



Хлапук М. М., д.т.н., професор, Клімов С. В., к.т.н., доцент, Білецький А. А., к.т.н., доцент, Шумлянський А. О., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), Осадчий В. С., к.т.н., доцент (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕХАНІЧНОЇ СУФОЗІЇ ТА КОЛЬМАТАЖУ В ДРЕНАЖНИХ СИСТЕМАХ

У статті виконано аналіз теоретичних досліджень суфозійних процесів, що виникають у дренажі на меліоративних системах та гідротехнічних спорудах з ґрунтових матеріалів. Основну увагу в статті приділено механічній суфозії – перенесення та винесення дрібних частинок в ґрунтовому масиві під дією фільтраційного потоку, що супроводжується зміною пористості середовища та коефіцієнта фільтрації. Розглянуто механізми виникнення внутрішньої та зовнішньої суфозії, а також процес кольматажу – зупинки переміщення частинок у порах.

На основі огляду літературних джерел та результатів лабораторних і натурних досліджень охарактеризовано вплив гідравлічного градієнта на інтенсивність фільтраційних деформацій. Узагальнено відомі критерії суфозійної стійкості ґрунтів, зокрема коефіцієнт неоднорідності гранулометричного складу та критичний гідравлічний градієнт. Проаналізовано традиційні та сучасні моделі, що використовуються для кількісного прогнозування розвитку суфозії в неоднорідних середовищах.

Обґрунтовано необхідність доповнення класичних рівнянь фільтраційного потоку рівняннями балансу маси рухомих частинок. Показано, що наявні класичні теоретичні підходи (рівняння Дарсі, Буссінеска, Дюпюї – Форхгеймера та інші) не враховують зміни коефіцієнта фільтрації в часі через суфозійні деформації масиву ґрунту. Аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень підтверджує істотний вплив переміщення частинок на водоприймальну здатність дрен.

Зроблено висновок, що прогнозування працездатності дренажних систем неможливе без урахування суфозійних змін у придренній зоні. Необхідним є удосконалення математичних моделей шляхом врахування розвитку суфозійних процесів як детермінуючого фактора, що впливає на зміну гідравлічних параметрів у системі фільтрації.

Ключові слова: суфозія; кольматаж; градієнт напору; фільтраційні деформації; пористе середовище.

Постановка проблеми. Суфозійні процеси, найчастіше в піщаних ґрунтах, рідше в супісках протікають в зворотних фільтрах дренажів осушувальних та зволожувальних меліоративних систем, на схилах при виході підземних вод, на низових укосах земляних гребель і дамб, на піщаних основах бетонних гребель, а також у будівельних котлованах при відкритому водовідливі, при відкачуванні води із свердловин тощо [1], [2], [3].

Суфозійний процес (суфозійні деформації ґрунту) складний і містить три взаємопов'язані процеси:

- 1) механічне порушення твердої фази речовини (ґрунту);
- 2) перенесення дрібних частинок в порах речовини (ґрунту) або їх винесення з основної маси речовини (ґрунту) назовні;
- 3) переформування положення частинок різного розміру в порах речовини (ґрунту) під дією фільтраційного потоку, включно із зупинкою руху цих частинок в порах ґрунту та припинення руху води (кольматаж) [1], [4], [5].

Актуальність теми. Механічна суфозія є поширеним явищем в природі. Розрізняють два види механічної суфозії: внутрішню і зовнішню, що найбільш повно відповідає явищам, що проходять в будь-яких дренажних пристроях. Внутрішня суфозія – це рух окремих дрібних (суфозійних) частинок під дією гідродинамічної сили, обумовленої гідравлічним градієнтом, всередині ґрунтового масиву крізь пори ґрунту [6], [7], [8], [9], [10]. В результаті такого процесу можуть утворюватися зони із підвищеною пористістю – зони суфозії, з якої вимиваються частинки, та зони зі зниженою пористістю – зони ущільнення чи кольматажу, де дрібні частинки ґрунту накопичуються, подальший їх рух обмежується. Зовнішня суфозія – це винесення дрібних (суфозійних) частинок ґрунту з контактної області (вся зона, де діють градієнти напору вищі за критичні значення) [1].

Винесення мінеральних частинок відбувається під впливом гідравлічного градієнта. Інтенсивність суфозійного процесу залежить від ступеня неоднорідності гранулометричного складу ґрунтів.

Орієнтовну оцінку суфозійності ґрунту визначають виходячи зі значення коефіцієнта неоднорідності $\eta = d_{60}/d_{10}$ (d_{10} , d_{60} – відповідно діаметри частинок, менше яких в даному ґрунті міститься 10 і 60% за масою) та критичного (допустимого) градієнта напору l_{cr} . Для ґрунтів з $\eta < 10$ $l_{cr} = 0,3 \dots 0,4$; при $10 < \eta < 20$ $l_{cr} = 0,2$; при $\eta > 20$ $l_{cr} = 0,1$. При значеннях градієнта напору менше допустимого для ґрунтів визначеного



гранулометричного складу суфозійні явища не спостерігаються. У ґрунтах з $\eta < 10$ при градієнтах напору $I_{est} > 0,3 \dots 0,4$ відбувається власне не суфозія, а фільтраційне випирання [1], [6], [11].

У деяких ґрунтах (дрібних, водонасичених) при збільшенні гідравлічного градієнта спочатку відбувається фільтрація води, потім – суфозія, а при подальшому збільшенні градієнта ґрунт розріджується та переходить у текучий стан. Влаштування в ґрунті свердловин, дренажу, виконання земляних робіт, призводить до суттєвої зміни руху природного фільтраційного потоку, що був історично сформований і знаходився, найчастіше, в стані рівноваги: відбувається переорієнтація напрямку руху води, локально зростають градієнти напору, які можуть стати більшими за критичні та викликати переміщення суфозійних частинок.

Суфозійні процеси обумовлюють появу «фільтраційних деформацій» ґрунту (механічна суфозія (внутрішня, зовнішня), контактний розмив, фільтраційне випирання), які поділяються на наступні види: механічна (внутрішня, зовнішня); хімічна; хімічно-фізична; техногенна; термосуфозія (при винесенні дрібних частинок ґрунту при його розмерзанні).

Розрізняють ґрунти несуфозійні, суфозійні й практично несуфозійні. Несуфозійними називають ґрунти, в яких при будь-яких швидкостях фільтрації (градієнтах напору) не буде відбуватися винос дрібних частинок. До практично несуфозійних ґрунтів відносять такі, виносення частинок з яких не перевищує 3% і при цьому не відбувається порушення його міцності й стійкості. У суфозійних ґрунтах виносення частинок фільтраційним потоком перевищує 3% [12].

При встановленні критичного для даного ґрунту гідравлічного градієнту, при якому виникає суфозія, може застосовуватись прилад системи В. М. Слав'янова, в якому через зразок ґрунту пропускають воду знизу вгору при різних значеннях градієнта. Поява в профільтованій воді мінеральних частинок у змуленому стані вказує на початок процесу суфозії та досягнення критичного значення градієнта. Крім того, критичний гідравлічний градієнт або критичну швидкість виникнення суфозії можна визначити за допомогою існуючих формул (наприклад, які запропонували О. М. Патрашев, Г. Х. Праведний, Й. С. Міц, С. К. Абрамов, Й. Чіштін) [13], [14], [15].

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз теоретичних основ і практичних аспектів механічної суфозії та кольматажу в дренажних системах і гідротехнічних спорудах з ґрунтових матеріалів, зокрема визначення умов їх виникнення, впливу на фільтраційні характеристики середовища та працездатність дрен.

Дослідження спрямовано на удосконалення моделей фільтраційного потоку з урахуванням переміщення частинок ґрунту, розробку критеріїв стійкості до суфозії та формування рекомендацій щодо забезпечення довготривалої ефективності меліоративних систем.

Об'єкт дослідження. У статті розглядаються суфозійні процеси (деформації), що відбуваються в дренажних системах та в гідротехнічних спорудах з ґрунтових матеріалів.

