

УДК 504.058:628.31

*С. Р. Артем'єв, к.т.н., доцент, зав. каф. (ORCID 0000-0003-4535-1990)**О. В. Рибалова, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-8798-4780)**О. В. Бригада, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-5777-8516)**О. В. Льїнський, к.б.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-1737-9462)**А. О. Мацак, к.т.н., викл. каф. (ORCID 0000-0003-2856-9437)**Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАМУЛЕННЯ ПРИСТРОЇВ ІНФІЛЬТРАЦІЇ ДОЩОВОГО СТОКУ З РІЗНИМИ ФІЛЬТРУЮЧИМИ НАСАДКАМИ

Досліджено процес замулювання на багат шарових інфільтраційних пристроях під час фільтрації дощового стоку. Замулювання пристроїв визначає їх експлуатаційний термін, однак кількісне розуміння процесу замулювання наразі є обмеженим особливо на пристроях з різною фільтруючою складовою. Тому, було проведено лабораторне дослідження процесу інфільтрації стоку, для кращого розуміння фізичних процесів замулювання. Процес замулювання вивчався за умов постійного рівня води, з концентрацією завислих речовин 80–300 мг/дм³ з використанням чотирьох фільтруючих насадок: базальт, тирса, вапняк та пінополіуретан. Встановлено, що найбільший шар замулювання утворюється на межі між фільтром і ґрунтом через утворення мулової пробки, яка «захищає» межу фільтр/ґрунт. Проаналізовано склад мулової пробки верхнього шару, фільтруючого об'єму колони та визначено, що фізичне замулювання в основному викликане міграцією частинок осаду діаметром менше 0,05–0,071 мм (фракція яких є головною в формуванні мулової пробки). Досліджено питання розподілення завислих часток відповідно за розмірами по всьому об'єму фільтруючого пристрою. Встановлено головні фракції, які найбільш осідають та впливають на процес замулювання пристроїв. Визначено залежності між швидкістю інфільтрації дощового стоку та накопиченням завислих часток у фільтруючому шарі. Найменші показники зниження швидкості фільтрації спостерігались при використанні вапняку (40%), пінополіуретан та базальт показали схожі результати (51% та 55%), найбільше зниження швидкості фільтрації припало на тирсу – 74%. Практична значимість результатів дослідження полягає у розумінні процесів забруднення (замулювання) пристроїв очищення поверхневого стоку, що в свою чергу дає можливість модернізації систем очищення (конструкція, фільтруючі насадки тощо) та мінімізації накопичення певних фракцій завислих речовин на поверхні водозбору.

Ключові слова: дощові стічні води, замулювання, фільтрація, фільтруючі насадки, ґрунт, час фільтрування

1. Вступ

Дощові стічні води все більше використовуються в міському господарстві і розвитку сталого водокористування, особливо в умовах дефіциту води [1]. Методи інфільтраційного очищення і акумулювання стоку, такі як свердловини для закачування підземних вод [2], інфільтраційні басейни [3] і системи інфільтраційних споруд [4], можуть зберігати поверхневу воду в водоносному горизонті, тим самим допомагаючи відновити гідрологічні характеристики регіону [5]. Однак засмічення систем фільтрації є основним обмежуючим фактором, який викликає зниження швидкості інфільтрації і проникності стоку за рахунок фізичних, хімічних і біологічних процесів [7]. У інфільтраційних спорудах механічне засмічення є головним типом засмічення, за рахунок високої концентрації твердих часток, що присутні в дощових водах [8].

Системи очищення дощового стоку, наведені вище, використовують саме для швидкого відводу (фільтрації) дощових вод з поверхні водозбору, які можуть призвести до підтоплення територій та іншим негативним наслідкам. Дослідження даних параметрів дасть розуміння впливу головних чинників які впливають на цей процес (розмір фракції завислих часток, ефективність фільтруючих матеріа-
Environmental Protection Technologies. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-15

лів, розподілення часток в об'ємі споруди тощо) і за рахунок цього подальшої модернізації даних систем та підвищенню ефективності (швидкості) фільтрації поверхневого стоку з поверхні водозбору. Тому, вивчення процесу фільтрації дощового стоку і пов'язаних з цим факторів: замулення/засмічення фільтруючого шару, розмірів та розподіленню часток в фільтруючому шарі, залежності швидкості фільтрації при використанні різних фільтруючих матеріалів – є актуальним завданням.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Механічне засмічення відбувається за рахунок накопичення частинок на поверхні фільтруючого шару, або шляхом осадження всередині пористого фільтруючого матеріалу [9]. У першому випадку утворюється забруднюючий шар де скуплюються завислі тверді частинки. У другому випадку тверді частинки переміщуються через пористу поверхню фільтруючого матеріалу, в якому і залишаються [10]. Головні параметри, які впливають на відкладення завислих часток (ЗЧ) є фільтруючий матеріал [11, 12], концентрація ЗЧ [13, 14], розміри ЗЧ і фільтруючого матеріалу [15, 16], а також гідродинамічні ефекти [9, 17]. Феномен замулювання супроводжується помітними втратами напору і швидкості фільтрації стоку [18–20].

Попереднє дослідження [21] свідчить, що однієї характеристики відкладення частинок у пористому середовищі недостатньо для повного опису процесу замулювання. В даній роботі досліджено ступінь впливу мулового шару на швидкість процесів фільтрації і головна увага приділена засобам регенерації та очищення поверхні фільтруючого шару, без визначення фракційного складу осаду і головних фракцій що створюють «мулову пробку». Крім того, в даній роботі, в якості фільтруючого матеріалу використовується гравійна фракція без використання верхнього шару ґрунту і нижнього шару піску, що є критичним при розподіленні часток і значенню швидкості фільтрації. В подібних роботах [22, 23] з гравійним фільтруючим матеріалом, показано зв'язок між морфологією завислих часток і поверхнею відкладення в спорудах, однак дане розподілення не може бути достатньо точним без верхнього ґрунтового шару, а також рослинного шару, який присутній у більшості подібних споруд на урбанізованих територіях [4].

В роботах [24, 25] проведено визначення маси ЗЧ, що накопичуються по всій довжині пристрою, за час процесу фільтрації і значна увага присвячена розробці математичного моделювання процесів інфільтрації з розробкою різних моделей і прогнозних варіантів процесів замулювання, але без вивчення фракційного складу верхнього шару та на межі фільтр/ґрунт. Слід додати, що як і в наведених вище роботах, в цих дослідженнях використовують один тип фільтруючого матеріалу – звичайний пісок, без верхнього шару і рослинного покриву. Висота споруд які були використані в дослідженнях (30–40 см) не дає змоги точно визначити саме процеси розподілення ЗЧ у фільтруючому шарі і тому не може бути репрезентативною. В подібній роботі [26] розроблено емпіричні моделі для опису процесу замулювання шляхом встановлення залежності між відкладенням та втратою напору та гідравлічною провідністю та визначена залежність між швидкістю фільтрації стоку і замулення фільтруючого матеріалу (піску), але не вивчено використання інших фільтруючих матеріалів.

