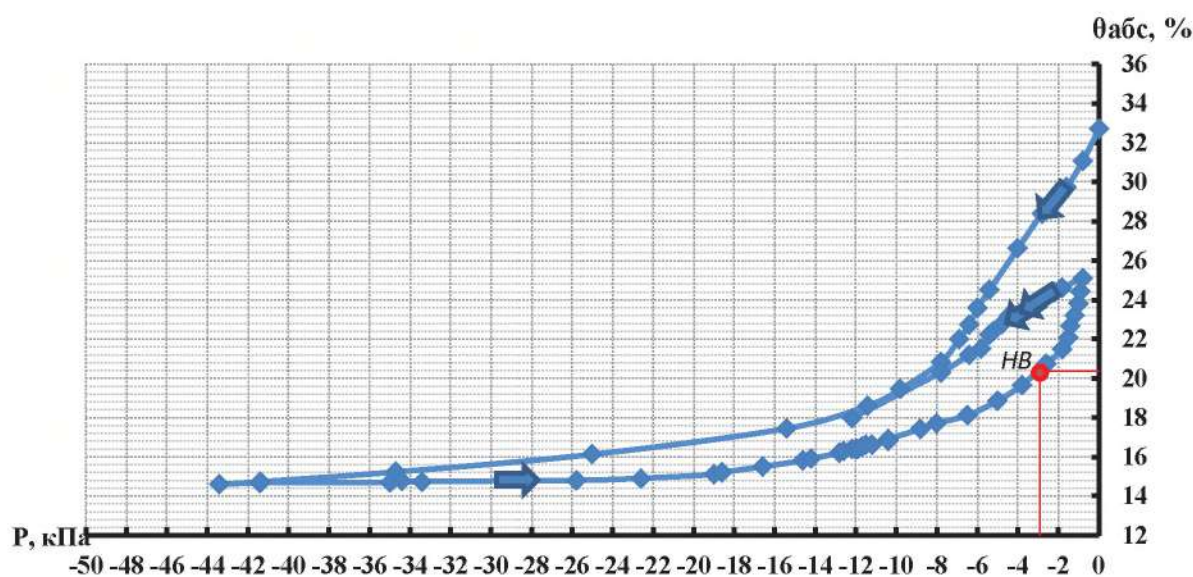


Рис. 2. Крива водоутримувальної здатності темного каштанового ґрунту, ОГХ $\theta = f(P)$, інтервал 0,05–0,20 м, зразок № 53

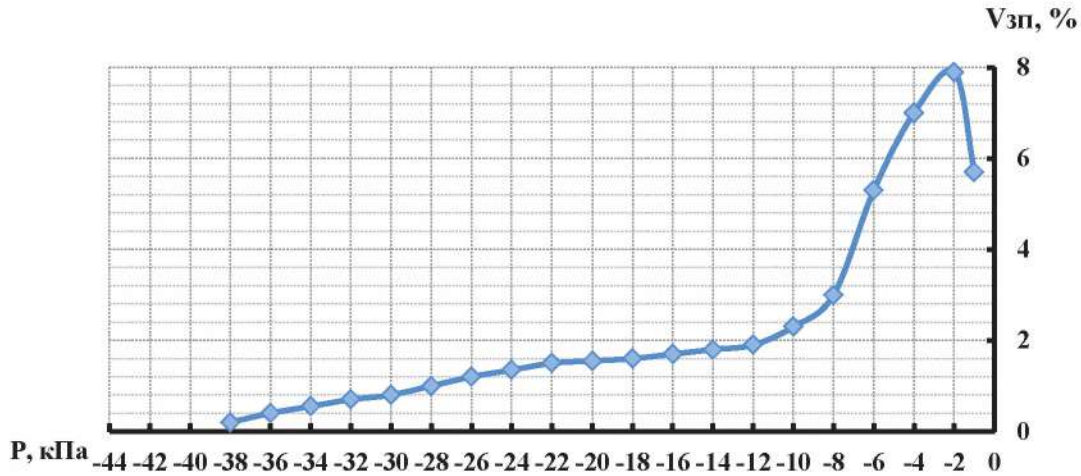


Рис. 3. Структурна характеристика порового простору ґрунту,
 $V_{зп} = f(P) = f(r_d)$, інтервал 0,05–0,20 м, зразок № 53

