

УДК 631.584.9 551.525

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ НЕІЗОТЕРМІЧНОГО МАСООБМІНУ
В ҐРУНТАХ І ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ
В ІННОВАЦІЙНИХ АГРОТЕХНОЛОГІЯХ**

С.С. КОЛОМІЄЦЬ, О.В. ЯСЕНЧУК

Інститут водних проблем і меліорації НААН

Представлені результати лабораторних експериментальних досліджень механізму неізотермічного масообміну у ненасичених ґрунтах, що доводять наявність неізотермічної циркуляції вологи в різному фазовому стані. При цьому розчинені солі конвективно пересуваються до фронту випаровування в нагрітій частині ґрунту. Експеримен-

© С.С. Коломієць, О.В. Ясенчук, 2014

Меліорація і водне господарство. 2014. Вип. 101

тально підтверджено, що термопересування пари відбувається, головним чином, не за рахунок фізичного механізму термодифузії, а конвективними потоками повітря у вільному поровому просторі ґрунту. Окреслені перспективи використання закономірностей неізотермічного масообміну в інноваційних агротехнологіях.

Ключові слова: неізотермічний масообмін, ненасичений ґрунт, фазовий стан, термопересування пари, поровий простір, інноваційні агротехнології

У наукових установах аграрного спрямування ще з радянських часів накопичена велика кількість матеріалів польових дослідів з оцінки окремих елементів агротехнологій, способів та глибини обробітку ґрунту, ефективності дії різних ґрунтообробних пристроїв, систем удобрень, сівозмін, меліоративних заходів і т.і., проведених на різних типах ґрунтів у різних природних зонах. Ефективність того чи іншого фактора оцінювали за біоіндикацією, тобто врожайністю певних сільськогосподарських культур, не розглядаючи детально фізику процесів, тобто базувалися на моделі «чорного ящика», що розглядає входи (фактори) і виходи (відгуки) надскладної системи ґрунту у взаємодії з рослинами і кліматом. Тому, окрім некоректності порівнянь та розповсюдження результатів цих дослідів на інші ґрунти і кліматичні умови, неврахування фізики процесів енергомасообміну у ґрунтовому середовищі призводить до еволюційних процесів його деградації та зниження родючості ґрунтів при їх землеробському використанні, що фіксує ДУ «Держґрунтохорона» України. Результати цих дослідів ще чекають узагальнення на більш високому рівні аналізу.

У той же час існують глибокі дослідження фізики ґрунтових процесів як вітчизняних, так і зарубіжних авторів і наукових колективів, таких, наприклад, як праці Агрофізичного інституту (АФІ), які, на жаль, не знайшли за радянських часів прикладного застосування в агротехнологіях, але є невикористаним і невичерпаним резервом для розроблення інноваційних агротехнологій.

Одним із таких перспективних напрямів використання наукових надбань в агротехнологіях є закономірності неізотермічного масообміну у ґрунтовому середовищі, що дозволяють скеровувати і цілеспрямовано концентрувати потоки вологи і поживних речовин.

Експериментально встановлено, що волога у ненасиченому ґрунті пересувається за потоком тепла, переважно у пароподібному стані [1–

3]. Термопотік пари при цьому не може бути забезпечений тільки за рахунок механізму термодифузії, оскільки в декілька разів перевищує термодифузійний потік пари [3]. Найприйнятнішим поясненням термопотіку пари такої інтенсивності є його конвективне перенесення з потоком ґрунтового повітря, що виникає під дією теплового ковзання повітря у поровому просторі ґрунту [4].

Для з'ясування ступеня впливу потоку тепла на розподіл вологи в ізольованих зразках ґрунтів було проведено 4 серії лабораторних експериментів: I. З перерозподілу вологи під дією потоку тепла в ізольованих зразках. II. Використання методу мічення рідкої фази. III. Визначення коефіцієнтів термопереносу пари з використанням фазових бар'єрів. IV. Встановлення параметрів проникності рідкої й парової фази на одному й тому ж зразку ґрунту.