Замулювання виникає, коли пористі канали фільтруючих насадок є занадто малими для проходження ЗЧ, і цей процес визначається співвідношенням між діаметром часток і розміром зерен пористого середовища. В роботі [27] зафіксовані

різні порогові значення ЗЧ які спричиняють ефект замулення, розміри коливаються в межах від 0,005 до 1 мм, але не встановлено головні розміри часток що формують мулову пробку на верхньому шарі пристрою і залежність між розподіленням ЗЧ при використанні різних фільтруючих насадок по всьому фільтруючому шарі.

Поточні дослідження замулювання у системах фільтрації дощових вод обмежуються вертикальними та горизонтальними пристроями, і багатьох випадках з використанням одної фільтруючої насадки, тобто суцільного фільтруючого шару який складається з одного матеріалу. Як показують дані роботи [28, 29], використання однотипної насадки добре підходить щодо вивчення процесів гідродинаміки але не відповідає системам, які впроваджуються на територіях водозбору, і які в своєму складі містять різні шари фільтруючого матеріалу і відповідно мають інші параметри фільтрації та відведення стоку. В подібних роботах вивчення процесу замулювання полідисперсних ЗЧ не завжди може бути достовірним і потребує додаткових експериментів.

Таким чином, ця робота присвячена важливому дослідженню – визначенню залежності швидкості фільтрації і розподілення ЗЧ від матеріалу фільтруючого шару та аналіз фракційного складу мулового шару (на границі фільтр/грунт), що формується під час фільтрації дощового стоку у вертикальному багатошаровому пристрої (колоні), в умовах контрольованій подачі забрудненої дощової води.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження процесу замулювання на багатошарових інфільтраційних пристроях під час очищення дощового стоку.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні завдання:

- вивчення зміни швидкості фільтрації під час замулювання на багатошарових фільтруючих пристроях з різними типами фільтруючого матеріалу;
- аналіз фракційного складу затриманих завислих часток у пористому фільтруючому середовищі пристроїв та на межі фільтр/грунт;
- визначення розподілення завислих часток в залежності від використання фільтруючого матеріалу по всьому об'єму фільтруючої колоні.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – пристрої інфільтрації дощового стоку.

Предмет дослідження – процес замулювання інфільтраційних пристроїв очищення дощового стоку, що використовуються на урбанізованих територіях.

Основна гіпотеза дослідження полягає в наступному – перевірити ймовірну залежність зміни швидкості фільтрації, розміри фракції що спричиняють процес замулення (як в самому фільтруючому матеріалі так і на поверхні фільтр/грунт) та проаналізувати вірогідне розподілення ЗЧ по всьому об'єму пристрою, за рахунок використання різних фільтруючих насадок у вертикальному багатошаровому інфільтраційному пристрої очищення дощового стоку;

Для перевірки гіпотези використовували експериментальну модельну установку (рис.1) яка складається з плексигласового короба з шириною сторін 12 см та довжиною основної частини 55 см, які звужуються до низу. Представлена модельна споруда завантажувалась фільтруючим матеріалом, та включала в себе крім піску та верхнього шару ґрунту, фільтруючі насадки, що призводять до затримання ЗЧ та підвищення адсорбції органічної речовини, і як результат формують більш якісне очищення дощового стоку. Пристрій має отвір на виході, закритий фільтром.

Цей фільтр з отворами діаметром 2 мм дозволяє очищеному стоку проходити, але не пропускає частинки фільтруючого матеріалу. Внизу пристрою знаходиться вентиль для зливу очищеного фільтрату та патрубков для відбору проб.

Багатошарова система пристрою: ґрунт, фільтруюча насадка, шар піску – дозволяє якісніше очищувати забруднений дощовий стік (за рахунок фільтруючої насадки) та швидше виводити очищену воду ніж споруди з одношаровим заповненням.

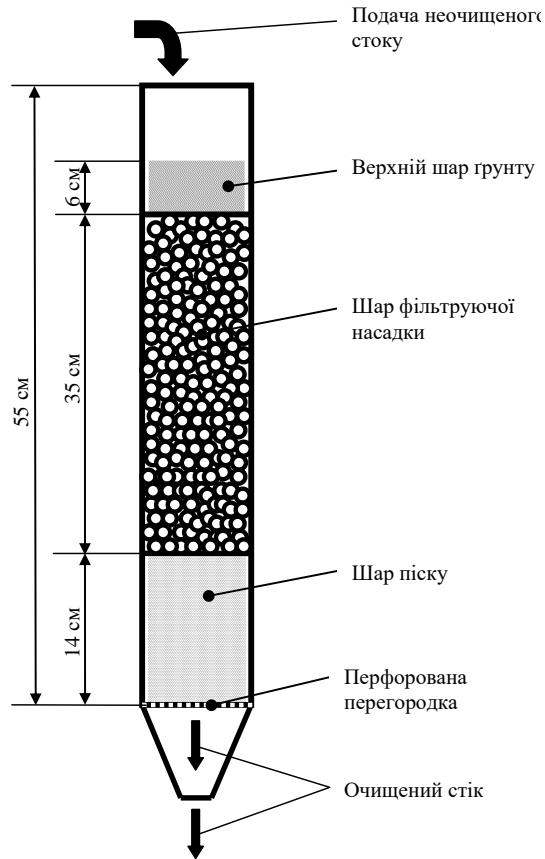


Рис.1. Експериментальна установка очищення дощового стоку

Вибір фільтруючих насадок зроблений на основі аналізу літературних джерел та експериментальних досліджень, проведених при виконанні попередніх робіт [30, 31] (рис. 2).



Рис. 2. Фільтруючі насадки: а – деревинна тирса; б – базальт; в – пінополіуретан (ППУ); г – вапняк

Деревинна тирса (10–0,2 мм) була використана завдяки своїй економічній доступності. Водночас є побічним продуктом, твердим відходом лісопереробних підприємств і до теперішнього часу вивозиться на полігони ТПВ. Дана фільтруюча насадка має добрі адсорбційні властивості та дуже легко піддається заміні і деструкції.

Базальтова крихта (фракція 2–0,5 мм) є відвалом при виробництві більш крупної фракції на кар'єрах гірничо-видобувного комплексу.

Гранули ППУ (розміром 1–3 см) зарекомендували себе як дуже стійкі до погодних умов, та своїми адсорбційними властивостями, крім того даний вид матеріалу дуже легко піддається регенерації.

Вапняк (фракція 2–3 см) був використаний як матеріал, який має добрі сорбційні властивості щодо органічних домішок, та є технічно та економічно доступним для використання в якості фільтруючої насадки.

Штучно-зроблена дощова вода, що містить концентрацію ЗЧ, які характерні для міських дощових вод [32, 33], була підготовлена в ємності 200 дм³. Цільова концентрація завислих речовин становила 80–300 мг/дм³, з ЗЧ, що мають діаметр (d)=0,025–1,5 мм. Для збереження рівномірної концентрації ЗЧ, було застосовано механічне перемішування. Підготовлена вода додавалась в колонку трохи вище фільтруючого шару за допомогою обертової форсунки.