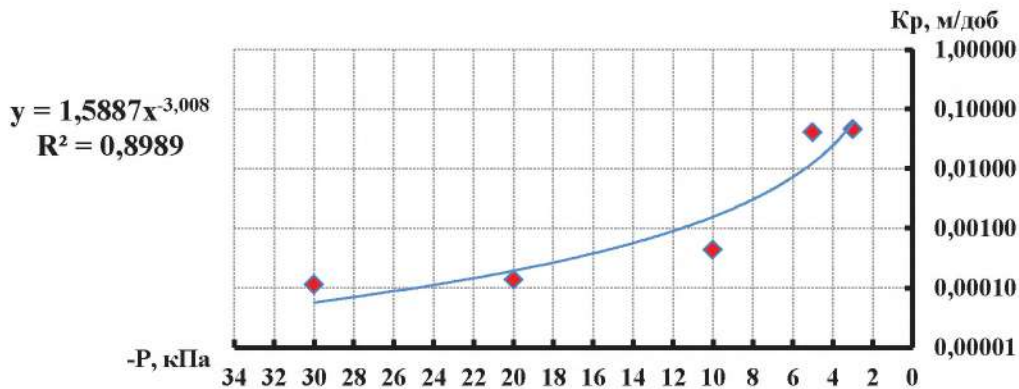


Рис. 4. Залежність вологопровідності ненасиченого ґрунту від капілярного тиску,
 $K_p = f(P)$, інтервал 0,05–0,20 м, зразок № 53

1. Результати лабораторних визначень водно-фізичних властивостей зразків із ґрунтового профілю ДП «ДГ Брилівське» (с. Привітне, Олешківського р-ну, Херсонської області)

Номер зразка	Інтервал, м	Кінцева щільність складення ρ_s , г/см ³	Питома поверхня S_p , м ² /г	МГ, % за масою	ВВ, % за масою	ПВ, % за об'ємом	НВ, % за об'ємом	НВ, % за масою	ДАВ=ПВ-ВВ	Гранулометричний клас ґрунту за ВВ
53	0,05-0,20	1,84	10,73	2,68	3,59	32,69	20,38	11,06	26,07	супісок – суглинок легкий
10	0,35-0,50	1,78	11,44	2,86	3,83	39,74	16,72	9,40	32,92	супісок – суглинок легкий
20	0,65-0,80	1,69	14,69	3,67	4,92	32,01	15,19	9,00	23,70	суглинок легкий

2. Залежність вологопровідності ненасиченого ґрунту $\left(K_p, \frac{\text{м}}{\text{доб}}\right)$ від капілярного тиску $K_p = f(P)$ для фіксованих значень P , кПа

Номер зразка	Інтервал, м	Капілярний тиск P , кПа					Регресійне рівняння
		-3	-5	-10	-20	-30	
53	0,05-0,20	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$y = 1,5887 \cdot x^{-3,01}$
10	0,35-0,50	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$y = 1,3721 \cdot x^{-2,27}$
20	0,65-0,80	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$y = 1,0671 \cdot x^{-2,63}$

максимальної гігроскопічної вологості за чинними методиками, дозволяють отримати для одного зразка ґрунту гідрофізичні функції: водоутримувальної здатності $\theta = f(P)$, вологопровідності $K_p = f(P)$ та водно-фізичні константи повної (ПВ) та найменшої вологомісткості (НВ), вологості в'янення (ВВ) і максимальної гігроскопічності (МГ), які в силу визначень на одному й тому ж зразку ґрунту розташовуються на одній кривій десорбції ґрунту від ПВ до МГ.

Особливістю методики є первинне насичення зразка ґрунту під вакуумом до повної вологомісткості (ПВ), що забезпечує одержання єдиної кривої водоутримувальної здатності з урахуванням структурної макропористості.

Одержання петлі капілярного гістерезису за алгоритмом швидкої нерівноважної десорбції від ПВ та повільної рівноважної сорбції дозволяє отримати нові знання про властивості ґрунту, зокрема побудувати диференційну криву розподілу об'єму пор за радіусами, що характеризує структуру порового простору ґрунту. Ці структурні характери-

стики є чутливими до ґрунтових процесів, за якими визначають напрямок епігенетичних змін структури порового простору ґрунтів та еволюцію ґрунтової матриці. За розмахом петлі капілярного гістерезису по тиску встановлюють пороговий розмір структурної макропористості ґрунту.

Загалом запропонована система лабораторного діагностування ґрунтів суттєво підвищує інформативність комплексних гідрофізичних випробувань та надає нові знання і якісно нову інформацію про ґрунти.

Результати лабораторних досліджень ґрунтів забезпечують одержання необхідних параметрів для процесу математичного моделювання процесів масообміну у ненасичених вологою ґрунтах зони аерації. Використання отриманих термодинамічно обґрунтованих параметрів ґрунтів в сучасній системі управління режимами зрошення, що розробляється в ІВПіМ і проходить тестування у господарствах, підвищує ефективність зрошення за мінімізації негативних екологічних наслідків іригації.