Матеріали та методи досліджень

I серія експериментів. Зразок лесовидного суглинку неперушеної структури в циліндричній обоймі розташовували між камерами, в яких за допомогою рідинних термостатів (термостат СЖМЛ – 2,5) підтримували задану температуру з точністю $\pm 0,1$ °С. Для контролю температури по довжині зразка ґрунту використовували диференційну хромель-алюмелеву (ХА) термопару з шістьма зпаями. Для контролю вологості по довжині зразка використовували гідрофізичний метод, що базується на вимірюванні тензіометрами еквівалента тиску порової вологи ненасиченого ґрунту (p , кПа).

Під час проведення лабораторного експерименту визначено п'ять етапів: на перших трьох дослід з неізотермічного масоперенесення проводили за різного вологонасичення ґрунту, на четвертому етапі була змінена середня абсолютна температура, а на п'ятому дослід проводили за наявності фазового бар'єра в зразку ґрунту, що був проникний для пароподібної вологи, але практично непроникний для рідкої капілярної вологи. Дослідження проводили в реальному для природних ґрунтів діапазоні температур – від 20 до 45 °С, за створюваних реальних градієнтів температури 0,4–0,5 град/см, що зазвичай спостерігаються у ґрунтовому профілі протягом вегетаційного періоду.

За критерій неізотермічного перерозподілу вологи в ізольованому зразку ґрунту використовували перепад тиску порової вологи (Δp_{max} , кПа), що спостерігався в ньому за стабілізації водного й теплового режимів.

Результати та обговорення. Отримані результати досліджень наведені в табл. 1.

1. Результати визначення впливу теплового потоку через зразок ненасиченого лесовидного суглинку на перерозподіл у ньому вологи

№ етапу	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{ср}}, \%$	$\Delta p_{\text{max}}, \text{кПа}$	Примітки
I	24,4	37,4	30,9	13,0	19,44	5,9	
II	23,9	37,9	30,9	14,0	17,22	7,2	
III	24,6	38,9	31,75	14,3	16,51	11,0	
IV	29,6	43,0	36,3	13,5	16,51	12,4	
V	28,8	43,3	36,05	14,5	16,51	27,0	з фазовим бар'єром

Зі створенням потоку тепла через ізольований зразок ґрунту в ньому починається перерозподіл вологи: пересуваючись за потоком тепла переважно в пароподібному стані та конденсуючись у зоні зниженої температури створюється зворотно спрямований градієнт потенціалу капілярної вологи на фоні нерівномірного по довжині зразка ґрунту вологонасичення. При цьому у замкненій системі зразка ґрунту спостерігаються два протилежно спрямованих потоки вологи у різному фазовому стані – за потоком тепла у пароподібному стані під дією силового поля температур, а у зворотному напрямку – у рідкому стані під дією силового поля потенціалу вологи. Тобто у зразку ґрунту існує постійна циркуляція вологи у різному фазовому стані. А при встановленні у зразку ґрунту теплового і водного режимів настає динамічна рівновага цих потоків у кожному перерізі зразка ґрунту. Саме при усталеному режимі і визначали максимальний перепад тиску порової вологи ($\Delta p_{\text{max}}, \text{кПа}$), що слугувало мірилом швидкості зворотно спрямованого потоку вологи у рідкому стані.

Результати перших чотирьох етапів дослідження, наведених у табл. 1, свідчать, що зниження вологонасичення, підвищення градієнта температури та збільшення середньої абсолютної температури призводять до зростання Δp_{max} , тобто до активізації термопотoku вологи. При усуненні теплового потоку через зразок з часом відновлюється рівномірність вологонасичення ґрунту по його довжині.