На початку експерименту фільтруючий шар пристрою промивали дистильованою водою. Після того, як швидкість потоку, що виводиться, ставала стабільною (для забезпечення надійних вимірювань), додавали підготовлену дощову воду згідно плану експерименту. Кожен експеримент проводився до швидкості витoku, який коливався від 10 % до 25 % від початкового. Експериментальну колону потім обережно розбирали і вимірювали масу осаду, що сформувалась на верхньому фільтруючому шарі і по всьому об'єму завантаження.

В табл. 1 зазначено кількість і параметри проведених експериментів.

Табл. 1. Деталі експерименту

	Фільтруюча насадка			
	Тирса	Базальт	Вапняк	ППУ
Рівень води, см	1	1	1	1
Завислі речовини, мг/дм ³	190	180	180	210
Початкова швидкість фільтрації (v ₀), дм ³ /хв	0,05	0,029	0,1	0,19
Кінцева швидкість фільтрації, дм ³ /хв (% від v ₀)	12	22	15	14
Час експерименту, день	21	21	21	21

Всі експерименти проводили з постійним рівнем води на межі фільтр/грунт. Концентрацію завислих речовин, у підготовленій воді, вимірювали кожен раз на початку експерименту за методикою [34].

Швидкість фільтрації крізь кожен шар (в залежності від використаної фільтруючої насадки) встановлювалась експериментально – промиванням дистильованою водою, та визначенням v₀ за допомогою секундоміру.

Для вивчення залежності швидкості фільтрації і обробки даних використовували програмне забезпечення Office Excel, як для визначення параметрів фільтрації (V_n та v_{0%}) так і для побудови графічного матеріалу (графіки залежності/розподілення).

Фракційний склад осаду, на межі фільтр/грунт та в об'ємі пристрою, аналізувався за методикою [35]. Процес визначення фракції мулового шару проводився в певні етапи:

- відбір та зважування сформованого мулового шару на поверхні приладу та в об'ємі фільтруючого пристрою на лабораторних вагах Radwag AS 220.R2;
- сушка до постійної маси осаду в сушильній шафі за температурою 105 °С;

– фракційне розподілення на лабораторному віброситі CISA BA 200N з ситовими порядками 0,05–0,15 мм.

Після фракціонування процентний відсотковий склад мулового шару оброблявся в Office Excel за попередньо розробленою формулою.

5. Дослідження процесу замулювання інфільтраційних пристроїв очищення дощового стоку

5.1. Вивчення зміни швидкості фільтрації під час замулювання

Зміни швидкості фільтрації, на протязі всього експерименту, визначались для кожного типу фільтруючої насадки.

Розрахунок зменшення швидкості фільтрації визначався за формулою:

$$V_n = V_0 \cdot (1 - (\alpha \cdot n)), \quad (1)$$

де V_n – швидкість фільтрації на n -й день, V_0 – початкова швидкість фільтрації, α – емпіричний коефіцієнт, що враховує вплив замулювання (0,05), n – кількість днів.

Як видно з графіку (рис. 3) за час проведення експерименту швидкість фільтрації по всіх фільтруючих насадках від початкових значень V_0 поступово зменшувалась. Збільшення мулової «пробки» на поверхні верхнього шару (грунту) призводить до зменшення витоку фільтрату та уповільнює процеси очищення.

Найбільш суттєве зменшення швидкості фільтрації було зафіксовано на насадці з тирси. Вона продемонструвала зниження швидкості на 74 %, що вказує на значне накопичення осаду на її поверхні і збільшення щільності фільтруючого матеріалу. Початкова швидкість фільтрації становила 0,05 дм³/хв, але до кінця експерименту знизилася до 0,013 дм³/хв. Це може свідчити про те, що органічні матеріали, такі як тирса, піддаються швидшому замуленню через їх природну пористість та схильність до затримання дрібних часток.

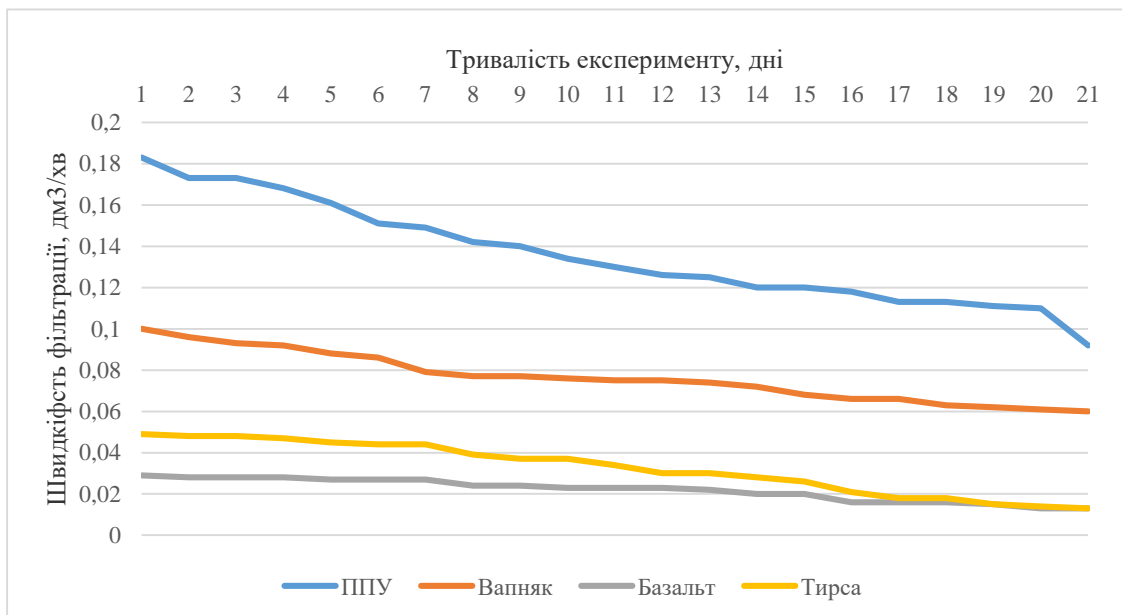


Рис. 3. Зменшення швидкості фільтрації (v_0) за час проведення експерименту

Насадки з ППУ та базальту продемонстрували схожі результати зменшення швидкості фільтрації. На пінополіуретані швидкість зменшилась на 51 % (з 0,19 дм³/хв до 0,092 дм³/хв), що може бути пов'язано зі структурою матеріалу, який має відносно великий об'єм для захоплення часток осаду та значну порис-

тість. Базальт, зі зменшенням швидкості на 55 % (з 0,029 дм³/хв до 0,013 дм³/хв), також показав схильність до помірного замулення, ймовірно через його текстуровану поверхню, яка затримує осад.

Найменший рівень зменшення швидкості фільтрації зафіксовано на вапнякових гранулах — лише 40 % (з 0,1 дм³/хв до 0,06 дм³/хв). Це свідчить про те, що вапняк, можливо, має кращу здатність пропускати воду навіть при накопиченні осаду, що робить його перспективним матеріалом для використання в фільтраційних системах, які піддаються високому навантаженню ЗЧ.

Крім того сформований верхній шар осаду заважає фільтрації інших часток в глибок пристрою, саме за рахунок формування мулової пробки (рис. 4).



