

Выводы

Результаты исследования подтверждают, что биодренаж является эффективным вспомогательным методом защиты территорий от подтопления. Это экономически выгодный метод: устройство зеленых насаждений обходится дешевле земляных работ по строительству дренажа. Кроме того, это энергосберегающий метод, применение которого не требует постоянных затрат энергии. Устройство древесных насаждений позволяет улучшить эстетический вид городских территорий, снизить вредное воздействие выбросов автотранспорта на здоровье населения. Таким образом, метод биодренажа является перспективным для использования на территории Украины.

Список литературы

1. *ДБН В.1.1-25-2009* Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення. – К., 2010.
2. *Рекомендации по технологии создания защитных лесонасаждений на богарных и орошаемых землях и повышения их мелиоративных функций в сухостепной зоне РФ.* – Российская академия с/х наук. Всероссийский научноисследовательский институт агролесомелиорации, 2000.
3. *Методика* определения дополнительного инфильтрационного питания грунтовых вод на территориях промышленных объектов (с целью предотвращения подтопления). Разраб. А. Чебанов, П. Станкевич и др. – Минстрой. Украины, 2009.

УДК 628.21

В.М. ЖУК, кандидат технічних наук;

В.В. БОШОТА, аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОД ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ЕКСФІЛЬТРАЦІЙНИХ ТРАНШЕЙ

Представлено новий метод гідравлічного розрахунку ексфільтраційних траншей, які використовуються для регулювання поверхневого стоку з урбанізованих територій. Розроблено програму для моделювання процесів наповнення і спорожнення траншей та визначення їх розрахункових параметрів.

Ключові слова: гідрограф притоку, ексфільтраційна траншея, критична тривалість дощу, відносна площа траншеї.

Представлен новый метод гидравлического расчета эксфильтрационных траншей, используемых для регулирования поверхностного стока с урбанизированных территорий. Разработана программа для моделирования процессов наполнения и опорожнения траншей и определения их расчетных параметров.

Ключевые слова: гидрограф притока, эксфильтрационная траншея, критическая продолжительность дождя, относительная площадь траншеи.

A new method of hydraulic calculation of exfiltration trenches, used for the stormwater management at the urban catchments, is presented. The program is elaborated for the simulation of inflow and discharge of the trenches and to calculate their design parameters.

Key words: runoff hydrograph, exfiltration trench, critical rainfall duration, trench area ratio.

Постановка проблеми

Одним з найефективніших методів управління дощовим стоком з урбанізованих територій є використання фільтраційних систем і споруд, зокрема эксфільтраційних траншей. Використання цих споруд дозволяє суттєво зменшити об'єм і максимальну витрату поверхневого стоку безпосередньо у місці його утворення, що розвантажує систему дощового водовідведення та забезпечує збереження гідрологічного балансу на забудованій території [1]. Позитивний закордонний досвід використання эксфільтраційних траншей спонукає до вивчення можливості використання фільтраційних методів в українській інженерній практиці. З іншого боку, сучасні методи гідравлічного розрахунку эксфільтраційних траншей є недостатньо теоретично обґрунтованими та передбачають істотні спрощення, що обумовлює похибки при визначенні регульовального об'єму цих споруд.

Метою роботи є розроблення методу гідравлічного розрахунку эксфільтраційних траншей, що використовуються для регулювання поверхневого стоку з урбанізованих територій, з урахуванням зміни в часі площі фільтрації та напору, під яким відбувається эксфільтрація умовно-чистого дощового стоку з траншеї в ґрунт.

Результати досліджень

Перебіг процесу наповнення эксфільтраційної траншеї залежить від багатьох факторів та параметрів, серед яких найважливішими є характеристики гідрографа притоку дощових стічних вод, геометричні та конструктивні характеристики траншеї, а також гідрогеологічні особливості місцевості.