Бібліографія

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Москва : Агропромиздат, 1986. 416 с.
2. Вериго С.А., Разумова Л.А. Почвенная влага (применительно к запросам сельского хозяйства). Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. 328 с.
3. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. Москва : Изд. МГУ, 1984. 204 с.
4. Глобус А.М. Экспериментальная гидрофизика почв. Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. 355 с.
5. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Ленинград : Гидрометеиздат, 1987. 427 с.
6. ГОСТ 28268-89 Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. [Чинний від 1990-06-01]. Изд. офиц. Москва : Издательство стандартов, 1989. 10 с. (Межгосударственный стандарт).
7. Дзекунов Н.Е., Жернов И.Е., Файбишенко Б.А. Термодинамические методы изучения водного режима зоны аерации. Москва : Надра, 1987. 177 с.
8. ДСТУ ISO 11274:2001. Якість ґрунту. Визначання водоутримувальної характеристики. Лабораторні методи (ISO 11274:1998, IDT). [Чинний від 2003-07-01]. Вид. офиц. Київ : Держспоживстандарти України, 2003. 37 с. (Національний стандарт України).
9. ДСТУ ISO 11276:2001. Якість ґрунту. Визначання тиску порової води. Метод з використанням тензіометра. [Чинний від 2003-01-01]. Вид. офиц. Київ : Держспоживстандарти України, 2002. 32 с. (Національний стандарт України).
10. ДСТУ ISO 15709:2004 Якість ґрунту. Ґрунтова вода та ненасичена зона. Визначення, позначення та теорія. [Чинний від 2006-04-01]. Вид. офиц. Київ : Держспоживстандарти України, 2006. 14 с. (Національний стандарт України).
11. Коломієць С.С. Екологічна характеристика ґрунту // Вісник аграрної науки. Київ, 1999. № 12. С. 9–13.
12. Корнев В.Г. Всасывающая сила почвы и принципы системы автоматического орошения почвы. Москва : Издание ГИСХМ, 1925. 30 с.
13. Коссович П.С. Журнал опытной агрономии. Специальный журнал т.5, 1904. 84 с.
14. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. Москва : АН СССР, 1936. 316 с.
15. Муромцев Н.А. Мелиоративная гидрофизика почв. Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. 272 с.

16. Про схвалення Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року: схвал. розпор. Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 р. № 688-р. *Урядовий кур'єр*. 2019. 6 вер. (№ 170) С. 13–14.
17. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. т. 1. Ленинград : Гидрометеиздат, 1965. С. 663.
18. Ромащенко М.И. Некоторые аспекты обоснования уменьшения оросительных норм // Вестник аграрной науки. Киев, 1992. № 4. С. 35–39.
19. Ромащенко М.И. Концепция формирования водосберегающих экологически безопасных режимов орошения сельскохозяйственных культур. Экологические проблемы при водных мелиорациях : тезисы докладов научно-производственной конференции стран СНГ, г. Киев, 1995. С. 66–68.
20. Спосіб визначення структури порового простору ґрунтів (дисперсних середовищ) : Пат. 45287 Україна: МПК G01N15/08; заявл. 04.12.2008; опубл. 10.11.2009, Бюл. №21. 4 с.
21. Шейн Е.В. Курс физики почв : учебник. Москва : Изд-во МГУ, 2005. 432 с.