Рис. 4. Мулова пробка після проведення експерименту

Загалом, ці результати вказують на те, що вибір фільтруючого матеріалу суттєво впливає на ефективність системи фільтрації дощового стоку та її стійкість до замулення.

5.2. Аналіз фракційного складу осаду

Також, на протязі дослідження, виявлено, що процес фільтрації дощового стоку крізь різні насадки призводить до нерівномірного розподілення ЗЧ по всьому об'єму фільтруючого матеріалу (рис. 5).

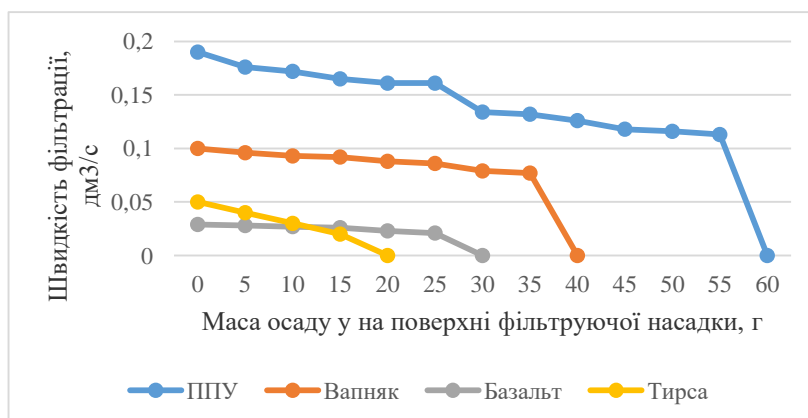


Рис. 5. Залежність швидкості фільтрації стоку від розповсюдження маси на фільтруючій насадці (по всьому периметру пристрою)

Це явище особливо помітне при використанні насадок з ППУ та вапняку. З отриманих результатів видно, що саме ці матеріали сприяли накопиченню найбіль-

шої кількості осаду. Маса осаду, які осідали в фільтруючому матеріалі з ППУ та вапняку, складала від 40 до 60 г, що значно перевищує показники інших фільтруючих насадок. Такий результат можна пояснити фізичними характеристиками матеріалів: великі проміжки між частками вапняку і пориста структура ППУ забезпечують більший простір для осадження завислих часток, що збільшує їх загальну кількість у фільтрі.

Визначимо фракційний склад осаду. Важливим чинником, що впливає на розподілення осаду, є не лише структура фільтруючого матеріалу, але й фракційний склад самого осаду. Як показали результати дослідження (табл. 2), основну частину осаду складають частки з діаметром $d=0,05-0,071$ мм. Саме ці частки виявилися найбільш схильними до осадження як на межі фільтр/грунт, так і по всій довжині фільтруючого матеріалу. Така фракція дрібних часток має високу ймовірність проникати глибоко в пори фільтру і накопичуватися там, поступово викликаючи процес замулення.

Табл. 2. Фракційний склад мулового осаду

Склад осаду, %	Фракція, мм				
	$\leq 0,05$	0,05 – 0,071	0,071 – 0,08	0,08 – 0,09	0,09 – 0,15
	12	43	22	10	12

Особливу увагу варто звернути на те, що навіть за різних умов експерименту (фільтруючі насадки) основною фракцією осаду залишаються частки діаметром $d=0,05-0,071$ мм, що свідчить про їх критичну роль у формуванні мулової пробки. Відповідно, аналіз складу завислих часток та розуміння їх поведінки у фільтруючих насадках є ключовим для оцінки ефективності роботи інфільтраційних систем. Встановлення залежності між фракційним складом осаду, типом фільтруючого матеріалу та розподіленням маси осаду дозволяє зробити висновки про можливі шляхи підвищення ефективності фільтраційних систем.

Протягом перших днів експерименту швидкість фільтрації знижувалась не так швидко, оскільки новий фільтруючий матеріал активно захоплює частки. Однак, після досягнення певного рівня замулювання процес стає більш стабільним, хоча швидкість фільтрації продовжує знижуватись.

Таким чином, експериментальні дані показують, що для забезпечення стабільної та ефективної роботи інфільтраційних систем важливо враховувати як фізичні властивості фільтруючого матеріалу, так і фракційний склад завислих часток.

Матеріали з великими порами або проміжками, такі як ППУ та вапняк, можуть ефективніше затримувати осад, проте цей процес може також призводити до замулення, якщо не контролювати вміст дрібних часток у поверхневих стоках.

5.3. Розподілення затриманих завислих часток у пористому середовищі та на межі фільтр/грунт

Спостереження щодо розподілу фракційного складу ЗЧ по об'єму фільтруючих насадок в експерименті дозволило краще зрозуміти процес замулення та основні чинники, що впливають на нього. Одним із ключових результатів дослідження стало виявлення домінуючої ролі часток діаметром $0,05-0,071$ мм. Ці частки склали 43 % загального складу осаду і показали найбільшу схильність до накопичення в фільтруючих насадках (рис. 6).

У той же час, частки менших розмірів, $\leq 0,05$ мм, хоча і становили 12 % складу осаду, мали менший вплив на загальне замулення через їх здатність руха-

тись через пори фільтраційних насадок без значного накопичення. Більш крупні фракції (0,09–0,15 мм) також склали 12 % від загального складу, але через свої розміри ці частки менш активно накопичувалися у фільтрі, оскільки часто залишались на поверхні або осідали поблизу межі фільтр/грунт.

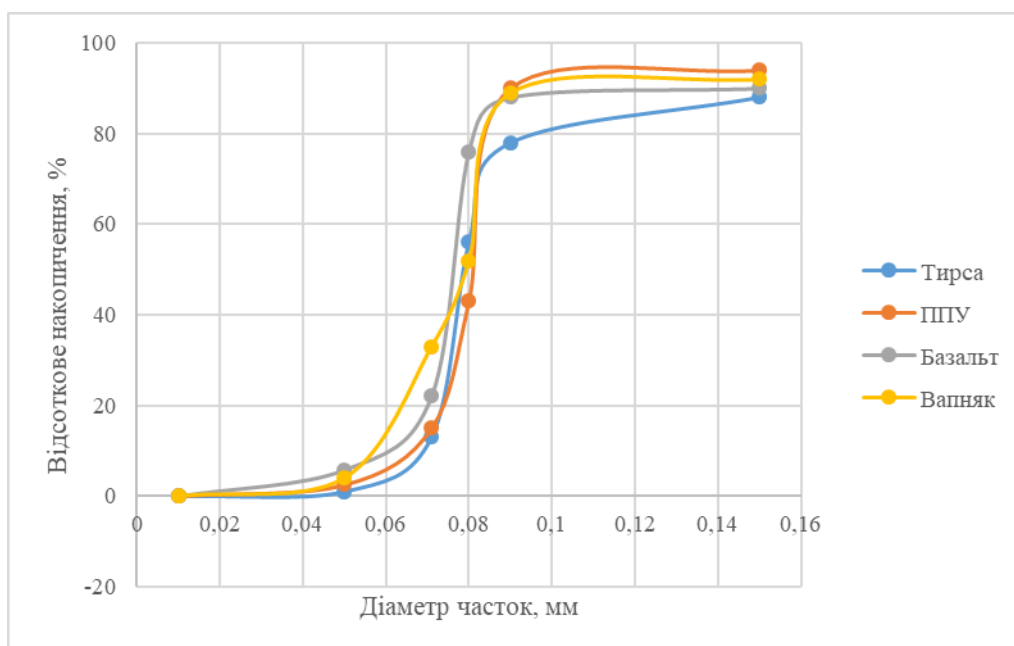


Рис. 6. Розподілення часток за середнім розміром по фільтруючим насадкам

Частки діаметром 0,071–0,08 мм (22 %) та 0,08–0,09 мм (10 %) також активно накопичувалися у фільтруючому шарі, проте їх вплив на загальний процес замулення був дещо менший порівняно з фракцією 0,05–0,071 мм. Це можна пояснити тим, що частки трохи більших розмірів швидше осідають на поверхні, не проникаючи глибоко в структуру фільтруючого матеріалу.