Методи дослідження. Бібліографічна довідка. При написанні цієї статті було використано як класичну для української гідротехнічної науки літературу, так і проведено пошук сучасної літератури для виявлення тенденцій у сфері вивчення суфозійних явищ. Бібліометричний аналіз проведено в два етапи: систематичний пошук і пошук у вигляді «снігової кулі» (Snowball) [16]. На етапі систематичного пошуку ми застосували метод пріоритетних звітних елементів для систематичних оглядів і мета-аналізів (PRISMA) [17]. Цей метод є одним із найпоширеніших методів проведення систематичних оглядів. У дослідженні визначався перелік релевантних ключових слів за темою (Use keywords like «Suffusion», «Soils», «Erosion» and related terms to search for articles). В якості пошукового було застосовано терміни «suffusion AND of AND soils» на сайті www.scopus.com/ 17.04.2025 року. База даних містить 28 статей, опублікованих з 1972 по 2009 роки. Серед них найбільш цитовані [18] – (351 Citations in Scopus – 96th percentile), а також [19] (722 цитувань), [20] (цитується 182 рази). В період з 2010 по 2025 роки пошук дав результат – 479 статей. На рис. 1, а, показано співпоширення та відносну частоту пошукових термінів, знайдених у ключових словах, заголовку та анотації документів. Пропорційний розмір вузлів вказує на відносну кількість публікацій та їх цитованість, тоді як товщина сполучників вказує на частоту їх спільного згадування.

На рис. 1, б, показано країни з найбільшою кількістю публікацій (принаймні дев'ять) і цитувань у цій галузі. Більшість із цих країн мають велику кількість геотехнічних споруд, як-от насипи, дамби, ґрунтові греблі та інші. На рис. 1, в, представлено розподіл за предметною областю (Subject area). Крім того, дослідження були зосереджені на теоретичному, а більшою мірою у практичному (частіше лабораторні випробування) визначенні умов виникнення суфозії на різних ґрунтах [2], [10], [21], [22], ін. під впливом змінних умов. Останнім часом створюються нові гідромеханічні моделі для кількісного прогнозування можливості суфозії, враховуючи випадкові відхилення в градації ґрунту, пористості та проникності [9]. Є публікації, які представляють аналіз уявлень про явище внутрішньої нестабільності в ґрунтах, пробують виявити неоднозначності та

прогалини в дослідженнях, а також об'єднують класичні емпіричні дослідження та сучасні методи візуалізації з чисельним моделюванням для кращого теоретичного розуміння явища [23].

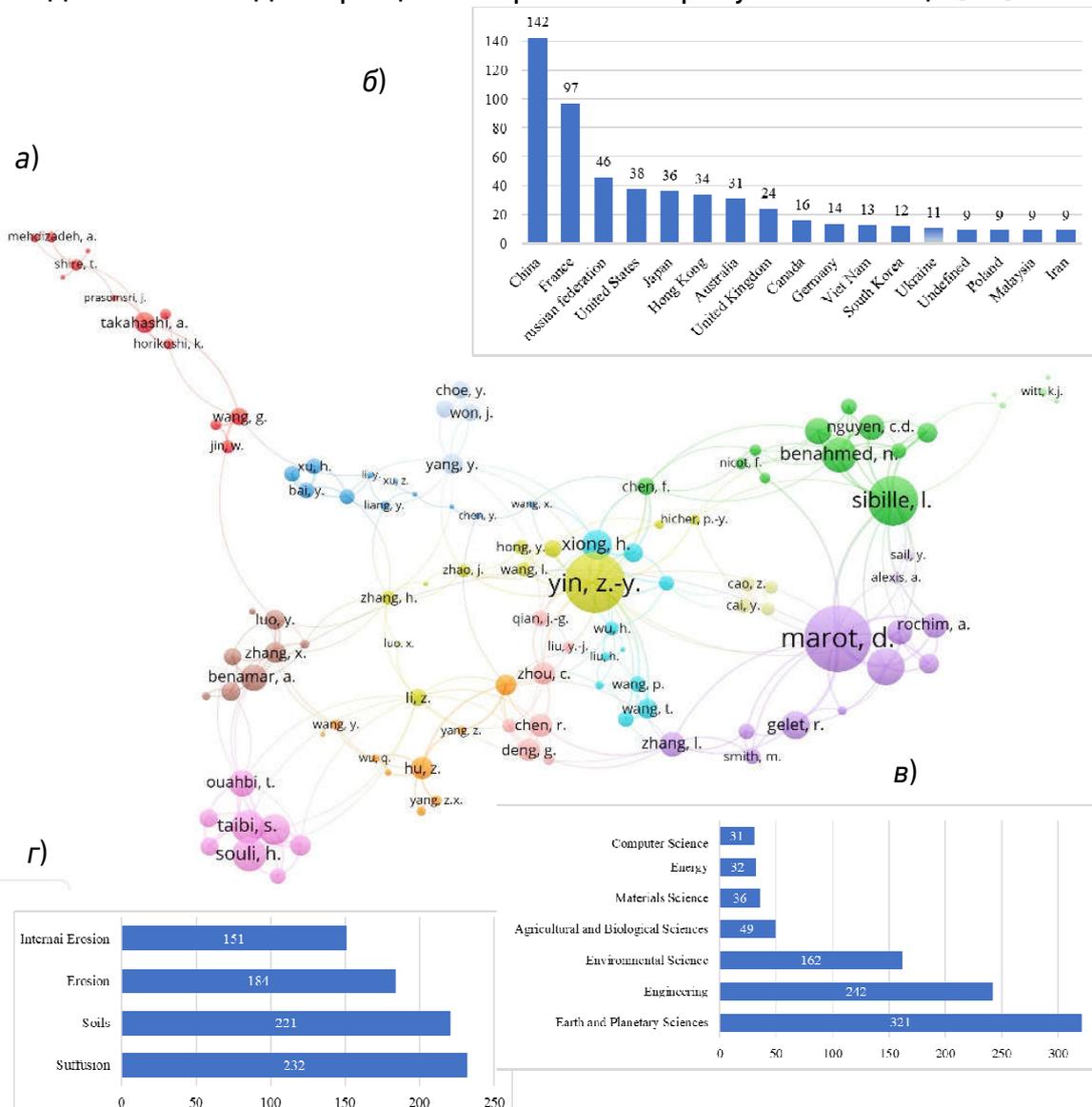


Рис. 1. Тенденція публікацій з реферативної наукометричної бази даних Scopus за пошуковими термінами «suffusion AND of AND soils» з 1970 по 2025 рік: а – автори з найвищою частотою цитування; б – загальна кількість публікацій та цитованість за країнами; в – розподіл за предметною областю (Subject area); г – кількість публікацій з відповідними ключовими словами

З огляду на значні обсяги публікацій були створені додаткові фільтри, зокрема за типом джерела, за кількістю цитувань, щоб визначити найбільш впливові статті.

Результати досліджень і обговорення

Аналіз теоретичних досліджень. Під час руху води крізь пористі середовища (ґрунти, інші різнозерністі матеріали) в них, як правило, відбуваються різного роду суфозійні процеси (деформації): переорієнтація частинок неправильної форми під дією градієнтів напору; переміщення дрібних суфозійних частинок у порах скелету ґрунту, складеного більш крупними частинками (механічна суфозія); зупинка руху суфозійних частинок в порах ґрунту (кольматаж). Наслідком суфозійних процесів є зміна характеристик середовища, основною з яких є коефіцієнт фільтрації ґрунту.

Виконані М. М. Хлапуком досліди на установці Дарсі [1], [24] та експериментальні дані інших авторів (наприклад, досліди Д. М. Мінца, С. О. Шуберта з однорідним піском, антрацитом, сталевими кульками, досліди А. І. Мурашко з піском, а також аналітичний огляд досліджень, виконаний М. М. Павловським [6]), дозволили отримати залежності коефіцієнта фільтрації ґрунту k_f від градієнта напору I_{est} [1]. Вони показують, що коефіцієнт фільтрації зернистого середовища k_f змінюється (збільшується або зменшується) при зростанні градієнта напору I_{est} залежно від густини та неоднорідності ґрунту, форми частинок, що його складають тощо. Причому, навіть в однорідному ґрунті при зміні градієнта напору відбувається зміна k_f , що, вочевидь, викликано переорієнтацією частинок у просторі і, частково, зміною густини ґрунту [6].