У США для гідравлічного розрахунку эксфільтраційних траншей найчастіше використовують спрощений інженерний метод, в якому приймається гіпотеза щодо наявності вільної фільтрації як крізь дно, так і

крізь стінки траншеї, а також не враховується зміна в часі площі фільтрації [1]. Площа ексфільтраційної траншеї за цим методом:

$$F_{\text{тр}} = \frac{W_{\text{ен}}}{\rho_{\text{тр}} H_{\text{тр}} + k_{\text{ф}} t_{\text{н}}}, \quad (1)$$

де $W_{\text{ен}}$ – загальний об'єм дощового стоку, який надходить у траншею в результаті випадання розрахункового дощу; $\rho_{\text{тр}}$ – пористість завантаження траншеї; $H_{\text{тр}}$ – глибина траншеї; $k_{\text{ф}}$ – коефіцієнт фільтрації ґрунту; $t_{\text{н}}$ – час наповнення траншеї, який приймають рівним часові випадання розрахункового дощу. Згідно [1], незалежно від значень вхідних параметрів, рекомендується приймати $t_{\text{н}} = 2$ год. Таким чином, робиться припущення, що критична тривалість дощу, який обумовлює максимальне заповнення будь-якої ексфільтраційної траншеї, є сталим і дорівнює 2 години. Проте, логічно припустити, що більш інтенсивні дощі меншої тривалості можуть спричинити значно більше наповнення траншеї, а відтак, і її переповнення.

Можна виділити дві типові задачі гідравлічного розрахунку ексфільтраційних траншей: пряму і зворотну. У прямій задачі відомими є всі конструктивні параметри траншеї (площа в плані, висота, пористість завантаження), а потрібно визначити динаміку зміни в часі наповнення траншеї, його максимум та значення критичної тривалості дощу, якому цей максимум відповідає. У зворотній задачі необхідно визначити мінімально допустиму площу ексфільтраційної траншеї в плані за умови її непереповнення у випадку випадання розрахункового дощу з певним періодом одноразового перевищення P .

Теоретичні гідрографи притоку дощових стічних вод з однорідних лінійних у плані урбанізованих басейнів стоку

У роботах [2–4] удосконалено метод гідравлічного розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з однорідних лінійних у плані урбанізованих басейнів стоку з постійним поздовжнім похилом. Цей метод враховує змінну по довжині басейна швидкість течії поверхневого потоку, а також взаємовплив інтенсивності випадання дощу, часу концентрації поверхневого стоку та розрахункової тривалості випадання дощу.

За умови наявності квадратичної області гідравлічного опору зв'язок між середньою швидкістю поверхневого потоку та його гідравлічним радіусом виражається формулою Маннінга. Тоді розрахункова витрата стоку:

$$Q_r = (\psi_{\text{mid}} q_{20})^{1-0,4n} \left(\frac{720 i_0^{0,3}}{n_1^{0,6} L_{\text{con}}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}} \cdot F, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (2)$$

а час його концентрації:

$$t_r = \left[\frac{5(L_{\text{con}} n_1)^{0,6}}{3(1200^n \psi_{\text{mid}} q_{20})^{0,4} i_0^{0,3}} \right]^{\frac{1}{1-0,4n}}, \quad \text{с}, \quad (3)$$

де ψ_{mid} – коефіцієнт стоку; q_{20} – розрахункова інтенсивність випадання дощу

тривалістю 20 хв при періоді одноразового перевищення $P = 1$ рік, $m^3/(m^2 \cdot c)$; n – кліматичний коефіцієнт, який визначається за СНиП 2.04.03-85; i_0 – поздовжній похил; L_{con} – довжина шляху концентрації стоку, м; n_1 – коефіцієнт шорсткості поверхні; F – загальна площа басейна стоку, m^2 .

Згідно [2] гідрографи притоку з однорідних лінійних в плані басейнів стоку у безрозмірних змінних описуються наступними рівняннями:

$$Q'_1 = X^{5/3}; \quad (4)$$

$$Q'_2 = 1; \quad (5)$$

$$Q'_3 = 1 - (X - X_d)^{5/3}, \quad (6)$$

де Q' – безрозмірна витрата; $Q' = Q_t / Q_r$; X – безрозмірний час; $X = t / t_r$.

Індекси 1, 2 і 3 в рівняннях (4)–(6) відповідають першому, другому та третьому етапу гідрографа притоку (відповідно, при $t \leq t_r$; при $t_r < t \leq t_d$ та при $t > t_d$).

У випадку випадання розрахункового дощу (при $t_d = t_r$) другий етап гідрографа притоку відсутній, і перший етап переходить одразу в третій.

При тривалості дощу t_d його розрахункова інтенсивність

$$q_d = q_{20} (1200 / t_d)^n, \text{ м/с}, \quad (7)$$

де t_d потрібно підставляти в секундах.

Тоді максимальна розрахункова витрата дощового стоку при $t_d > t_r$:

$$Q_{r,d} = \Psi_{mid} q_d F, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (8)$$

а час концентрації стоку:

$$t_{r,d} = \frac{5(L_{con} n_1)^{0,6}}{3(\Psi_{mid} q_d)^{0,4} i_0^{0,3}}, \text{ с}. \quad (9)$$

Зі збільшенням тривалості випадання дощу його розрахункова інтенсивність $Q_{r,d}$ зменшується, а час концентрації та об'єм дощового стоку – зростають.