Ці спостереження дозволяють зробити висновок, що фільтруючі насадки найбільше схильні до накопичення осаду фракцій 0,05–0,071 мм, і цей результат був підтверджений у всіх пристроях, незалежно від типу фільтруючого матеріалу.

Крім того, частки цього діаметру виявилися найбільш стійкими до промивання і залишались у фільтрі навіть при постійному рівні води над поверхнею фільтр/грунт. Це підтверджує їхню ключову роль у формуванні мулової пробки та поступовому зменшенні швидкості фільтрації.

Таким чином, найбільше розподілення часток 0,05–0,071 мм в осаді свідчить про необхідність врахування їхнього впливу при плануванні експлуатації інфільтраційних систем. Розуміння фракційного складу осаду дозволяє оптимізувати процеси очищення та технічного обслуговування для уникнення критичного замулення фільтруючих насадок.

6. Обговорення необхідності вивчення процесу замулення в інфільтраційних пристроях очищення

Проведений аналіз показав, що важливим аспектом процесу замулення фільтруючих пристроїв дощового стоку є не тільки концентрація ЗЧ у поверхневому стоці, а і використання різних типів фільтруючих матеріалів, що в свою чергу впливають на швидкість фільтрації та ступінь відкладення мулового шару як на поверхні так і по всьому об'єму пристрою. Також, розмір ЗЧ, що формують муловий шар і відкладаються по всій поверхні насадок дав розуміння щодо головних фракцій які відповіда-

ють за процес замулювання навіть при використанні різних фільтруючих насадок.

Виходячи з цього, в роботі була виконана перевірка залежності швидкості фільтрації дощового стоку з використанням модельних експериментальних вертикальних споруд з різною фільтруючою насадкою. Для цього використано певні фільтруючі матеріали: тирса, базальт, гранули ППУ та вапняк. Найкращій результат під час всього експерименту показали колона з використанням вапнякових гранул (зменшення швидкості 40 %), насадки з ППУ, базальту та тирси мають менші значення (51 %, 55 % та 74 % відповідно). Даний результат може свідчити про доцільність використання і продовження досліджень різних фільтруючих матеріалів з різною пористою поверхнею, вагою та щільністю. Використання гравію або піску як суцільного фільтруючого шару не завжди є ефективним як з точки зору швидкості фільтрації і відведення стоку з поверхні так і з точки зору процесів замулення і очищення дощового стоку.

Також, в роботі було визначено головні фракції мулового шару, що відповідають за процес формування «пробки» та розповсюдження по всьому об'ємі споруди і фільтруючого матеріалу з використанням різних фільтруючих насадок. Аналіз формування мулового відкладення розглядався попередніми дослідженнями без врахування верхнього шару ґрунту і з однорідним фільтруючим наповнювачем, що має під собою наукову цінність але не відповідає реальним умовам та спорудам які використовуються на урбанізованих територіях. Визначено головну фракцію яка відповідає за формування мулового шару як на поверхні так і по всьому об'єму колони.

Продемонстровано розподіл визначених фракції ЗЧ по всьому об'єму фільтруючої споруди з використанням чотирьох фільтруючих насадок. Отримано конкретні дані щодо розподілу часток по всім спорудам з різними фільтруючими матеріалами. Різниця розподілення ЗЧ по об'єму з використанням різних матеріалів дає змогу вивчити процес швидкості замулення і тим самим сформувані більш ефективні конструкції систем очищення поверхневого стоку ніж в спорудах з однотипним наповнювачем (гравій або пісок).

Звичайно, дані дослідження проводились в лабораторних умовах і потребують подальшого вивчення з накопиченням даних щодо процесів замулення і аналізів відповідних параметрів.

Як слабкі сторони дослідження можна навести конструкційні особливості колон – в міських умовах біотраншеї/мульди/фільтруючі канали виглядають інакше (мають значний дренажний шар, геотекстильне шарування тощо), що може бути певним недоліком даної роботи і можливого доопрацювання у майбутньому.

Також, слід зазначити відсутність рослинного покриву, на верхньому шарі ґрунту, як в даній роботі так і більшості досліджень цього напрямку. Рослинний покрив, є критичним для споруд фільтрації особливо в міських умовах, тому подальші дослідження слід, за можливості виконувати саме з ним. Крім того слід розглянути питання витрати (подачі) стоку на фільтруючі колони: подача відбувається без врахування природних особливостей ґрунту (коефіцієнту фільтрації) та інтенсивності зрошування, що також може бути перспективним завданням для подальших робіт.

Таким чином, дослідження процесу замулення в інфільтраційних пристроях є необхідним не лише для покращення їхньої експлуатації, але й для забезпечення тривалого терміну служби. Знання, отримані в результаті таких досліджень, сприяють зниженню витрат на обслуговування та підвищенню екологічної безпеки урбанізованих територій.

7. Висновки

1. Проведено дослідження залежності швидкості фільтрації (v_0) від використання різних видів фільтруючих матеріалів. Найбільш суттєве зменшення швидкості фільтрації зафіксовано на насадці з тирси, вона продемонструвала зниження швидкості на 74 %. Це може свідчити про те, що органічні матеріали, такі як тирса, піддаються швидшому замуленню через їх природну пористість та схильність до затримання дрібних часток. Насадки з ППУ та базальту продемонстрували схожі результати зменшення швидкості фільтрації. На пінополіуретані швидкість зменшилась на 51 % (з 0,19 $\text{дм}^3/\text{хв}$ до 0,092 $\text{дм}^3/\text{хв}$), що може бути пов'язано зі структурою матеріалу, який має відносно великий об'єм для захоплення часток осаду та значну пористість. Базальт, зі зменшенням швидкості на 55 % (з 0,029 $\text{дм}^3/\text{хв}$ до 0,013 $\text{дм}^3/\text{хв}$), також показав схильність до помірному замуленню, ймовірно через його текстуровану поверхню, яка затримує осад. Найменший рівень зменшення швидкості фільтрації зафіксовано на вапнякових гранулах — лише 40 % (з 0,1 $\text{дм}^3/\text{хв}$ до 0,06 $\text{дм}^3/\text{хв}$). Це свідчить про те, що вапняк, можливо, має кращу здатність пропускати воду навіть при накопиченні осаду, що робить його перспективним матеріалом для використання в фільтраційних системах, які піддаються високому навантаженню ЗЧ.