Наявність такої циркуляції у різному фазовому стані доводить п'ятий етап дослідження, на якому зразок ґрунту був перерізаний і між двома його половинами встановлений фазовий бар'єр з латунної сітки, що був проникний для пароподібної вологи, але непроникний для рідкої капілярної вологи. При цьому розрив зворотно спрямованого потоку рідкої вологи

призводить до односпрямованого висушування нагрітої половинки та зволоження за рахунок конденсації пари холодної половинки зразка ґрунту. Зафіксована різниця Δp_{max} більш ніж удвічі перевищує перепад тиску порової вологи на всіх попередніх етапах досліду. При цьому цей процес далекий від завершення. А після усунення теплового потоку і вирівнювання температури обох половинок зразка ґрунту різниця тиску $\Delta p_{max} = 27 \text{ кПа}$, тобто зберігається різниця вологонасичення між ними. Представлені дані засвідчують суттєвий вплив теплоструму пароподібної вологи на розподіл вологи в ізолюваному зразку ґрунту.

II серія експериментів. Наявність у ґрунті неізотермічних умов циркуляції вологи в різному фазовому стані також доводить лабораторний дослід з використанням методу мічення рідкої фази.

Цей дослід полягає в тому, що за наявності циркуляції вологи в ґрунті в різному фазовому стані розчинені солі конвективним шляхом підтягуються в нагріту частину зразка до фронту випаровування, де і зростає їхня концентрація.

У проведеному досліді в якості мічення рідкої фази вологи використовували сіль $NaCl$ з початковою концентрацією хлору $7,5 \text{ г/дм}^3$. За неізотермічного процесу циркуляції вологи, у нагрітій частині зразка ґрунту вміст хлору зріс до $12,07 \text{ г/дм}^3$, а у холодній частині зменшився до $4,89 \text{ г/дм}^3$, що встановили за відбором проб порового розчину за методом вакуумних витяжок і подальшим хіманалізом вмісту хлору в розчині. Градієнт концентрації хлору в неізотермічних умовах сягнув $0,279 \frac{\text{г/дм}^3}{\text{см}}$, або $27,9 \frac{\text{г/дм}^3}{\text{м}}$.

Такий значний градієнт концентрації в природних умовах не може бути створений лише за рахунок дифузійних (термодифузійних) процесів у рідкій фазі порового розчину, що надає значної ваги саме специфічній неізотермічній циркуляції вологи в природних ґрунтах у різному фазовому стані. Цей факт також може слугувати поясненням того феномену, що приповерхневі шари ґрунту не відмиті повністю від водорозчинних солей низхідними потоками вологи, які інфільтруються, навіть за умов гумідного клімату.

Лабораторними дослідями підтверджено, що в загальному випадку швидкість теплоструму вологи пропорційна градієнту температури ($\text{Grad } T^\circ\text{C}$), а це аналогічно градієнту потенціалу вологи ($\text{Grad } h$) за ізо-термічного вологообміну. Тому за неізотермічних умов необхідно

враховувати, що волога у ненасиченому ґрунті пересувається під дією двох силових полів – поля потенціалів вологи та поля температур у різному фазовому стані. Окрім цього, інтенсивність термопересування вологи визначається абсолютною середньою температурою зразка (див. табл. 1 III та IV етапи дослід), оскільки у досліджуваному діапазоні вологості ґрунтового повітря має практично 100% відносну вологість, а із зростанням абсолютної температури кількість у повітрі водяної пари для його насичення зростає.

Однак головним чинником, що визначає інтенсивність термопересування вологи, є наявність у ґрунті вільного від води порового простору, який є функцією вологонасичення, дисперсності та щільності складення. Адже через вільний поровий простір здійснюється конвективне транспортування пароподібної вологи за потоком тепла.

III серія експериментів. Графік залежності коефіцієнта термопереносу ($K_{тп}$) має максимум за певного вологонасичення. Такі графіки наведені у [1, 2] та були отримані експериментально (рис. 1).