Математична модель наповнення ексфільтраційної траншеї

Проаналізуємо процес наповнення прямокутної в плані траншеї непроточного типу, з якої немає стоку чи переливу у водовідвідну мережу. Ширина траншеї $B_{тр}$ однакова по висоті, загальна висота траншеї – $H_{тр}$. Завантаження траншеї однорідне, з коефіцієнтом пористості $\rho_{тр}$ (рис. 1).

Рівняння матеріального балансу води в траншеї у момент часу t :

$$dW_{en} = dW_{тр} + dW_{exf}, \quad (10)$$

де $dW_{en} = Q_{en} dt$ – притік води в траншею; Q_{en} – витрата притоку, $Q_{en} = Q_t$; $dW_{тр} = \rho_{тр} \Omega_{тр} dh_{тр}$ – зміна об'єму води в траншеї за час dt ; $\Omega_{тр}$ – площа траншеї в плані; $\Omega_{тр} = L_{тр} B_{тр}$, де $L_{тр}$ – довжина траншеї; $dW_{exf} = Q_{exf} dt$ – елементарний об'єм води, який за проміжок часу dt витікає з траншеї за рахунок ексфільтрації.

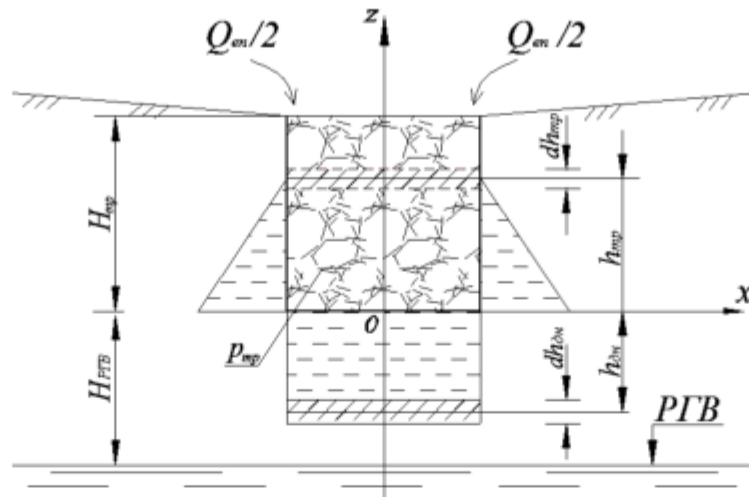


Рис. 1. Розрахункова схема наповнення ексфільтраційної траншеї

Ексфільтраційна витрата в довільний момент часу t визначається як сума витрат крізь дно та бічні стінки траншеї. Для ламінарного режиму фільтрації можна записати:

$$Q_{\text{эф}} = k_{\text{ф}} I_{\text{дн}} \Omega_{\text{тр}} + k_{\text{ф}} I_{\text{ст}} \Omega_{\text{ст}}, \quad (11)$$

де $I_{\text{дн}}$, $I_{\text{ст}}$ – гідравлічний похил на виході з траншеї крізь дно та бічні стінки відповідно; $\Omega_{\text{ст}}$ – площа фільтрації крізь бічні стінки; $\Omega_{\text{ст}} = 2(L_{\text{тр}} + B_{\text{тр}})h_{\text{тр}}$.

Коефіцієнт фільтрації матеріалу завантаження ексфільтраційної траншеї завжди значно більший за коефіцієнт фільтрації навколишнього ґрунту. Відтак, під дном траншеї матиме місце напірний режим фільтрації. Якщо в деякий момент часу рівень води в ексфільтраційній траншеї дорівнює $h_{\text{тр}}$, а глибина проникнення фільтраційних вод під дном траншеї становить $h_{\text{дн}}$, то, нехтуючи ефектом бічного розтікання призми фільтраційного потоку під дном траншеї, можна записати:

$$I_{\text{дн}} = (h_{\text{тр}} + h_{\text{дн}}) / h_{\text{дн}} = (1 + h_{\text{тр}} / h_{\text{дн}}). \quad (12)$$

Очевидно, що вираз (12) має фізичний зміст лише при $h_{\text{дн}} < H_{\text{РГВ}}$. Після досягнення фільтраційним потоком рівня ґрунтових вод донний фільтраційний потік виходить у ненасичені водою нижні бічні зони. Тоді гідравлічний похил фільтраційного потоку при $h_{\text{дн}} = H_{\text{РГВ}}$:

$$I_{\text{дн}} = (1 + h_{\text{тр}} / H_{\text{РГВ}}), \quad (13)$$

де $H_{\text{РГВ}}$ – висота дна траншеї над рівнем ґрунтових вод до початку заповнення траншеї (рис. 1).