2. Досліджено, що мулова пробка, на верхньому шарі споруди, складається з завислих часток фракцією: $\leq 0,05$ мм – 12 %, 0,05–0,071 мм – 43 %, 0,071–0,08 мм – 22 %, 0,08–0,09 мм – 10 %, 0,09–0,15 мм – 12 %, які поступово накопичуються, знижуючи проникність фільтра та збільшуючи опір проходженню води. Таким чином, найбільше замулювання спостерігається на поверхні фільтра або в його верхньому шарі, що потребує врахування в дизайні та експлуатації систем фільтрації дощового стоку. Аналіз складу мулової пробки у верхньому шарі фільтраційної колони та в її об'ємі вказує на те, що основну роль у замулюванні відіграють дрібнодисперсні частки осаду діаметром від 0,05–0,071 мм. Ці частки становлять значну частину завислого матеріалу, і є головним чинником, який призводить до фізичного замулювання. Частинки даного розміру мають високу схильність до міграції всередині фільтруючого шару, оскільки їхні розміри дозволяють їм легко проникати в пори фільтруючого матеріалу, але вони досить великі, щоб з часом осідати і блокувати їх. Це призводить до поступового зниження швидкості фільтрації та ефективності систем очищення. Це підкреслює важливість зменшення концентрації завислими речовин у воді перед її потраплянням у систему фільтрації або застосування відповідних технологій, які зможуть ефективно затримувати та виводити такі частки без утворення значного осаду.

3. Визначена домінуюча роль часток діаметром 0,05–0,071 мм. Ці частки склали 43 % загального складу осаду і показали найбільшу схильність до накопичення в фільтруючих насадках У той же час, частки менших розмірів, $\leq 0,05$ мм, хоча і становили 12 % складу осаду, мали менший вплив на загальне замулення через їх здатність рухатись через пори фільтраційних насадок без значного накопичення. Більш крупні фракції (0,09–0,15 мм) також склали 12 % від загального складу, але через свої розміри ці частки менш активно накопичувалися у фільтрі, оскільки часто залишалися на поверхні або осідали поблизу межі фільтр/грунт. Частки діаметром 0,071–0,08 мм (22 %) та 0,08–0,09 мм (10 %) також активно накопичувалися у фільтруючому шарі, проте їх вплив на загальний процес замулення був дещо менший порівняно з фракцією 0,05–0,071 мм. Ці спостереження до-

звляють зробити висновок, що фільтруючі насадки найбільше схильні до накопичення осаду фракцій 0,05–0,071 мм, і цей результат був підтверджений у всіх пристроях, незалежно від типу фільтруючого матеріалу. Таким чином, загальне зменшення швидкості інфільтрації обумовлене комбінацією розмірів часток та їхньої здатності до осідання, що вимагає подальших досліджень для оптимізації процесу очищення дощових стоків.

Література

1. Liping J., Binhui J., Xin Z. Research progress on dispersibility in subsurface infiltration system for treatment of domestic sewage. *China Institute of environmental sciences*. 2014. P. 843–854. doi: 10.1145/3070617.307064
2. Pan J., Yu L. Characteristics of subsurface wastewater infiltration systems fed with dissolved or particulate organic matter. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015. P. 479–488. doi: 10.1007/s13762-013-0408-8
3. Sobotkova M., Dusek, J., Alavi G., Sharma L., Ray C., Assessing the feasibility of soil infiltration trenches for highway runoff control on the Island of Oahu, *Water*. 2018. Vol. 11(3) P. 1–19. doi: 10.3390/w10121832
4. Tu M.C., Traver R. Clogging impacts on distribution pipe delivery of street runoff to an infiltration bed. *Water*. 2018. P. 1–14. doi: 10.3390/w10081045
5. Toran L., Jedrzejczyk, C., Water level monitoring to assess the effectiveness of stormwater infiltration trenches. *Environmental and Engineering Geoscience*. 2017. P. 1–14. doi: 10.2113/EEG-1802
6. Developing Reasonable Assurance: A Guide to Performing Model - Based Analysis to Support Municipal Stormwater Program Planning: US EPA. 2017. P. 51. URL: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-12/dev-reasonable-assur-guide-model-base-analys-munic-stormw-prog-plan-2017-02.pdf>
7. Improving Stormwater Program Monitoring, Evaluation, Tracking, and Reporting: Workshop Report and Recommendations. 2018. P. 65. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/improving_stormwater_program_monitoring-10-12-2018.pdf
8. Better Assessment Science Integrating Point & Non-point Sources Modeling Framework: National Exposure Research Laboratory, RTP, North Carolina: URL: <https://www.epa.gov/hydrowq/better-assessment-science-integrating-point-and-non-point-sources-basins>
9. Selbig W. R., Characterizing the distribution of particles in urban stormwater: advancements through improved sampling technology. *Urban Water Journal*. 2015. P. 1–11. doi: 10.1080/1573062X.2013.820334
10. Rossman L., Huber W. Storm Water Management Model Reference Manual Volume I: US EPA Office of Research and Development, Washington, DC, 2015. 233 p. URL: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=309346
11. Pitt R. E., Clark S. E., Eppakayala V. K., Sileshi R. Don't throw the baby out with the bathwater: sample collection and processing issues associated with particulate solids in stormwater. *Journal of Water management and Modeling*. 2016. P 1–13. doi: 10.14796/JWMM.C416
12. Petrucci G., Bonhomme C. The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: trade-offs among complexity, calibration, and

geographical data. *Journal of Hydrology*. 2014. P. 1–53. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.019

13. Mercado J. M. R., Maniquiz-Redillas M. C., Kim L. H. Laboratory study on the clogging potential of a hybrid best management practice. *Desalination Water Treat.* 2015. P. 3127–3133. doi: 10.1080/19443994.2014.922287

14. Kandra H. S., McCarthe D., Fletcher T. D., Deletic A. Assessment of clogging phenomena in granular filter media used for stormwater treatment. *Journal of Hydrology*. 2014. P. 1–10. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.009

15. Segismundo E. Q., Koo B. H., Lee B. Effects of Media Breakage on Infiltration Characteristics in Stormwater Management System. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 2016. P. 31–41. doi: 10.7843/kgs.2016.32.2.31

16. Segismundo E. Q., Kim L. H., Jeong S. M., Lee B. S. A Laboratory Study on the Filtration and Clogging of the Sand-Bottom Ash Mixture for Stormwater Infiltration Filter Media. *Water*. 2017. P. 32. doi: 10.3390/w9010032

17. Segismundo E. Q. Experimental Analysis of Particle Breakage and Clogging Potential for Granular Filter Media Used in Stormwater Management Systems. Master's thesis. 2016. P. 1–10. URL: <https://hal.science/hal-03296735/document>

18. Mercado J. M. R., Maniquiz-Redillas M. C., Kim L. H. Assessment and development of design criteria for a hybrid stormwater treatment system. *Desalination and Water Treatment*. 2017. P. 418–424. doi: 10.5004/dwt.2017.11447

19. Kandra H. S., Deletic A., McCarthy D. Assessment of Impact of Filter Design Variables on Clogging in Stormwater Filters. *Water Resources Management*. 2014. P. 1873–1885. doi: 10.1007/s11269-014-0573-7