Суфозійні процеси в дренажних системах, при відкачуванні води із свердловин, дренажних пристроях в гідротехнічних спорудах з ґрунтових матеріалів найбільш активно проявляються в початковий період їх роботи під дією градієнта напору [6], [13], [25] та ін. Таким чином, можна зробити висновок, що основним фактором, який викликає суфозійні процеси і обумовлює характер їх протікання, є градієнт напору I_{est} . Тому необхідно чітко пов'язувати динаміку дії в ґрунті придренної зони градієнтів напору із зміною коефіцієнта фільтрації k_f внаслідок вимивання дрібних частинок ґрунту чи, навпаки, замулення (кольматаж) ними пор ґрунту. Цей вид замулення проявляється в багатьох ґрунтах і швидко закінчується формуванням довкола дрени стійкого природного фільтра. Водоприймальні отвори (дрени) впливають на викривлення ліній току, що призводить до зміни швидкості фільтрації та переміщення дрібних частинок у ґрунті, а, надалі, вони виносяться через водоприймальні отвори (дрени), замулюючи порожнину дрени. Однак, не можна однозначно сказати, що радіус впливу



водоприймальних отворів становить 2–4 радіуса дрени. Вплив отворів, як і дрени в цілому, залежать від розподілу діючих градієнтів, характеристик ґрунтів та критичного градієнта, при перевищенні якого стануть можливі суфозійні процеси. Надходження суфозійних частинок в порожнину дрени – це один із можливих наслідків суфозійних процесів. Об'єм замулення дрени, звичайно, залежить від інтенсивності цих процесів. Більш небезпечним для роботи дрен є замулення (кольматаж) придрєнної зони ґрунту та зворотного фільтра [26], тому що, на відміну від порожнини дрени, неможливе відновлення фільтра та працездатності дрени.

Суфозійні процеси, які виникають в придрєнній зоні, обумовлені появою градієнтів напору l_{est} вищих за критичні l_{cr} , їх початкова інтенсивність залежить від вмісту суфозійних частинок у ґрунті, а інтенсивність затухання – від швидкості зменшення градієнтів, обумовленій зростанням коефіцієнта фільтрації ґрунту k_f внаслідок механічної суфозії [27], [28], [29], [30].

Одним з перших, хто провів значні за об'ємом теоретичні та, особливо, лабораторні дослідження механічної суфозії, кольматажу, замулення був С.В. Ізбаш [13], який акцентував увагу на суфозійних процесах ґрунту, а не на його руйнуванні. Ним відмічається, що фільтраційні деформації ґрунту обумовлені дією градієнта напору. Для швидкості переміщення твердої частини запропонована залежність

$$V_c = \xi U, \quad (1)$$

де U – дійсна середня швидкість води в порах.

Коефіцієнт пропорційності ξ (за С.В. Ізбашем) фактично є функціональною залежністю

$$\xi = A \frac{U - U_k}{U}, \quad (2)$$

де U_k – критична швидкість (при швидкості потоку $U < U_k$ для даного ґрунту неможливі переміщення);

A – параметр, що залежить від вмісту суфозійних частинок.

Тоді рівняння руху твердих частинок в ефективній фільтраційній струминці циліндричної форми з врахуванням (2) можна записати у вигляді

$$V_c = A(U - U_k). \quad (3)$$

Рівняння (3) досить близько, на наш погляд, описує рух суфозійних частинок в порах.

М.О. Слезкін [31] запропонував диференціальні рівняння переносу, що описують локальні фільтраційні деформації, при яких завдяки великій інтенсивності фільтрації можуть відбуватися загальні деформації середовища, названі ним місцевим розмивом. Ці рівняння пропонуються ним як рівняння руху механічної суміші. Однак, запропоновані рівняння неможливо безпосередньо застосувати для випадку механічної суфозії, коли є два види частинок пористого середовища – практично нерухомі, крупні частинки, що формують скелет ґрунту, та рухомі, дрібні суфозійні частинки, які рухаються або можуть при зміні гідродинамічних умов прийти в рух.

Отже, для того, щоб врахувати розвиток суфозійних деформацій та його вплив на переформування коефіцієнта фільтрації в часі, необхідно доповнити основні рівняння геофізичної фільтрації рівняннями, які описували б переміщення суфозійних частинок, та балансу маси цих частинок.

В подальшому дослідження суфозійних процесів розвивались в напрямку їх недопущення в спорудах з ґрунтових матеріалів, основах споруд, дренажних пристроях, що диктувалося практичною необхідністю та економічною доцільністю.

Незважаючи на великий об'єм досліджень, проблема суфозії актуальна і на теперішній час. При роботі дренажу меліоративних систем різного роду суфозійні явища призводять до зниження ефективності значної частини дренажу або й до повного його виходу з ладу [32]. Проблема фільтраційних деформацій досить серйозна і для ґрунтових гребель [2], [7], [8], [14], [18], [33]. За даними Дж. Джастіна [34], причиною руйнування біля 45% гребель (з більш ніж 300 досліджених випадків) були фактори, викликані фільтрацією води та суфозійними процесами. Суфозійні деформації в тілі греблі з ґрунтових матеріалів призводять до зростання фільтраційних витрат та до замулення дренажу, що може погіршити умови експлуатації гребель [2], [7], [33]. Для водозабірних свердловин однією з проблем є наявність у воді твердих частинок ґрунту (що є наслідком суфозійних процесів), які можуть вивести з ладу насосне обладнання та водопровідні мережі.

Суфозійні процеси проявляються в дренажах гребель, дамб з ґрунтових матеріалів та меліоративних систем у вигляді зростання фільтраційних витрат, кольматажу фільтрів, придреного шару ґрунту, замулення порожнини дрени дрібними частинками ґрунту тощо. Це призводить до зміни коефіцієнта фільтрації ґрунту k_f та його



відхиленню від проектного значення, закладеного в розрахунках. Необхідність прогнозування цих змін при експлуатації дренажу з метою запобігання шкідливим наслідкам суфозійних процесів викликає потребу в їх ґрунтовних дослідженнях.

Фільтраційний потік при певних значеннях діючих градієнтів напорів спричиняє механічну суфозію, а також кольматаж в придренних зонах дренажу, яка призводить до зміни коефіцієнта фільтрації ґрунту і, як наслідок, до нового розподілу градієнтів.

Основні положення шляхів розвитку динаміки підземних вод були закладені дослідженнями, проведеними відомими спеціалістами в області гідравліки та теоретичної механіки (А. Дарсі, Ж. Дюпюї, Ж. Буссінеск, М.Є. Жуковський, Ф. Форхгеймер, М.М. Павловський тощо). Для вирішення задач гідродинаміки підземних вод використовувалися диференціальні рівняння руху фільтраційного потоку. Вихідна модель фільтраційного потоку включає рівняння руху (основний закон фільтрації), рівняння нерозривності (балансу) потоку, рівняння стану, яке пов'язує напруження і деформації пласта, а також умови однозначності, які складаються з початкових і граничних умов процесу [23], [35], [36], [37], [38], [39].

Рух фільтраційного потоку – це основний закон фільтрації (закон Дарсі, в диференціальній формі), який вперше був запропонований Ж. Дюпюї [40], має вигляд:

$$V_x = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -k \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -k \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (4)$$

де V_x, V_y, V_z – складові швидкості фільтраційного потоку;

$h = h(x, y, z, t)$ – функція напору;

$k = k(x, y, z)$ – коефіцієнт фільтрації області фільтрації.

Для усталеного руху, в якому розглядаються складові балансу потоку в нескінченно малому елементі простору за нескінченно малий проміжок часу, рівняння нерозривності має вигляд [29], [41]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0, \quad (5)$$

де ρ – густина рідини.