Враховуючи, що в нижніх бічних зонах навколо траншеї, а також в кутових ділянках міститься ненасичений водою ґрунт, можна припустити, що до моменту перевищення інтегральної водопоглинальної здатності траншеї має місце вільна фільтрація води крізь бічні стінки ексфільтраційної траншеї, тобто $I_{\text{ст}} = 1$.

Отже, рівняння матеріального балансу (10) запишеться у вигляді:

$$Q_{ен} dt = \rho_{тр} L_{тр} B_{тр} \cdot dh_{тр} + [k_{ф} I_{дн} L_{тр} B_{тр} + 2k_{ф} (L_{тр} + B_{тр}) h_{тр}] dt, \quad (14)$$

де похил $I_{дн}$ при $h_{дн} < H_{РГВ}$ визначається за формулою (12), а при $h_{дн} = H_{РГВ}$ – за виразом (13).

Збільшення глибини $h_{дн}$ за час dt , зумовлене фільтрацією крізь дно:

$$dh_{дн} = \frac{Q_{exf,дн} dt}{\rho_{гр} L_{тр} B_{тр}} = \frac{k_{ф} I_{дн} dt}{\rho_{гр}}, \quad (15)$$

де $\rho_{гр}$ – коефіцієнт пористості ґрунту.

Таким чином, отримано систему двох диференціальних рівнянь (14)–(15), що описують динаміку наповнення ексфільтраційної траншеї та містять дві невідомих функції: $h_{тр}(t)$ та $h_{дн}(t)$.

Чисельне моделювання наповнення ексфільтраційної траншеї

Чисельне інтегрування системи диференціальних рівнянь (14) і (15) виконано за методом кінцевих різниць. Для i -того часового відрізка:

$$Q_{ен} \Delta t = \rho_{тр} \Omega_{тр} \cdot \Delta h_{тр,i} + [I_{дн,i} \Omega_{тр} + 2(L_{тр} + B_{тр}) \cdot (h_{тр,i-1} + \Delta h_{тр,i} / 2)] k_{ф} \Delta t, \quad (16)$$

$$\Delta h_{дн,i} \rho_{гр} = k_{ф} I_{дн,i} \Delta t, \quad (17)$$

де $I_{дн,i}$ – поточний гідравлічний похил крізь дно траншеї; при $h_{дн} < H_{РГВ}$:

$$I_{дн,i} = 1 + h_{тр,i} / h_{дн,i}, \quad (18)$$

а при $h_{дн} = H_{РГВ}$:

$$I_{дн,i} = 1 + h_{тр,i} / H_{РГВ}. \quad (19)$$

Чисельне розв'язування системи рівнянь (16)–(17) з урахуванням гідравлічного похилу $I_{дн,i}$ за формулою (18) або (19) виконано за спеціально розробленою авторами комп'ютерною програмою.

Результати гідравлічного розрахунку ексфільтраційних траншей

Виконано серію чисельних експериментів для ексфільтраційних траншей непроточного типу, в які надходить весь дощовий стік з типових однорідних лінійних у плані урбанізованих басейнів стоку площею $F_{бас} = 1000 \text{ м}^2$, з удосконаленим водонепроникним покриттям ($\psi_{mid} = 0,95$). Кліматичні параметри прийняті за СНиП 2.04.03-85 як для рівнинних областей України: $q_{20} = 100 \text{ л/(с·га)} = 10^{-5} \text{ м/с}$; $n = 0,71$. Співвідношення довжини і ширини басейна стоку взято рівним $L/B = 5$; поздовжній похил i_0 та коефіцієнт шорсткості поверхні n_1 – відповідно, $i_0 = 0,01$; $n_1 = 0,013$. Коефіцієнти фільтрації $k_{ф}$ та пористості ґрунту $\rho_{гр}$ приймалися рівними, відповідно, $k_{ф} = 180 \text{ мм/год}$; $\rho_{гр} = 0,3$ як середні значення для середньозернистих піщаних ґрунтів [5].