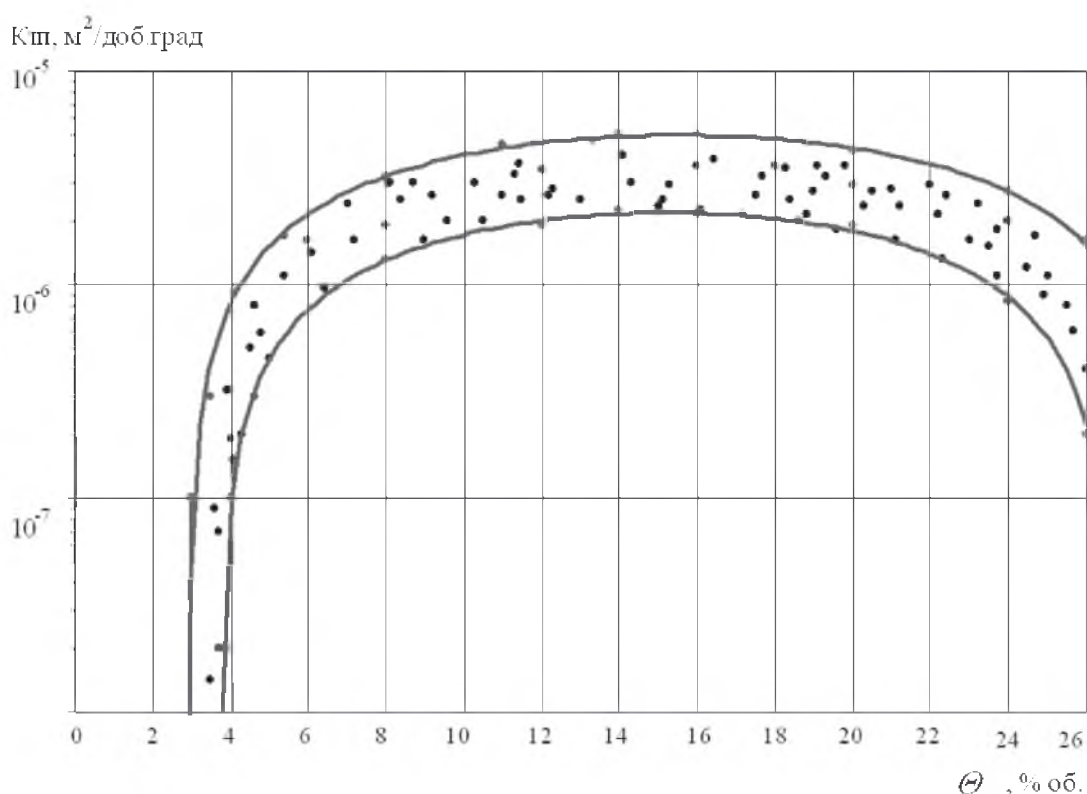


Рис. 1. Експериментально встановлені значення коефіцієнтів термопереносу пари ($K_{тп}$) при різних значеннях вологості ґрунту ($\theta, \%$) (лесовидний суглинок)

Суть лабораторного експерименту з визначення інтенсивності теплопереносу пари полягає в тому, що через теплоізований зразок лесовидного ґрунту однорідної вологості, поділеного фазовими бар'єрами на чотири частини, створювався за допомогою термостатів потік тепла, у кожній з чотирьох секцій цього зразка контролювалась температура та маса секції (методом зважування). Заміри проводили щодоби і за отриманими результатами розраховували $K_{ТП}$ між секціями 3–4, 4–5 та 5–6 зразка ґрунту згідно з розрахунковою схемою, що наведена на рис. 2 за залежністю:

$$K_{ТП} = \frac{\Delta M}{\frac{T_i - T_{i+1}}{l} \cdot F \cdot \Delta \tau} \left[\frac{m^2}{\text{доб} \cdot \text{град.}} \right]$$

де: $K_{ТП}$ – коефіцієнт теплопереносу;

ΔM – зміна маси секції, г ($m^3 H_2O$);

$\frac{T_i - T_{i+1}}{l}$ – градієнт температури $\text{GradT}^\circ\text{C}$, $\frac{\text{град.}}{m}$;

F – площа перерізу зразка ґрунту, m^2 ;

τ – час, діб.