Залежності (1) та рівняння нерозривності (2) не дозволяють знайти всі необхідні характеристики потоку – проєкції швидкості фільтраційного потоку, функцію напору та густину рідини. Тому для рідин, що не стискаються, додатковим буде рівняння стану, яке має вигляд:

$$\rho = const \quad (6)$$

В меліоративній практиці при осушенні надлишково зволених земель широко застосовується трубчастий дренаж. Розрахунок відстані між дренажними лініями пов'язаний із встановленням закономірностей руху води в ґрунті, які описуються, наприклад, рівняннями безнапірної фільтрації за наявності (відсутності) на поверхні депресії стоків або витоків. Таке рівняння відоме під назвою рівняння Буссинеска [42], [43] і для випадку неусталеного руху рідини в однорідному середовищі на горизонтальному водоупорі має вигляд

$$\operatorname{div}(h\nabla h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{\mu}{k} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{q}{k}, \quad (7)$$

де h – напір;

μ – коефіцієнт водовіддачі або водонасичення відповідно при опусканні або піднятті поверхні депресії;

q – інтенсивність стоків (витоків);

t – час.

Розрахунок фільтрації із вільною поверхнею важко піддається розв'язку через нелінійність граничних умов. Водночас точний математичний розв'язок не завжди самоціль, тому що самі диференціальні рівняння, граничні та початкові умови, припущення щодо однорідності, ізотропності, характер живлення (опаді, випаровування), як правило, наближені. В зв'язку з цим були розроблені наближені методи розрахунку. До них відноситься, наприклад, метод (теорія) Дюпюї – Форхгеймера, який вперше був запропонований Дюпюї для дослідження надходження стаціонарних потоків до свердловин і дренажних галерей і узагальнений Форхгеймером [44]. М. М. Павловський [45] розповсюдив цей метод на фільтрацію в гідротехнічних спорудах з ґрунтових матеріалів і в їх основах. Для дренажу меліоративних систем відомі наближені теорії Дюпюї – Форхгеймера, удосконалені Хоугхаудтом [46], Кіркгемом [47], Весселінгом [48], Лістом [49], Хаммадом [50], С.Ф. Авер'яновим та іншими [23], [35], [36], [37], [38], [39].

Для розрахунку стаціонарної осесиметричної фільтрації до свердловин та дрен використовується метод стоків та витоків [6]. В.В. Ведерніков отримав розв'язки задачі притоку до систематичного дренажу, що працює в підрусловому режимі, зокрема залежності для обчислення притоку питомої витрати до дрени (порожнини в ґрунті)



$$q_o = \frac{2\pi k_o \Delta H}{\Phi_o} \quad (8)$$

і швидкості (градієнта напору) в будь-якій точці області фільтрації

$$\vec{V}_z(x, y) = V_x(x, y) - iV_y(x, y) = -i \frac{4k_o \Delta h K \alpha \sqrt{1 - k^2 \operatorname{sn}^2(2Kz/B; k)}}{\Phi_o B [\alpha^2 + (1 - \alpha^2) \operatorname{sn}^2(2Kz/B; k)]}, \quad (9)$$

де Φ_o – фільтраційний опір при фільтрації до досконалої дрени, рівний

$$\Phi_o = 2 \operatorname{Arth} \sqrt{\operatorname{sn}(2Kh/B; k_1) / \operatorname{sn}(2K(h+d)/B; k_1)};$$

$$\alpha = \sqrt{\operatorname{sn}(2Kh/B; k_1) \cdot \operatorname{sn}(2K(h+d)/B; k_1)};$$

K – повний еліптичний інтеграл по модулю k ;

$$k_1 = \sqrt{1 - k^2};$$

$\operatorname{sn}(\dots)$ – еліптичний синус (функція Якобі);

$\operatorname{tn}(\dots)$ – гіперболічний тангенс;

ΔH – різниця напорів;

h – відстань від поверхні ґрунту до верху дрени;

d – діаметр дрени;

B – відстань між дренами;

x – абсциса, що співпадає з поверхнею ґрунту;

y – ордината, що направлена вертикально вниз і проходить через центр дрени.

Аналогічні розв'язки для неоднорідно-шаруватих ґрунтів, отримані О.Я. Олійником [51] для випадку притоку до систематичного підруслового дренажу, закладеного у верхній шар двошарового ґрунту з водоупором.

Диференціальні рівняння гідродинаміки геохімічної фільтрації не можуть бути безпосередньо використані для побудови математичних моделей суфозійних процесів (механічної суфозії), викликаних дією фільтраційного потоку на частинки ґрунту, в якому відбувається фільтрація [28], [29], [52]. Недоліком такого підходу, коли для опису процесу суфозії (чи кольматажу) використовується закон Фіка, є те, що суфозійні частинки вважаються повністю асоційованими з фільтраційним потоком, тобто конвективне перенесення маси частинок ґрунту відбувається із швидкістю фільтрації. В цьому випадку при будь-якій невеликій швидкості, відмінній від нуля, повинна виникати суфозія. В дійсності ж, механічна суфозія (рух частинок діаметром $d_s \geq 0,03$ мм; в гідротехнічних спорудах такі ґрунти широко розповсюджені)

можлива лише при перевищенні діючими градієнтами напору I_{est} критичного значення I_{cr} для даного середовища, тобто при швидкості фільтрації V_{est} більшій за критичну V_{cr} [13], [53] тощо. Крім цього, механічна суфозія і кольматаж можливі і при фільтрації «чистої» води, в якій у певних зонах масиву фільтрації не міститься жодних речовин.

Наведені розв'язки задач фільтрації та інші в більшості справедливі для випадку «ідеальної» або досконалої дрени, під якою розуміється пориста дренажна труба або «труба» без стінок (порожнина в ґрунті). Практично всі дренажні труби, що застосовуються, мають непроникні стінки, а ґрунтова вода надходить крізь перфоровані отвори чи стикові зазори. Такі дренажні конструкції є недосконалими за характером розкриття пласту.

Порівняння результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними.

Дренажні конструкції досліджувались не тільки у частині фільтраційних процесів в придренній зоні. У великому обсязі виконувалися досліди з визначення водоприймальної здатності дрен різних конструкцій (особливо меліоративного дренажу) в лабораторних та натурних умовах [54], [55], [56], [57], [58] тощо. Однак, такі дослідні дані досить складно використати для порівняння з теоретичними дослідженнями. Особливо це стосується польових даних, де основні діючі фактори неконтрольовані, а граничні умови невизначені. В лабораторних умовах найчастіше визначали лише притік води до дрени (дренажний стік), або фільтраційних властивостей конструкції фільтр – дрена [59], з огляду на складність врахування, всі інші впливові параметри, як правило, були фіксованими. Тому визначений таким чином притік води до дрени може лише порівнюватися з притоком до інших дренажних конструкцій, визначеним в тих або аналогічних умовах.

Під керівництвом М.М. Хлапука проведено лабораторні та польові дослідження дрен різних конструкцій, які працюють в режимі двобічної дії [24], [29], [41]. Дослідники відмічали розбіжність між притоком води до дрени, обчисленим теоретично і притоком води, визначеним із дослідів, які проводились з дотриманням граничних умов. Так, за даними А.І. Мурашко, притік води до пластмасових дрен діаметрами 4,2–6,0 см, що закладалися в ґрунтовий лоток (ґрунт: середньозернистий пісок, із вмістом 3% дрібних частинок діаметром $d_s < 0,10$ мм), складав лише 60–85% від притоку води до досконалої дрени, обчисленому за теоретичними залежностями. Цей факт



пояснюється тим, що не враховувались суфозійні зміни в придренній зоні, які призвели до зменшення фільтраційної витрати.

Досліди, проведені М.М. Хлапуком [60] та виконані розрахунки за експериментальними даними М.Г. Пивовара, показали, що притік води до дрени, закладеної в однорідний та ретельно промитий пісок (за відсутності механічної суфозії), на 30% і більше перевищує притік води до досконалої дрени. Це пов'язано з тим, що переорієнтація частинок ґрунту в придренній зоні призвела до збільшення коефіцієнта фільтрації ґрунту і, як наслідок, до зростання витрати.