20. Lee B., Kim L.H., Jeon P.G., Segismundo E. Modeling of Suspended Solid Clogging of Porous Media in Urban Stormwater Infiltration Facility. *Journal Korean Society*. 2014. P. 427–437. doi: 10.9798/KOSHAM.2014.14.6.427

21. Operation and maintenance of infiltration trench. In Minnesota. Stormwater manual, 2016 532 p. URL: https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Operation_and_maintenance_of_stormwater_infiltration_practices

22. El Mansouri B., Enhancement of groundwater potential by aquifer artificial recharge techniques. *Climate change*. 2015. P. 155–156. doi: 10.5194/piahs-366-155-2015

23. Sadiki M. L., Improvement of groundwater resources potential by artificial recharge technique: a case study of charf el Akab aquifer in the Tangier region, Morocco. 2019. P. 224–236. doi: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2019.03.003

24. El Mezouary L. Coupling of numerical flow model with the Susceptibility Index method to assess the groundwater vulnerability to pollution. *Water Resources*. 2020. P. 1–5. doi: 10.1145/3399205.3399246

25. El Mezouary L. Modélisation numérique de la variation saisonnière de la qualité des eaux souterraines de l'aquifère. *Magra Italie*. 2015. P. 25–31. doi: 10.1051/lhb/20150015

26. Manual of Nonpoint Source Pollutant Treatment Facility: Korea. Ministry of Environment, 2014. 282 p. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjtlaadkozje\)\)/reference/referencespapers?referenceid=1347469](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjtlaadkozje))/reference/referencespapers?referenceid=1347469)

27. Kandra H. S., McCarthy D., Fletcher T. D., Deletic A. Assessment of Clogging Phenomena in Granular Filter Media used for Stormwater Treatment, *Journal of Hydrology*. 2014. P. 518–527. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.009

28. Yong C. F., McCarthy D. T., Deletic, A. Predicting Physical Clogging of Porous Permeable Pavements, *Journal of Hydrology*. 2013. P. 48–55. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.009

29. Atlabachew A.; Shu L.; Wu P.; Zhang Y.; Xu Y. Numerical modeling of solute transport in a sand tank physical model under varying hydraulic gradient and hydrological stresses. *Hydrogeology Journal*. 2018. P. 2089–2113. doi: 10.1007/s10040-018-1758-6

30. Мацак А. О. Підвищення рівня екологічної безпеки водних об'єктів шляхом зменшення впливу дощових стічних вод з урбанізованих територій: дисс канд. тех. наук: 21.06.01/ Український Науково-Дослідний Інститут Екологічних Проблем, Харків, 2021. 151 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0421U100725>

31. Rybalova O. V., Matsak A. O. Natural methods of surface runoff treatment. Third International Conference of European Academy of Science. Bohn, Germany. 2018. P. 85-86. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/8806/1/Natural%20methods%20of%20surface%20runoff%20treatment.pdf>

32. Matsak A., Tsytlshvili K. Using different filter media of stormwater treatment performace. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2018. P. 19-23. URL: <https://www.calameo.com/read/005798408dafa9e98e9ba>

33. Горбань Н. С., Зінченко І. В., Мацак А. О. Підвищення екологічної безпеки водних об'єктів шляхом використання методів попереднього очищення дощових стічних вод. *Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки*. 2015 С. 87–90. URL: <http://www.niiep.kharkov.ua/node/2760>

34. ДСТУ 4082-2002 Паливо тверде. Ситовий метод визначання гранулометричного складу [Чинний від 2006-06-07] Київ, 2006. 24 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=75811

35. РНД 03-05-2002 Методика виконання вимірювань масової концентрації завислих речовин: Харків, 2002. 15 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0107508-04#Text>

S. Artemiev, PhD, Associate Professor, Head of the Department

O. Rybalova, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

O. Brihada, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

O. Ilinskyi, PhD, Associate professor, Senior Lecturer of the Department

A. Matsak, PhD, Lecturer of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

THE STUDY OF THE CLOGGING PROCESS OF STORMWATER INFILTRATION SYSTEMS WITH VARIOUS FILTER NOZZLES

The process of siltation on multilayer infiltration devices during filtration of stormwater runoff has been studied. Silting of devices determines their operational capacity, nevertheless the quantitative understanding of the silting process is quite limited, especially on devices with different filtering nozzles. Therefore, a laboratory study of the effluent infiltration process has been conducted to better understand the physical processes of siltation. The silting process has been studied under conditions of a constant water level, with a concentration of suspended solids of 80-300 mg/dm³ using four filtering nozzles: basalt, sawdust, limestone and polyurethane foam. It has been discovered that the largest layer of silting is formed at the boundary between the filter and the soil due to the formation of a sludge plug, which "protects" the filter/soil boundary. The composition of the sludge plug of the upper layer filtering the volume of the column has been analyzed and it was determined that the physical siltation is mainly caused by migration of sediment particles with a diameter of less than 0.05–0.071 mm (the fraction of which is the main one in the formation of the sludge plug). The issue of distribution of suspended solids

according to size throughout the volume of the filtering device has been studied. The main fractions that most adhesion and affect the process of silting devices have been established. Relationships between the rate of infiltration of stormwater runoff and the accumulation of suspended solids in the filter layer has been determined. The lowest rates of decrease in filtration rate have been observed when using limestone (40 %), polyurethane foam and basalt showed similar results (51 % and 55 %), the largest decrease in filtration rate was in sawdust – 74 %. The practical significance of the results of the study lies in understanding the processes of pollution (siltation) of surface runoff treatment devices, which in turn makes it possible to modernize cleaning systems (design, filter nozzles, etc.) and minimize the accumulation of certain fractions of suspended solids on the surface of the watershed.

Keywords: stormwater, clogging, filtration, filtering nozzles, soil, filtration time