References

1. Vadyunyna, A.F., & Korchahyna, Z.A. (1986). *Metody yssledovaniya fizycheskykh svoystv pochv* [Methods of studying the physical properties of soils]. Moskva: Ahropromyzzdat. [in Russian].
2. Veryho, S.A., & Razumova, L.A. (1973). *Pochvennaya vlaha (prymenytel'no k zaprosam sel'skoho khozyaystva)* [Soil moisture (as applied to agricultural needs)]. Lenynhrad: Hydrometeoyzdat. [in Russian].
3. Voronyn, A.D. (1984). *Strukturno-funktsional'naya hydrofyzyka pochv* [Structural and functional hydrophysics of soils]. Moskva: Yzd. MHU. [in Russian].
4. Hlobus, A.M. (1969). *Eksperymental'naya hydrofyzyka pochv* [Experimental soil hydrophysics]. Lenynhrad: Hydrometeoyzdat. [in Russian].
5. Hlobus, A.M. (1987). *Pochvenno-hydrofyzicheskoe obespechenye ahroekolohycheskykh matematycheskykh modeley* [Soil hydrophysical information for agro-ecological modelling]. Lenynhrad: Hydrometeoyzdat. [in Russian].
6. *Pochvy. Metody opredeleniya vlazhnosti, maksimal'noy gigroskopycheskoy vlazhnosti y vlazhnosti ustoychyvoho zavyadaniya rasteniy* [The soil. Methods for determination of moisture, maximum hygroscopic moisture and wilting moisture plants]. (1990). GOST 28268-89. *Mezhhosudarstvennyi standart*. Moskva: Yzdatel'stvo standartov. [in Russian].
7. Dzekunov, N.E., Zhernov, Y.E., & Faybishenko, B.A. (1987). *Termodynamycheskiye metody yzucheniya vodnoho rezhyma zony aeratsyy* [Thermodynamic methods for studying the water regime of the aeration zone]. Moskva: Nadra. [in Russian].
8. *Yakist' gruntu. Vyznachannya vodoutrymuval'noyi kharakterystyky. Laboratomi metody: GOST* [Soil quality. Determination of water retention characteristics. Laboratory methods]. (2003). (ISO 11274:1998, IDT). DSTU ISO 11274:2001. *Natsionalnyi standart Ukrainy*. Kyiv: Derzhspozhyvstandarty Ukrayiny. [in Ukrainian].
9. *Yakist' gruntu. Vyznachannya tysku porovoyi vody. Metod z vykorystanniam tenziometra*. [Soil quality. Determination of pore water pressure. Method using a tensiometer]. (2002). *Natsionalnyi standart Ukrainy*. Kyiv: Derzhspozhyvstandarty Ukrayiny. [in Ukrainian].
10. *Yakist' gruntu. Gruntova voda ta nenasychena zona. Vyznachennya, poznachennya ta teoriya* (2004). *Natsionalnyi standart Ukrainy*. Kyiv: Derzhspozhyvstandarty Ukrayiny. [in Ukrainian].
11. Kolomiyets, S.S. (1999). *Ekolohichna kharakterystyka gruntu* [Ecological characteristics of the soil]. *Visnyk aharnoi nauky*, 12, 9–13. [in Ukrainian].
12. Kornev, V.H. (1925). *Vsasyvayushchaya syla pochvy y pryntsyipy systemy avtomatycheskoho orosheniya pochvy* [The suction force of the soil and the principles of the system of automatic irrigation of the soil]. Moskva: Yzdanye HYSKhM. [in Russian].
13. Kossovych, P.S. (1904). *Zhurnal opytnoy ahronomyy* [Journal of Experimental Agronomy]. *Special journal*, 5. [in Russian].
14. Lebedev, A.F. (1936). *Pochvennye y hruntovye vody* [Soil and groundwater]. Moskva: AN SSSR. [in Russian].
15. Muromtsev, N.A. (1991). *Melyoratyvnaya hydrofyzyka pochv* [Soil reclamation hydrophysics]. Lenynhrad: Hydrometeoyzdat. [in Russian].
16. *Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny Pro skhvalennya Stratehiyi zroshenniya ta drenazhu v Ukrayini na period do 2030 roku № 688* [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine on the Approval of the Irrigation and Drainage Strategy in Ukraine until 2030 year № 688]. (2019, September 6). *Uryadovyy kur'yer*, 170, 13–14. [in Ukrainian].

17. Rode, A.A. (1965). *Osnovy uchenyya o pochvennoy vlahе* [Soil Moisture Basics]. Leningrad: Hydrometeoizdat. [in Russian].
18. Romashchenko, M.Y. (1992) *Nekotorye aspekty obosnovaniya umen'shenyya orosytel'nykh norm*. *Vestnyk ahrarnoy nauky*, 4, 35–39. [in Russian].
19. Romashchenko, M.Y. (1995). *Kontseptsyya formirovaniya vodosberehayushchykh ekolohychesky bezopasnykh rezhymov orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur*. *Ekolohycheskye problemy pry vodnykh melyoratsyyakh : tezysy dokladom nauchno-proyvodstvennoy konferentsyy stran SNH* [The concept of the formation of water-saving environmentally security irrigation regimes of crops]. *Ekolohycheskye problemy pry vodnykh melyoratsyyakh: Nauchno-proyvodstvennoy konferentsyy stran SNH*, Kyev: IHEaLR UAAN, 66–68. [in Ukrainian].
20. Yatsyk, M.V., & Kolomiyets', S.S. (2009). *Sposib vyznachenniya struktury porovoho prostoru gruntiv (dyspersnykh seredovyshch)* [Method for determination of structure of porous space of earths (disperse media)]. Patent of Ukraine. №45287. [in Ukrainian].
21. Sheyn, E.V. (2005). *Kurs fyzyky pochv* [Soil Physics Course]: *uchebnyk*. Moskva: Yzd-vo MHU. [in Russian].