Висновки. В теорії фільтрації розглядається рух рідин в пористих середовищах (тобто в твердих тілах, що мають зв'язну систему пор), які можуть бути жорсткими або такими, що деформуються. Однак, рух частинок пористого середовища, як правило, не враховується. Все наведене вказує на необхідність вдосконалення теоретичних методів розрахунку нарівні з проведенням ретельних експериментальних досліджень, що пов'язано з особливою дією на притік води механічної суфозії, яка виникає в придренній зоні, і кольматаж придреного шару ґрунту та захисного фільтра суфозійними частинками. Таким чином, можна констатувати, що наведених вище диференціальних рівнянь недостатньо для побудови математичних моделей, що враховують суфозійні деформації при русі фільтраційного потоку крізь зернисті середовища.

Розглянуті теоретичні дослідження не враховують суфозійні процеси, що діють в придренній зоні. Всі наведені диференціальні рівняння і розв'язки задач фільтрації побудовані на припущенні, що коефіцієнт фільтрації ґрунту, в якому відбувається фільтрація, є величиною постійною. Пружний режим фільтрації також не враховує переміщення суфозійних частинок в масиві ґрунту. Зміна коефіцієнта фільтрації відбувається внаслідок зміни пористості при спаданні або зростанні тиску. Переміщення суфозійних частинок чи їх переорієнтацію під дією сил фільтраційного потоку пружний режим фільтрації не описує. Суфозійні процеси, які викликані саме фільтрацією і впливають на її параметри, такими математичними моделями не можуть бути враховані.

1. M. M. Khlapuk, S. V. Klimov, O. V. Bezusiak, i A. O. Shumlyanskyi. Experimental study of the effect of hydraulic gradient on soil hydraulic conductivity. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2024. Vol. 1415(1). P. 012090. doi: 10.1088/1755-1315/1415/1/012090. 2. Experimental investigation of global backward erosion and suffusion of soils in embankment dams. *Can. Geotech. J.*

2018. Vol. 56(6). P. 789–807. doi: 10.1139/cgj-2018-0088. **3.** L. Cao, X. Li, Z. Li, J. Liu, J. Li, i X. Lv. Influence of drainage flow velocity on microscopic cohesive soil erosion and macroscopic road collapse evolution: A case study in Beijing, China. *Eng. Fail. Anal.* 2024. Vol. 164. P. 108698. doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108698. **4.** Y. Liang, T.-C. J. Yeh, Y. Zha, J. Wang, M. Liu, i Y. Hao. Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage. *Soils Found.* 2017. Vol. 57(5). P. 849–860. doi: 10.1016/j.sandf.2017.08.017. **5.** Q. Xie, J. Liu, B. Han, H. Li, Y. Li, X. Li. Critical Hydraulic Gradient of Internal Erosion at the Soil–Structure Interface. *Processes.* 2018. Vol. 6(7). doi: 10.3390/pr6070092. **6.** А. Ф. Дмитрієв, М. М. Хлапук, Д. А. Дмитрієв. Процеси деформації незв'язаних ґрунтів у придренажній зоні та їх вплив на роботу дренажно-зрошувальних систем : монографія. Рівне : РДТУ, 2002. **7.** F. Federico. Particle Migration Phenomena Related to Hydromechanical Effects at Contact between Different Materials in Embankment Dams. *Granular Materials.* IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/67785. **8.** R. Bridle i R. Fell. Internal erosion of existing dams, levees and dykes, and their foundations. *Bulletin.* 2013. Vol. 164. **9.** Z. Huang, H. Xu, Y. Bai, B. Zhang, J. Liu. Hydromechanics based prediction of suffusion development in spatially random soil structures. *Eng. Geol.* 2024. Vol. 341. P. 107725. doi: 10.1016/j.enggeo.2024.107725. **10.** H.-J. Lee, I.-H. Kim, C.-K. Chung. Experimental Assessment on the Internal Instability of Broadly Graded Silty Sand. *KSCE J. Civ. Eng.* 2022. Vol. 26(4). P. 1643–1651. doi: 10.1007/s12205-022-0924-5. **11.** Парфентьева І. О., Верешко О. В., Гусачук Д. А. Основи та фундаменти : навч. посіб. для студ. спец. 192 «Будівництво та цивільна інженерія. Луцьк : ЛНТУ, 2017. 296 с. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/uk/147258369/6250> (дата звернення: 17.04.2025). **12.** Свіренко Л. П., Бригінець К. Д., Дядін Д. В. Інженерно-геологічні властивості гірських порід та штучних ґрунтів : навч.-метод. посіб. Харків : ХНАМГ, 2004. 58 с. **13.** Рекомендації з проектування зворотних фільтрів гідротехнічних споруд. ВНДІГ : Енергія, 1981. 105 с. URL: <http://www.cawater-info.net/bk/dam-safety/files/4293758206.pdf> (дата звернення: 16.04.2025). **14.** Міц Й. С. Дослідження суффозійної стійкості ґрунтів при влаштуванні дренажів з пористого бетону : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.07. Дніпро, 1969. 24 с. **15.** Ciřtin J. Sufozni rychlost v nesoudrzných. Krizice odborných spisů vysokého uceni technického v Brne. *Referaty VII. Vedecke konference stavebni fakultu VUT.* 1974. Svazek B-45. S. 311–317. **16.** N. Fötsch. LibGuides: Literature search: Snowball and citation search. URL: <https://libguides.ru.nl/literaturesearch/snowball> (дата звернення: 01.01.2024). **17.** M. J. Page et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021. Vol. 372. P. n160. doi: 10.1136/bmj.n160. **18.** C. F. Wan, R. Fell. Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2008. Vol. 134(3). P. 401–407. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(401). **19.** T. C. Kenney, D. Lau. Internal stability of granular filters. *Can. Geotech. J.*



1985. Vol. 22(2). P. 215–225. doi: 10.1139/t85-029. **20.** J. Lafleur, J. Mlynarek, A. Rollin. Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. *J. Geotech. Eng.* 1989. Vol. 115. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:12(1747). **21.** K. Horikoshi, A. Takahashi. Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fractions in embankment subjected to seepage flow. *Soils Found.* 2015. Vol. 55(5). P. 1293–1304. doi: 10.1016/j.sandf.2015.09.027. **22.** Y. Luo, X. Zhang, M. Xiao. Influence of constriction-based retention ratio on suffusion in double-layered alluvial foundation with a cutoff wall. *Soils Found.* 2020. Vol. 60(6). P. 1489–1506. doi: 10.1016/j.sandf.2020.10.002. **23.** S. Dassanayake, A. Mousa, I. M. S. K. Ilankoon, G. Fowmes. Internal Instability in Soils: A Critical Review of the Fundamentals and Ramifications. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2022. Vol. 2676. doi: 10.1177/03611981211056908. **24.** Хлапук М. М. Нові аспекти роботи дренажних конструкцій, виявлені за допомогою фізичного та математичного моделювання. *Матеріали III наук.-техн. конф. Укр. держ. акад. водн. госп-ва* : зб. статей. 1997. Ч. 2. С. 66–69. **25.** Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Ричко В. О. Дренаж із волокнистими фільтрами : монографія. Київ : Наукова думка, 1980. 216 с. URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/hist/pivovar-bugai-rychko/pages/001.htm> (дата звернення: 17.04.2025). **26.** X. Zhang, T. Huang, Y. Wu. Soil drainage clogging mechanism under vacuum preloading: A review. *Transp. Geotech.* 2024. Vol. 45. P. 101178. doi: 10.1016/j.trgeo.2023.101178. **27.** Бомба А. Я., Хлапук М. М., Сидорчук Б. П. Моделювання взаємовпливу градієнтів і фільтраційного середовища та проблеми стійкості дисперсних систем. *Фізика конденсованих високомолекулярних систем.* 1997. Вип. 3. С. 202–207. **28.** Бомба А. Я., Хлапук М. М., Сидорчук Б. П. Про моделювання процесу фільтрації до водоприймальних отворів дрен в середовищах, що деформуються. *Сучасні проблеми теорії фільтрації* : зб. наук. статей / Укр. держ. акад. водн. госп. 1998. С. 27–33. **29.** Хлапук М. М. Особливості моделювання нелінійних процесів фільтрації із зволожувача в середовище, що деформується. *Сучасні проблеми теорії фільтрації* : зб. наук. Статей / Укр. держ. акад. водн. госп. 1998. С. 151–156. **30.** Яцик А. В., Хлапук М. М., Іващенко А. П. Фільтрація до горизонтального керамічного дренажу. *Водне господарство України.* 1997. № 4. С. 15–17. **31.** А. Я. Бомба, С. Каштан. Моделювання зворотнього впливу градієнтів потенціалу на процес фільтрації. *Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету.* 2004. Вип. 9(1). С. 123–129. **32.** Хегай В. В. Працездатність закритого горизонтального дренажу на зрошуваних землях та шляхи її підвищення : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Ташкент, 1984. 19 с. **33.** Міодушевський В., Круль П. Дослідження фільтраційних процесів у тілі земляної греблі. *Фільтрація води в пористих середовищах* : III міжнародний симпозіум. Київ, 1978. Ч. 3. С. 67–72. **34.** J. D. Joel D. W. Justin. *Earth dam projects.* New York : J. Wiley & sons, inc., 1932. **35.** Поляков В. Л. Математичне моделювання безвідривного нелінійного фільтрування зі зміною напрямку. *Реп. Нац. Академія наук України.* 2020. Вип. 5(5). doi:

10.15407/dopovidi2020.05.031. **36.** M. A. Boller, M. C. Kavanaugh. Particle characteristics and headloss increase in granular media filtration. *Water Res.* 1995. Vol. 29. P. 1139–1149. doi: 10.1016/0043-1354(94)00256-7. **37.** J. E. Tobiason, G. S. Johnson, P. K. Westerhoff, B. Vigneswaran. Particle Size and Chemical Effects on Contact Filtration Performance. *J. Environ. Eng.* 1993. Vol. 119(3). P. 520–539. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1993)119:3(520). **38.** Поляков В. Л., Мартинов С. Ю. Розрахунок знезалізнення підземних вод на швидкому фільтрі. *Доповіді Національної академії наук України*. 2019. Вип. 3. doi: 10.15407/dopovidi2019.03.035. **39.** P. Ya. Polubarinova-Kochina, J. M. R. De Wiest. Theory of Ground Water Movement. *Princeton University Press*. 1962. URL: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt183pgrn> (дата звернення: 13.05.2025). **40.** J. (1804–1866) Dupuit. Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables : avec des considérations relatives au régime des grandes eaux, au débouché à leur donner, et à la marche des alluvions dans les rivières à fond mobile. 2-e édition revue et considérablement augmentée / par J. Dupuit... Paris : Dunod, 1863. URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62096061> (дата звернення: 17.04.2025). **41.** Хлапук М. М., Іващенко А. П., Яцик А. В. Фізичне та математичне моделювання деформацій ґрунту в навколодренній зоні. *Водне Господарство України*. 1999. Вип. 1–2. С. 36–38. **42.** J. Boussinesq. Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *J. Mathématiques Pures Appliquée*. 1904. Vol. 10. P. 5–78. **43.** C. Di Nucci. Unsteady free surface flow in porous media: One-dimensional model equations including vertical effects and seepage face. *Comptes Rendus Mécanique*. 2018. Vol. 346(5). P. 366–383. doi: 10.1016/j.crme.2018.03.003. **44.** F. Cimolin, M. Discacciati. Navier–Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media. *Appl. Numer. Math.* 2013. Vol. 72. P. 205–224. doi: 10.1016/j.apnum.2013.07.001. **45.** N. Alhassnawi. Pavlovsky method. 2018. doi: 10.13140/RG.2.2.21016.49922. **46.** Schilgaard J., Kirkham D., Frevert R. K. Physical and mathematical theories of tile and ditch drainage and their usefulness in design. *Agricultural Experiment Station. Iowa State College*, 1956. Bul. 436–2. P. 666–705. URL: https://publications.iowa.gov/48252/1/physical_mathematical_theories_of_tile_ditch_drainage_1956_OCR_.pdf (дата звернення: 15.02.2025). **47.** D. Kirkham. Potential Flow into Circumferential Openings in Drain Tubes. *J. Appl. Phys.* 1950. Vol. 21(7). P. 655–660. doi: 10.1063/1.1699726. **48.** J. Wesseling. A comparison of the steady state drain spacing formulas of Hooghoudt and Kirkham in connection with design practice. *J. Hydrol.* 1964. Vol. 2(1). P. 25–32. doi: 10.1016/0022-1694(64)90062-9. **49.** E. J. List. The steady flow of precipitation to an infinite series of tile drains above an impervious layer. *J. Geophys. Res.*, 1896–1977. 1964. Vol. 69(16). P. 3371–3381. doi: 10.1029/JZ069i016p03371. **50.** H. Y. Hammad. Closure to “Design of Tile Drainage for Arid Regions. *J. Irrig. Drain. Div.* 1965. Vol. 91(3). P. 85–86. doi:



10.1061/JRCEA4.0000377. **51.** О. Я. Олійник. Геогідродинаміка дренажу. Київ : Наукова думка, 1981. URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/hist/oleynik/index.htm> (дата звернення: 20.03.2025). **52.** А. Я. Бомба, В. М. Булавацький, В. В. Скопецький. Нелінійні математичні моделі процесів геогідродинаміки. Київ : Наукова думка, 2007. **53.** Іващенко А. П., Дмитрієв Д. А. Визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту на установці Дарсі. *Гідротехнічне будівництво* : зб. статей за матеріалами III наук.-техн. конференції / Укр. держ. акад. водн. госп. 1997. Ч. 2. С. 33–35. **54.** Бенчук О. П. Обґрунтування параметрів закритого горизонтального дренажу при роботі його в умовах інфільтраційного живлення : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Київ, 1988. 24 с. **55.** Громадченко В. Ю. Фільтраційні опори конструкцій горизонтального трубчастого дренажу осушувально-зволожувальних систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Рівне, 1992. 24 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0493U001142> (дата звернення: 02.06.2025). **56.** Іващенко А. П. Фільтраційні процеси навколо дрен і зволожувачів і їх вплив на водоприймальну здатність конструкцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.16. Рівне, 1999. 17 с. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/> (дата звернення: 02.06.2025). **57.** E. Ghane, B. Dialameh, Y. AbdalAal, M. Ghane. Knitted-sock geotextile envelopes increase drain inflow in subsurface drainage systems. *Agric. Water Manag.* 2022. Vol. 274. P. 107939. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107939. **58.** Dierickx: Non-ideal drains – Google Академія. URL: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Non-Ideal%20Drains.%20Agricultural%20Drainage.%20Agronomy%20Monograph.%2038&publication_year=1999&author=W.%20Dierickx (дата звернення: 02.06.2025). **59.** Filtration compatibility of clay-nonwoven geotextiles under normal stress. *Geosynth. Int.* 2025. doi: 10.1680/jgein.24.00029. **60.** Хлапук М. М. Дослідження дренажних трубопроводів різних конструкцій під час роботи їх у режимі двостороннього регулювання на легких ґрунтах: науково-технічний звіт / Укр. ін-т інженерів водного господарства. Рівне, 1985. 55 с.

REFERENCES:

1. M. M. Khlapak, S. V. Klimov, O. V. Bezusiak, i A. O. Shumlyanskyi. Experimental study of the effect of hydraulic gradient on soil hydraulic conductivity. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2024. Vol. 1415(1). P. 012090. doi: 10.1088/1755-1315/1415/1/012090. **2.** Experimental investigation of global backward erosion and suffusion of soils in embankment dams. *Can. Geotech. J.* 2018. Vol. 56(6). P. 789–807. doi: 10.1139/cgj-2018-0088. **3.** L. Cao, X. Li, Z. Li, J. Liu, J. Li, i X. Lv. Influence of drainage flow velocity on microscopic cohesive soil erosion and macroscopic road collapse evolution: A case study in Beijing, China. *Eng. Fail. Anal.* 2024. Vol. 164. P. 108698. doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108698. **4.** Y. Liang, T.-C. J. Yeh, Y. Zha, J. Wang,

M. Liu, i Y. Hao. Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage. *Soils Found.* 2017. Vol. 57(5). P. 849–860. doi: 10.1016/j.sandf.2017.08.017.