Наявність максимуму на залежності $K_{ТП} = f(\theta)$ на гілці зниження вологонасичення ($\theta < 16\%$) (рис. 1) зумовлена зниженням відносного вологонасичення повітря у зразку, за достатньої частки вільного порового простору. При відхиленні від максимуму $K_{ТП}$ у бік зростання ($\theta > 16\%$) – зниження $K_{ТП}$ обумовлене зменшенням об'єму вільного від води порового простору, тобто лімітуючим чинником стає переріз конвективного потоку повітря, що транспортує пароподібну вологу.

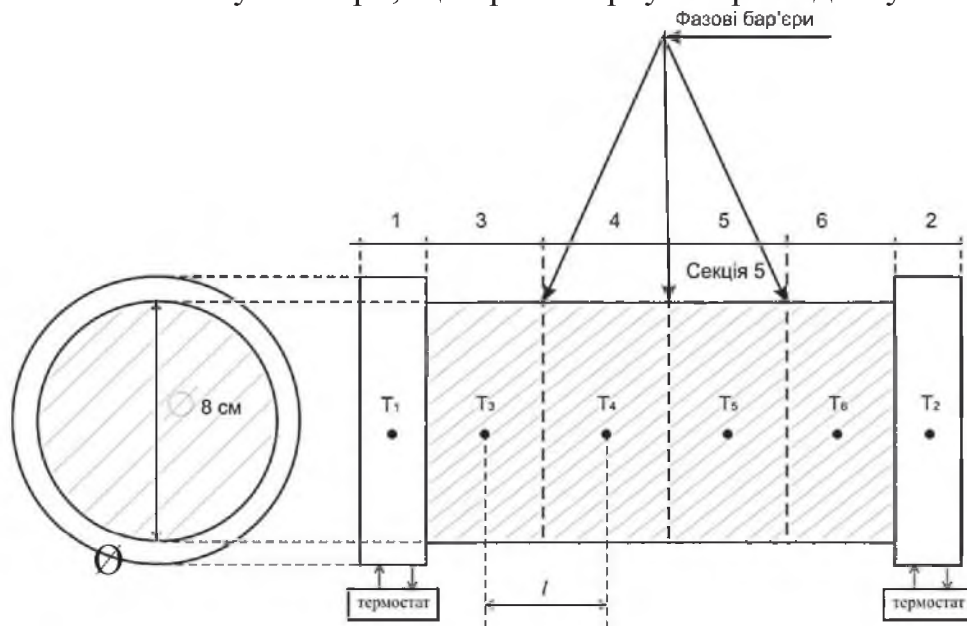


Рис. 2. Розрахункова схема експерименту з неізотермічного масообміну

Залежно від дисперсності ґрунту змінюється конфігурація порового простору і розміри переважаючої пористості, які й визначають форму кривої залежності $K_{\text{гп}} = f(\theta)$, а також розташування на ній максимуму [2]. За зміни щільності складення одного й того ж ґрунту також змінюється інтенсивність термопереносу вологи – із зниженням щільності складення кількість вологи, що пересувається під дією градієнта температури, зростає [1].

IV серія експериментів. Для кількісного оцінювання процесу неізотермічного масообміну надзвичайно важливо встановити співвідношення швидкостей термопереносу пари та вологопереносу рідкої вологи, оскільки розподіл вологи у ґрунті у кожний момент часу залежить від швидкостей обох різноспрямованих потоків вологи у різному фазовому стані. Визначення швидкостей обох потоків провели на одному й тому ж зразку лесовидного суглинку на експериментальній установці, схема якої наведена у [5, с. 331]. Зразок ґрунту непорушеної структури у жорсткій металевій обоймі встановлювали між двома камерами з напівпроникними керамічними мембранами, в яких поступово по щаблях задавався від’ємний тиск, що призводило до зміни вологонасичення ґрунту. На кожному щаблі тиску визначали усталені витрати вологи під дією сталих градієнтів температури і капілярного потенціалу. Причому коефіцієнт вологоперенесення визначали за відсутності перепадів температури, а коефіцієнт термопереносу – за відсутності перепаду потенціалу вологи. Крім цього, на тому ж пристрої проводили визначення коефіцієнта термодифузії пари за відсутності ґрунту між камерами. Результати цих визначень представлені у графічній формі на рис. 3 та у табл. 2.