М.И. Ромащенко, С.С. Коломиец, А.С. Белоброва

Система лабораторной диагностики водно-физических свойств почв

Аннотация. В связи с глобальными изменениями климата для всех почвенно-климатических зон Украины орошение стало определяющим фактором в формировании биопродукционных процессов новых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур. При этом эффективность орошения в значительной степени определяется достоверностью водно-физических свойств почв. Целью комплексных гидрофизических исследований было определение основных водно-физических свойств почв и констант, необходимых для создания благоприятных почвенных режимов мелиорированных земель и математического моделирования водного режима почв. Комплексные лабораторные гидрофизические испытания образцов почв ненарушенной структуры позволяют определить для одного образца почвы гидрофизические функции: водоудерживающей способности, влагопроводности и водно-физические константы полной и наименьшей влагоемкости, влажности завядания и максимальной гигроскопической влажности, которые в силу определений на одном и том же образце почвы располагаются на одной кривой десорбции почвы от полной влагоемкости до максимальной гигроскопической влажности. Первичное насыщение образца почвы под вакуумом до полной влагоемкости обеспечивает получение единственной кривой водоудерживающей способности с учетом структурной макропористости, что является главной особенностью данной методики. Полученная петля капиллярного гистерезиса за алгоритмом: быстрая неравновесная десорбция от полной влагоемкости и медленная равновесная сорбция позволяет построить дифференциальную кривую распределения объема пор по радиусам, характеризующая структуру порового пространства почвы. Эти структурные характеристики чувствительны к почвенным процессам, по которым определяется направление эволюции почвенной структуры порового пространства почв и направление эволюции почвенной матрицы. Из петли капиллярного гистерезиса по соотношению радиусов менисков превышающего $n = \frac{r_{сорб}}{r_{десорб}} \geq 2$, устанавливается порог образования структурной макропористости почвы. Предлагаемая система лабораторного диагностирования почв имеет преимущества над существующими методами диагностики, существенно повышает информативность комплексных гидрофизических испытаний, предоставляет качественно новую информацию о почвах и обеспечивает математическое моделирование необходимыми параметрами процессов массообмена в ненасыщенных влагой почвах зоны аэрации.

Ключевые слова: лабораторное диагностирование почв, водно-физические свойства и константы, гидрофизические функции, капиллярный гистерезис, структурная макропористость.

M.I. Romashchenko, S.S. Kolomiets, A.S. Bilobrova

Laboratory diagnostic system for water-physical soil properties

Abstract. Irrigation has become a determining factor in the formation of bioproduction processes of new agricultural crop varieties and hybrids due to global climate change for all soil-climatic zones of Ukraine. Moreover, irrigation efficiency is determined to a significant degree by the reliability of the soil water-physical properties. The purpose of comprehensive hydrophysical studies was to determine the basic soil water-physical properties and constants necessary to create favorable soil regimes of reclaimed lands, and to do mathematical modeling of the soil water regime. Complex laboratory hydrophysical tests of soil samples of undisturbed structure make it possible to determine hydrophysical functions for each soil sample: water holding capacity, water conductivity and water-physical constants of full and minimum moisture capacity, wilting moisture and maximum hygroscopic moisture, which can be determined on the

same soil sample located on the same soil desorption curve from full moisture capacity to maximum hygroscopic humidity. The primary saturation of the soil sample under vacuum to full moisture capacity provides a single curve of water retention capacity taking into account structural macroporosity, which is the main feature of this technique. The resulting capillary hysteresis loop has the algorithm: fast nonequilibrium desorption from full moisture capacity and slow equilibrium sorption enables to build a differential curve of the distribution of pore volume over radii, characterizing the structure of the soil pore space. These structural characteristics are sensitive to soil processes, which determine the direction of epigenetic changes in the structure of the soil pore space and the direction of soil matrix evolution. The threshold of formation of structural soil macroporosity is established from the loop of capillary hysteresis by the ratio of meniscus radii exceeding $n = \frac{r_{\text{сорб}}}{r_{\text{десорб}}} \geq 2$. The proposed system of soil laboratory diagnostics has advantages over the

existing diagnostic methods, significantly increases the information content of complex hydrophysical tests, provides qualitatively new information on soils as well as the mathematical modeling with the necessary parameters of mass transfer processes in the moisture-saturated soils of the aeration zone.

Key words: soil laboratory diagnostics, water-physical properties and constants, hydrophysical functions, capillary hysteresis, structural macroporosity.