References

1. Liping, J., Binhui, J., Xin, Z. (2014). Research progress on dispersibility in subsurface infiltration system for treatment of domestic sewage. *China Institute of environmental sciences*, 91(5), 843–854. doi: 10.1145/3070617.307064
2. Pan, J., Yu, L. (2015). Characteristics of subsurface wastewater infiltration systems fed with dissolved or particulate organic matter. *International Journal of Environmental Science and Technology*, (12), 479–488. doi: 10.1007/s13762-013-0408-8.
3. Sobotkova, M., Dusek, J., Alavi, G., Sharma, L., Ray, C. (2018). Assessing the feasibility of soil infiltration trenches for highway runoff control on the Island of Oahu, *Water*, 11(3), 1–19. doi: 10.3390/w10121832.
4. Tu, M., Traver, R. (2018). Clogging impacts on distribution pipe delivery of street runoff to an infiltration bed. *Water*, 10(8), 1–14. doi: 10.3390/w10081045.
5. Toran, L., Jedrzejczyk, C. (2017). Water level monitoring to assess the effectiveness of stormwater infiltration trenches. *Environmental and Engineering Geoscience*. 1–14. doi: 10.2113/EEG-1802.
6. Developing Reasonable Assurance: A Guide to Performing Model. (2017). Based Analysis to Support Municipal Stormwater Program Planning: US EPA. Available at: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-12/dev-reasonable-assur-guide-model-base-analys-munic-stormw-prog-plan-2017-02.pdf>.
7. Improving Stormwater Program Monitoring, Evaluation. (2018). Tracking, and Reporting: Workshop Report and Recommendations, Chicago, USA. Available at: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/improving_stormwater_program_monitoring-10-12-2018.pdf.
8. Better Assessment Science Integrating Point & Non-point Sources Modeling Framework: National Exposure Research Laboratory, RTP, North Carolina: Available at: <https://www.epa.gov/hydrowq/better-assessment-science-integrating-point-and-non-point-sources-basins>
9. Selbig, W. R. (2015). Characterizing the distribution of particles in urban stormwater: advancements through improved sampling technology. *Urban Water Journal*, 12(2), 1–11. doi: 10.1080/1573062X.2013.820334.
10. Rossman, L., Huber, W. (2015). Storm Water Management Model Reference Manual Volume I: US EPA Office of Research and Development, Washington, DC. Available at: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMR&dirEntryId=309346.
11. Pitt, R. E., Clark, S. E., Eppakayala, V. K., Sileshi, R. (2016). Don't throw the baby out with the bathwater: sample collection and processing issues associated with particulate solids in stormwater. *Journal of Water management and Modeling*, 1–13. doi: 10.14796/JWMM.C416

12. Petrucci, G., Bonhomme, C. (2014). The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: trade-offs among complexity, calibration, and geographical data. *Journal of Hydrology*, 1–53. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.019
13. Mercado, J. M. R., Maniquiz-Redillas, M. C., Kim L. H. (2015). Laboratory study on the clogging potential of a hybrid best management practice. *Desalination Water Treat*, 3127–3133. doi: 10.1080/19443994.2014.922287
14. Kandra, H. S., McCarthe, D., Fletcher, T. D., Deletic, A. (2014) Assessment of clogging phenomena in granular filter media used for stormwater treatment. *Journal of Hydrology*, 1–10. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.009
15. Segismundo, E. Q., Koo, B. H., Lee, B. (2016). Effects of Media Breakage on Infiltration Characteristics in Stormwater Management System. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 31–41. doi: 10.7843/kgs.2016.32.2.31
16. Segismundo, E. Q., Kim, L. H., Jeong, S. M., Lee, B. S. (2017). A Laboratory Study on the Filtration and Clogging of the Sand-Bottom Ash Mixture for Stormwater Infiltration Filter Media. *Water*, 32. doi: 10.3390/w9010032
17. Segismundo, E. Q. (2016). Experimental Analysis of Particle Breakage and Clogging Potential for Granular Filter Media Used in Stormwater Management Systems. Master's thesis, 1–10. Available at: <https://hal.science/hal-03296735/document>
18. Mercado J. M. R., Maniquiz-Redillas M. C., Kim L. H. (2017) Assessment and development of design criteria for a hybrid stormwater treatment system. *Desalination and Water Treatment*, 418–424. doi: 10.5004/dwt.2017.11447
19. Kandra, H. S., Deletic, A., McCarthy, D. (2014) Assessment of Impact of Filter Design Variables on Clogging in Stormwater Filters. *Water Resources Management*, 1873–1885. doi: 10.1007/s11269-014-0573-7
20. Lee B., Kim L.H., Jeon P.G., Segismundo E. (2014). Modeling of Suspended Solid Clogging of Porous Media in Urban Stormwater Infiltration Facility. *Journal Korean Society*, 427–437. doi: 10.9798/KOSHAM.2014.14.6.427.
21. Minnesota council. (2016). Operation and maintenance of infiltration trench. In Minnesota. *Stormwater manual*, Minnesota: MC. Available at: https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Operation_and_maintenance_of_stormwater_infiltration_practices
22. El Mansouri, B. (2015). Enhancement of groundwater potential by aquifer artificial recharge techniques. *Climate change*, 155–156. doi: 10.5194/piahs-366-155-2015
23. Sadiki, M. L. (2019). Improvement of groundwater resources potential by artificial recharge technique: a case study of charf el Akab aquifer in the Tangier region. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 7(3), 224–236. doi: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2019.03.003
24. El Mezouary, L. (2020). Coupling of numerical flow model with the Susceptibility Index method to assess the groundwater vulnerability to pollution. *Water Resources*, 1–5. doi: 10.1145/3399205.3399246
25. El Mezouary, L. (2015). Modélisation numérique de la variation saisonnière de la qualité des eaux souterraines de l'aquifère. *Magra Italie*, 25–31. doi: 10.1051/lhb/20150015
26. Marla, C. M., So-Young, L., Lee Hyung, K. (2014). Long-Term Monitoring of Infiltration Trench for Nonpoint Source Pollution Control. *Water Air Soil Pollution*, (212), 13-26. Available at: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjtlaadkozje\)\)/reference/referencespapers?referenceid=1347469](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjtlaadkozje))/reference/referencespapers?referenceid=1347469)
27. Kandra, H. S., McCarthy, D., Fletcher, T. D., Deletic, A. (2014). Assessment of Clogging Phenomena in Granular Filter Media used for Stormwater Treatment, *Journal*

of Hydrology, 518–527. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.009.

28. Yong, C. F., McCarthy, D. T., Deletic, A. (2013). Predicting Physical Clogging of Porous Permeable Pavements, *Journal of Hydrology*, 48–55. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.009

29. Atlabachew, A., Shu, L., Wu, P., Zhang, Y., Xu, Y. (2018) Numerical modeling of solute transport in a sand tank physical model under varying hydraulic gradient and hydrological stresses. *Hydrogeology Journal*, 2089–2113. doi: 10.1007/s10040-018-1758-6

30. Matsak, A. O. (2021). Improving the level of environmental safety of water bodies by reducing the impact of rainwater from urbanized territories (diss. cand. tech. science). Ukrainian Scientific Research Institution of Ecological Problems, Kharkiv, Ukraine. Available at: <https://uacademic.info/ua/document/0421U100725>

31. Rybalova, O. V., Matsak, A. O. (2018) Natural methods of surface runoff treatment. Third International Conference of European Academy of Science, 85–86. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/8806/1/Natural%20methods%20of%20surface%20runoff%20treatment.pdf>

32. Matsak, A. O. Tsytlshvili, K. O. (2018). Using different filter media of stormwater treatment performace. *Norwegian Journal of development of the International Science*, 19-23. Available at: <https://www.calameo.com/read/005798408dafa9e98e9ba>

33. Gorban, N. S., Zinchenko, I. V., Matsak, A. O. (2015). Improving the environmental safety of water bodies by using methods of preliminary treatment of stormwater. *Problems of environmental protection and environmental safety*, 87–90. Available at: <http://www.niiep.kharkov.ua/node/2760>

34. Solid fuel. Method of sieve particle size distribution: DSTU 4082-2002. (2006). Kyiv. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=75811

35. Methodology for measuring the mass concentration of suspended matter: RND 03-05-2002. (2002). Kharkiv. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0107508-04#Text>

Надійшла до редколегії: 10.10.2024

Прийнята до друку: 16.11.2024