5. Q. Xie, J. Liu, B. Han, H. Li, Y. Li, X. Li. Critical Hydraulic Gradient of Internal Erosion at the Soil–Structure Interface. *Processes.* 2018. Vol. 6(7). doi: 10.3390/pr6070092.

6. A. F. Dmytriiev, M. M. Khlapuk, D. A. Dmytriiev. Protsesy deformatsii nezviazanykh gruntiv u prydrnazhnii zoni ta yikh vplyv na robotu drenazhno-zroshuvalnykh system : monohrafiia. Rivne : RDTU, 2002.

7. F. Federico. Particle Migration Phenomena Related to Hydromechanical Effects at Contact between Different Materials in Embankment Dams. *Granular Materials.* IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/67785.

8. R. Bridle i R. Fell. Internal erosion of existing dams, levees and dykes, and their foundations. *Bulletin.* 2013. Vol. 164.

9. Z. Huang, H. Xu, Y. Bai, B. Zhang, J. Liu. Hydromechanics based prediction of suffusion development in spatially random soil structures. *Eng. Geol.* 2024. Vol. 341. P. 107725. doi: 10.1016/j.enggeo.2024.107725.

10. H.-J. Lee, I.-H. Kim, C.-K. Chung. Experimental Assessment on the Internal Instability of Broadly Graded Silty Sand. *KSCE J. Civ. Eng.* 2022. Vol. 26(4). P. 1643–1651. doi: 10.1007/s12205-022-0924-5.

11. Parfentieva I. O., Vereshko O. V., Husachuk D. A. Osnovy ta fundamenty : navch. posib. dlia stud. spets. 192 «Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia. Lutsk: LNTU, 2017. 296 s. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/uk/147258369/6250> (data zvernennia: 17.04.2025).

12. Svirenko L. P., Bryhinets K. D., Diadin D. V. Inzhenerno-heolohichni vlastyvoli hirskykh porid ta shtuchnykh gruntiv : navch-metod. posib. Kharkiv : KhNAMH, 2004. 58 s.

13. Rekomendatsii z proektuvannia zvorotnykh filtriv hidrotekhnichnykh sporud. VNDIH: Enerhiia, 1981. 105 s. URL: <http://www.cawater-info.net/bk/dam-safety/files/4293758206.pdf> (data zvernennia: 16.04.2025).

14. Mits Y. S. Doslidzhennia suffoziinoi stiikosti gruntiv pry vlashtuvanni drenazhiv z porystoho betonu : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.07. Dnipro, 1969. 24 s.

15. CiŠtin J. Sufozni rychlost v nesoudrzných. Krizice odborných spisů vysokého uceni technického v Brne. *Referaty VII. Vedecke konference stavebni fakultu VUT.* 1974. Svazek B-45. S. 311–317.

16. N. Fötsch. LibGuides: Literature search: Snowball and citation search. URL: <https://libguides.ru.nl/literaturesearch/snowball> (data zvernennia: 01.01.2024).

17. M. J. Page et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021. Vol. 372. P. n160. doi: 10.1136/bmj.n160.

18. C. F. Wan, R. Fell. Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2008. Vol. 134(3). P. 401–407. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(401).

19. T. C. Kenney, D. Lau. Internal stability of granular filters. *Can. Geotech. J.* 1985. Vol. 22(2). P. 215–225. doi: 10.1139/t85-029.

20. J. Lafleur, J. Mlynarek, A. Rollin. Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. *J. Geotech. Eng.* 1989. Vol. 115. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:12(1747).

21. K. Horikoshi, A. Takahashi. Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fractions in embankment subjected to seepage flow. *Soils Found.* 2015. Vol. 55(5).



P. 1293–1304. doi: 10.1016/j.sandf.2015.09.027. **22.** Y. Luo, X. Zhang, M. Xiao. Influence of constriction-based retention ratio on suffusion in double-layered alluvial foundation with a cutoff wall. *Soils Found.* 2020. Vol. 60(6). P. 1489–1506. doi: 10.1016/j.sandf.2020.10.002. **23.** S. Dassanayake, A. Mousa, I. M. S. K. Ilankoon, G. Fowmes. Internal Instability in Soils: A Critical Review of the Fundamentals and Ramifications. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2022. Vol. 2676. doi: 10.1177/03611981211056908. **24.** Khlapuk M. M. Novi aspekty roboty drenaznykh konstruksii, vyivleni za dopomohoiu fizychnoho ta matematychnoho modeliuвання. *Materialy III nauk.-tekhn. konf. Ukr. derzh. akad. vodn. hosp-va* : zb. statei. 1997. Ch. 2. S. 66–69. **25.** Pyvovar N. H., Buhai N. H., Rychko V. O. Drenazh iz voloknystymy filtramy : monohrafiia. Kyiv : Naukova dumka, 1980. 216 s. URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/hist/pivovar-bugai-rychko/pages/001.htm> (data zvernennia: 17.04.2025). **26.** X. Zhang, T. Huang, Y. Wu. Soil drainage clogging mechanism under vacuum preloading: A review. *Transp. Geotech.* 2024. Vol. 45. P. 101178. doi: 10.1016/j.trgeo.2023.101178. **27.** Bomba A. Ya., Khlapuk M. M., Sydoruk B. P. Modeliuвання vzaiemovplyvu hradiientiv i filtratsiinoho seredovyscha ta problemy stiikosti dyspersnykh system. *Fizyka kondensovanykh vysokomolekuliarnykh system.* 1997. Vyp. 3. S. 202–207. **28.** Bomba A. Ya., Khlapuk M. M., Sydoruk B. P. Pro modeliuвання protsesu filtratsii do vodopryymalnykh otvoriv dren v seredovyschakh, shcho deformuiutsia. *Suchasni problemy teorii filtratsii* : zb. nauk. statei / Ukr. derzh. akad. vodn. hosp. 1998. S. 27–33. **29.** Khlapuk M. M. Osoblyvosti modeliuвання neliniinykh protsesiv filtratsii iz zvolozhuvacha v seredovyshe, shcho deformuietsia. *Suchasni problemy teorii filtratsii* : zb. nauk. Statei / Ukr. derzh. akad. vodn. hosp. 1998. S. 151–156. **30.** Yatsyk A. V., Khlapuk M. M., Ivashchenko A. P. Filtratsiia do horizontalnogo keramichnogo drenazhu. *Vodne hospodarstvo Ukrainy.* 1997. № 4. S. 15–17. **31.** A. Ya. Bomba, S. Kashtan. Modeliuвання zvorotnogo vplyvu hradiientiv potentsialu na protses filtratsii. *Visnyk Ternopilskoho Derzhavnogo Tekhnichnogo Universytetu.* 2004. Vyp. 9(1). S. 123–129. **32.** Khehai V. V. Pratsездатnist zakrytoho horizontalnogo drenazhu na zroshuvanykh zemliakh ta shliakhy yii pidvyshchennia : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 06.01.02. Tashkent, 1984. 19 s. **33.** Miodushevskiy V., Krul P. Doslidzhennia filtratsiinykh protsesiv u tili zemlianoi hrebli. *Filtratsiia vody v porystykh seredovyschakh* : III mizhnarodnyi sympozium. Kyiv, 1978. Ch. 3. S. 67–72. **34.** J. D. Joel D. W. Justin. Earth dam projects. New York : J. Wiley & sons, inc., 1932. **35.** Poliakov V. L. Matematyчне modeliuвання bezvidryvnoho neliniinoho filtruvannya zi zminoiu napriamku. *Rep. Nats. Akademiiia nauk Ukrainy.* 2020. Vyp. 5(5). doi: 10.15407/dopovidi2020.05.031. **36.** M. A. Boller, M. C. Kavanaugh. Particle characteristics and headloss increase in granular media filtration. *Water Res.* 1995. Vol. 29. P. 1139–1149. doi: 10.1016/0043-1354(94)00256-7. **37.** J. E. Tobiason, G. S. Johnson, P. K. Westerhoff, B. Vigneswaran. Particle Size and Chemical Effects on Contact Filtration Performance. *J. Environ. Eng.* 1993. Vol. 119(3). P. 520–539. doi:

10.1061/(ASCE)0733-9372(1993)119:3(520). **38.** Poliakov V. L., Martynov S. Yu. Rozrakhunok znezalznennia pidzemnykh vod na shvydkomu filtri. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2019. Vyp. 3. doi: 10.15407/dopovidi2019.03.035. **39.** P. Ya. Polubarinova-Kochina, J. M. R. De Wiest. Theory of Ground Water Movement. Princeton University Press. 1962. URL: <https://www.jstor.org/stable/j.ctt183pgrn> (data zvernennia: 13.05.2025). **40.** J. (1804–1866) Dupuit. Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables : avec des considérations relatives au régime des grandes eaux, au débouché à leur donner, et à la marche des alluvions dans les rivières à fond mobile. 2-e édition revue et considérablement augmentée / par J. Dupuit... Paris : Dunod, 1863. URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62096061> (data zvernennia: 17.04.2025). **41.** Khlapak M. M., Ivashchenko A. P., Yatsyk A. V. Fizychno ta matematychno modeliuvannia deformatsii hruntu v navkolodrennii zoni. *Vodne Hospodarstvo Ukrainy*. 1999. Vyp. 1–2. S. 36–38. **42.** J. Boussinesq. Recherches théoriques sur lécoulement des nappes deau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *J. Mathématiques Pures Appliquée*. 1904. Vol. 10. P. 5–78. **43.** C. Di Nucci. Unsteady free surface flow in porous media: One-dimensional model equations including vertical effects and seepage face. *Comptes Rendus Mécanique*. 2018. Vol. 346(5). P. 366–383. doi: 10.1016/j.crme.2018.03.003. **44.** F. Cimolin, M. Discacciati. Navier–Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media. *Appl. Numer. Math.* 2013. Vol. 72. P. 205–224. doi: 10.1016/j.apnum.2013.07.001. **45.** N. Alhassnawi. Pavlovsky method. 2018. doi: 10.13140/RG.2.2.21016.49922. **46.** Schilgaard J., Kirkham D., Frevert R. K. Physical and mathematical theories of tile and ditch drainage and their usefulness in design. *Agricultural Experiment Station. Iowa State College*, 1956. Bul. 436–2. P. 666–705. URL: https://publications.iowa.gov/48252/1/physical_mathematical_theories_of_tile_ditch_drainage_1956_OCR_.pdf (дата звернення: 15.02.2025). **47.** D. Kirkham. Potential Flow into Circumferential Openings in Drain Tubes. *J. Appl. Phys.* 1950. Vol. 21(7). P. 655–660. doi: 10.1063/1.1699726. **48.** J. Wesseling. A comparison of the steady state drain spacing formulas of Hooghoudt and Kirkham in connection with design practice. *J. Hydrol.* 1964. Vol. 2(1). P. 25–32. doi: 10.1016/0022-1694(64)90062-9. **49.** E. J. List. The steady flow of precipitation to an infinite series of tile drains above an impervious layer. *J. Geophys. Res.*, 1896–1977. 1964. Vol. 69(16). P. 3371–3381. doi: 10.1029/JZ069i016p03371. **50.** H. Y. Hammad. Closure to “Design of Tile Drainage for Arid Regions. *J. Irrig. Drain. Div.* 1965. Vol. 91(3). P. 85–86. doi: 10.1061/JRCEA4.0000377. **51.** O. Ya. Oliinyk. Heohidrodynamika drenazhu. Kyiv : Naukova dumka, 1981. URL: <http://www.cawater-info.net/library/rus/hist/oleynik/index.htm> (data zvernennia: 20.03.2025). **52.** A. Ya. Bomba, V. M. Bulavatskyi, V. V. Skopetskyi. Nelineini matematychni modeli protsesiv heohidrodynamiky. Kyiv : Naukova dumka, 2007. **53.** Ivashchenko A. P., Dmytriiev D. A. Vyznachennia koefitsiienta filtratsii



gruntu na ustanovtsi Darsi. *Hidrotekhnichne budivnytstvo* : zb. statei za materialamy III nauk.-tekhn. konferentsii / Ukr. derzh. akad. vodn. hosp. 1997. Ch. 2. S. 33–35. **54.** Benchuk O. P. Obgruntuvannia parametriv zakrytoho horizontalnogo drenazhu pry roboti yoho v umovakh infiltratsiinoho zhyvlennia : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 06.01.02. Kyiv, 1988. 24 s. **55.** Hromadchenko V. Yu. Filtratsiini opory konstruktsii horizontalnogo trubchastoho drenazhu osushuvalno-zvolozhuvalnykh system : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 06.01.02. Rivne, 1992. 24 s. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0493U001142> (data zvernennia: 02.06.2025). **56.** Ivashchenko A. P. Filtratsiini protsesy navkolo dren i zvolozhuvachiv i yikh vplyv na vodopryimalnu zdatsnist konstruktsii : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.16. Rivne, 1999. 17 s. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/> (data zvernennia: 02.06.2025). **57.** E. Ghane, B. Dialameh, Y. AbdalAal, M. Ghane. Knitted-sock geotextile envelopes increase drain inflow in subsurface drainage systems. *Agric. Water Manag.* 2022. Vol. 274. P. 107939. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107939. **58.** Dierickx: Non-ideal drains – Google Академія. URL: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Non-Ideal%20Drains.%20Agricultural%20Drainage.%20Agronomy%20Monograph.%2038&publication_year=1999&author=W.%20Dierickx (data zvernennia: 02.06.2025). **59.** Filtration compatibility of clay-nonwoven geotextiles under normal stress. *Geosynth. Int.* 2025. doi: 10.1680/jgein.24.00029. **60.** Khlapuk M. M. Doslidzhennia drenazhnykh truboprovodiv riznykh konstruktsii pid chas roboty yikh u rezhymi dvostoronnoho rehuliuвання na lehkykh gruntakh : naukovotekhnichniy zvit / Ukr. in-t inzheneriv vodnoho hospodarstva. Rivne, 1985. 55 s.

Khlapuk M. M., Doctor of Engineering, Professor, Klimov S. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Biletskyi A. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Shumlianskyi A. O., Post-graduate Student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), Osadchyi V. S., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, s.v.klimov@nuwm.edu.ua)

ANALYSIS OF THEORETICAL STUDIES OF MECHANICAL SUFFUSION AND COLMATAGE IN DRAINAGE SYSTEMS

The article provides an analysis of theoretical studies of suffusion processes occurring in drainages on reclamation systems and hydraulic structures made of soil materials. The primary focus of the article is mechanical suffusion, defined as the transfer and removal of small particles in the soil massif under the influence of

filtration flow, accompanied by changes in the porosity of the medium and the filtration coefficient. The mechanisms of internal and external suffusion, as well as the process of colmatage – the stoppage of the movement of particles in the pores – are considered.

This paper presents a comprehensive review of the extant literature on the subject, together with the results of laboratory and field studies. The aim of the study is to characterise the influence of the hydraulic gradient on the intensity of filtration deformations. The following paper summarises the known criteria of soil suction resistance, in particular the coefficient of heterogeneity of the particle size distribution and the critical hydraulic gradient. An analysis is conducted of traditional and modern models that are utilised for the quantitative prediction of the development of sulfides in heterogeneous media.

The necessity of supplementing the classical equations of filtration flow with the equations of mass balance of moving particles is substantiated. It has been demonstrated that contemporary classical theoretical approaches (Darcy, Boussinesq, Dupui – Forchheimer's model, etc.) fail to account for temporal variations in the filtration coefficient resulting from suffusion deformations of the soil massif. The analysis of the results of theoretical and experimental studies confirms the significant impact of particle movement on the water intake capacity of drains.

It is concluded that predicting the performance of drainage systems is impossible without taking into account the suffusion changes in the subsoil zone. It is imperative to enhance mathematical models by incorporating the progression of suffusion processes as a pivotal factor influencing the transformation of hydraulic parameters within the filtration system.

***Keywords:* suffusion; colmatage (clogging); hydraulic gradient; filtration deformations; porous medium.**