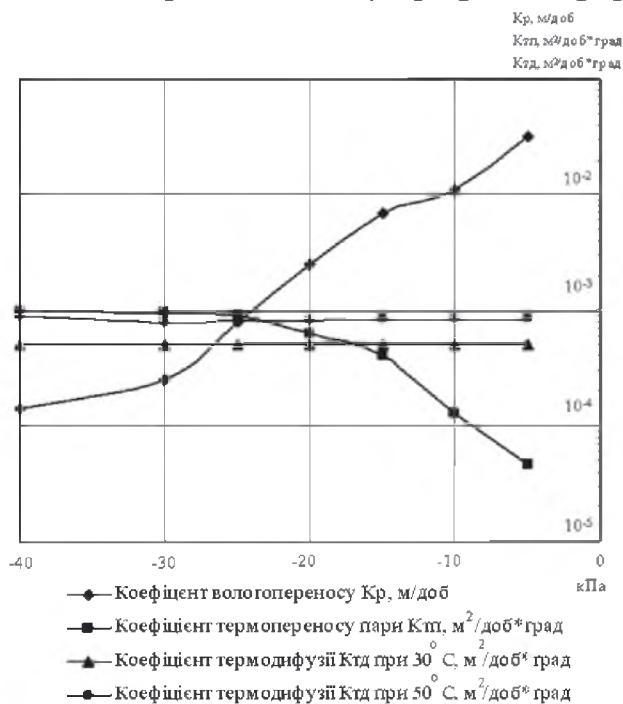


Рис. 3. Дані експериментального визначення коефіцієнтів переносу у різному фазовому стані при різних значеннях еквівалента тиску вологи P , кПа

**2. Коефіцієнти ізотермічного перенесення вологи та
термоперенесення пари в неізотермічних умовах при зміні
вологонасичення ґрунту**

№	Коефіцієнти	Тиск, кПа						
		-5	-10	-15	-20	-25	-30	-40
1	вологопереносу K_p , м/доб	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
2	термопереносу пари $K_{тп}$, $m^2/доб \cdot град$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
3	Термодифузії пари $K_{тд}$ при $30 \text{ }^\circ\text{C}$ $m^2/доб \cdot град$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
4	Термодифузії пари $K_{тд}$ при $50 \text{ }^\circ\text{C}$ $m^2/доб \cdot град$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$

Аналіз рис. 3 свідчить про те, що при певному вологонасиченні, яке відповідає еквіваленту тиску мінус 30 кПа, швидкості потоків пари і рідини за одиничних градієнтів силових полів рівні, а за подальшого зниження вологонасичення швидкість потоку пари навіть стає вищою за швидкість потоку рідини.

Найважливішим висновком з цього експерименту є співставляваність значень потоків рідини і пари у поровому просторі ґрунту. Отримані за двох різних середніх температур 30 та 50 °С значення коефіцієнта термодифузії пари ($K_{тд}$) свідчать, що за рахунок лише термодифузійного механізму не може бути забезпечений фактичний потік пари визначеної інтенсивності у ґрунті, адже $K_{тд}$ отриманий за відсутності зразка ґрунту, тобто при 100% пористості. Хоча у реальному ґрунті вільна пористість становить 10–20% від перерізу зразка. Цей факт свідчить на користь гіпотези термоперенесення пароподібної вологи конвективними потоками повітря, що виникають у капілярах ґрунту в результаті теплового ковзання газів, що складають ґрунтову атмосферу [4]. Підтвердження цього положення має важливі наслідки, адже в цьому випадку винесення пароподібної вологи з ґрунту до атмосфери, тобто власне випаровування (евапорація), здійснюється цими конвективними циркуляційними потоками повітря. У загальному випадку випаровування з ґрунту, або конденсація у ґрунті вологи, залежатиме

від співвідношення абсолютного вологонасичення ґрунтового повітря, що циркулює, вологонасичення приземних шарів атмосферного повітря, а також від інтенсивності теплового ковзання газів у ґрунті. Попередні розрахунки і лабораторні дослідження підтверджують прийнятність такого підходу до розрахунку неізотермічного процесу випаровування вологи з ґрунту.

Перспективи використання. Результати проведених лабораторних експериментів наочно демонструють суттєвий вплив термічного режиму на розподіл вологи і розчинних солей у замкненій системі зразків ґрунту. В натурних умовах у ґрунтах пересування вологи також відбувається під дією двох силових полів. Отримані закономірності неізотермічного масообміну мають важливе значення для розроблення інноваційних меліоративних агротехнологій. Адже в умовах змін клімату, зростаючого дефіциту водних ресурсів та персоніфікації земель стають затребуваними агротехнології, що базуються на економному і ефективному використанні факторів росту сільськогосподарських культур, і у першу чергу, економному використанні вологи наявних водних ресурсів.

Наприклад, тінь від крони рослини (дерева), створюючи зону зниженої температури у ґрунті, фактично забезпечує умови підживлення кореневої системи горизонтальними потоками пароподібної вологи протягом вегетаційного періоду.

Застосування принципу планово-просторового концентрування вологи у ґрунтовому середовищі (гетерогенності поля) може суттєво відсунути південніше границю зони ризикованого землеробства і розширити зону, у межах якої можна отримувати гарантовані врожаї певних сільськогосподарських культур.

Наприклад, для збереження цінних сортів винограду під час посухи у Криму у 40-х–50-х роках минулого сторіччя у кореневу систему кущів ін'єктували по 20–30 л води. Це допомагало не тільки врятувати кущ винограду, але й з'ясувалось, що контур зволоження від ін'єкції продовжував існувати протягом практично всього вегетаційного періоду, тобто відбувався ефект самопідтримування цього контуру підвищеної вологості і, найвірогідніше, саме за рахунок планово-просторового підживлення його пароподібною вологою. Цей принцип зволоження може бути використаний в агротехнологіях вирощування багаторічних культур за дефіциту водних ресурсів. А якщо його

доповнити фазовим бар'єром, штучно створеним у ґрунтовому середовищі, то в цьому випадку є реальна перспектива вирощування багаторічних культур на засолених ґрунтах і, вірогідно, навіть за використання мінералізованої води для зволоження, особливо у комплексі з краплинним зрошенням.

Ще одним прикладом використання закономірностей неізотермічного масообміну є інтерпретація «Новой системы земледелия» Івана Овсинського [6]. Вона була експериментально відпрацьована автором ще у позаминулому сторіччі, забезпечувала для тих часів врожайність пшениці на рівні 30 ц/га, базувалась на мілкому (на 5 см) обробітку ґрунту і забезпечувала сходи і вегетацію пшениці за посушливих умов півдня, навіть коли сходи на сусідніх полях з глибокою оранкою та оборотом пласта засихали або зерно просто не проростало. Сам І. Овсинський пояснював це «атмосферною іригацією», за рахунок роси, тобто конденсації у ґрунті атмосферної вологи. Можна сперечатися стосовно механізму такої «атмосферної іригації», але є факт одержання високих врожаїв за посушливих умов, що вимагає прискіпливого його вивчення. На нашу думку, контакт розпушеного 5 см шару ґрунту та необроблюваного шару із суттєвою зміною щільності складення відіграє роль радіального ландшафтно-геохімічного бар'єра (ЛГБ), на якому відбувається трансформація потоків енергомасообміну, що загалом призводить до підвищення біологічної активності вологи (особливо конденсованої), яка активує проростання зерна, а також використання капілярно неперервного підживлення цієї зони з глибоких шарів ґрунтового профілю.

Головним результатом наведених двох прикладів практичного використання в ефективних агротехнологіях закономірностей неізотермічного масообміну у ґрунтах є необхідність врахування двох силових полів, що є рушійною силою міграції вологи і водорозчинних солей, та створення математичної моделі системи імітаційного моделювання процесів неізотермічного масообміну у ґрунтовому середовищі та вологообміну з приземними шарами атмосфери. І саме така система моделювання повинна стати основою створення і конструювання інноваційних ресурсоощадливих і екологічно безпечних агротехнологій.

Висновки. Експериментально підтверджений фізичний механізм та встановлені закономірності масообміну водорозчинних солей і вологи у рідкому та пароподібному стані в неізотермічних умовах приповерхневих

шарів ґрунту, що мають надзвичайно важливе значення для створення інноваційних агротехнологій ефективного використання вологи.

Доведено, що основним механізмом термопересування вологи є не термодифузія водяної пари, а конвективне перенесення пари потоком ґрунтового повітря, що виникає в результаті теплового ковзання газів у поровому просторі ґрунту за неізотермічних умов.

Ретроспективний аналіз ефективних агротехнологій засвідчує широкі перспективи використання специфіки неізотермічного масообміну для цілеспрямованого управління потоками енергомасообміну у створюваних інноваційних агротехнологіях, особливо для зони високої забезпеченості термічними ресурсами та дефіцитом водних ресурсів.

Для практичного застосування закономірностей неізотермічного масообміну необхідно створити імітаційні математичні моделі енергомасообміну у ґрунтовому середовищі та приземних шарах атмосфери з урахуванням двох силових полів: поля потенціалу вологи і поля температур.

Науково-практичний напрямок неізотермічного масообміну у землеробстві має високий потенціал патентоспроможності, як на теренах України, так і у світі.

1. *Герайзаде А.П.* Методы определения и характер изменения коэффициентов переноса влаги в некоторых типах почв Азербайджанской ССР / А.П. Герайзаде, А.Ф. Чудновский // Сб. трудов АФИ № 26. Теплообмен в открытом и защищенном грунте. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – С. 125–133.

2. *Глобус А.М.* Экспериментальная гидрофизика почв / А.М. Глобус. – М. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 355 с.

3. *Глобус А.М.* Влияние давления в газовой фазе на передвижение почвенной влаги под действием градиента температуры / А.М. Глобус, С.К. Розеншток // Сб. трудов АФИ № 32. Вопросы энерго- и массообмена в системе почва-растение-атмосфера. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – С. 31–39.

4. *Лыков А.В.* Теория сушки / А.В. Лыков. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 416 с.

5. *Глобус А.М.* Почвенно гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей: монография / А.М. Глобус. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 427 с.

6. *Овсинский И.Е.* Новая система земледелия / И.Е. Овсинский. – 1899. – 138 с.

Представлены результаты лабораторных экспериментальных исследований механизма неизотермического массообмена в ненасыщенных почвах, которые доказывают существование неизотермической циркуляции влаги в образцах почвы в различном фазовом состоянии. При этом растворенные соли конвективным путем передвигаются к нагретой части образца. Экспериментально доказано, что термоперенос пара обеспечивается не термодиффузионным механизмом, а преимущественно конвективно потоками воздуха, которые возникают в свободном поровом пространстве при тепловом скольжении газов. Очерчены перспективы использования закономерностей неизотермического массообмена в разработке инновационных агротехнологий.

The results of laboratory experimental studies on the mechanism of non-isothermal mass transfer in unsaturated soils, which prove the existence of a non-isothermal circulation of moisture in the soil samples in different phase states, are given. Here the dissolved salts by convection move to the heated part of the sample. It was experimentally proved that a steam thermal transfer is provided not by the thermal diffusion mechanism, but preferably by convective air currents that arise in the free pore space when thermal gases slipping. The prospects for the use of non-isothermal mass transfer patterns in the development of innovative agricultural technology are outlined.