На рис. 2 показано типову динаміку наповнення та спорожнення ексфільтраційної траншеї за результатами комп'ютерного моделювання. Для

зручності аналізу наведено зміну в часі витрати наповнення траншеї $Q_{\text{нап}} = (Q_{\text{ен}} - Q_{\text{еф}})$ та витрати спорожнення $Q_{\text{сп}} = (Q_{\text{еф}} - Q_{\text{ен}})$. Видно, що для середньозернистих піщаних ґрунтів і прийнятої глибини залягання ґрунтових вод цілком достатньою є відносна площа ексфільтраційної траншеї $\chi_F = \Omega_{\text{тр}}/F_{\text{бас}} = 0,01 = 1\%$.

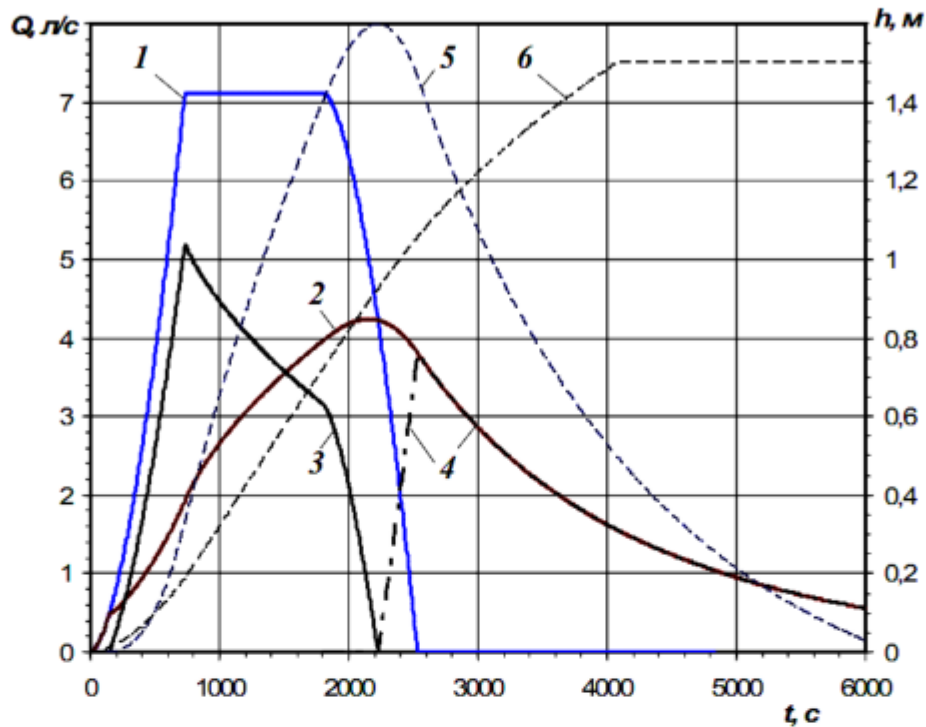


Рис.2. Динаміка наповнення ексфільтраційної траншеї:

1 – $Q_{\text{ен}}$, 2 – $Q_{\text{еф}}$, 3 – $Q_{\text{нап}}$; 4 – $Q_{\text{сп}}$; 5 – $h_{\text{тр}}(t)$; 6 – $h_{\text{дн}}(t)$

(при $t_{\text{д}} = 30$ хв; $\chi_F = 1\%$; $p_{\text{тр}} = 0,4$; $H_{\text{тр}} = 1,6$ м; $H_{\text{РГВ}} = 1,5$ м; $L_{\text{тр}}/B_{\text{тр}} = 30$)

На рис. 3 показано залежність максимального наповнення ексфільтраційної траншеї від розрахункової тривалості дощу $t_{\text{д}}$ при різних значеннях співвідношення довжин сторін $L_{\text{тр}}/B_{\text{тр}}$. Отримано, що збільшення відношення $L_{\text{тр}}/B_{\text{тр}}$ при всіх інших однакових параметрах обумовлює суттєве зменшення максимального наповнення траншеї, що пояснюється збільшенням площі фільтрації крізь бічні стінки при однаковій у всіх випадках площі дна траншеї.

Критична тривалість дощу $t_{\text{д,кр}}$, при якій спостерігається максимальне наповнення траншеї, для середньозернистих піщаних ґрунтів є значно меншою за рекомендоване в [1] значення $t_{\text{д,кр}} = 2$ год, причому зі збільшенням відношення $L_{\text{тр}}/B_{\text{тр}}$ вона зменшується (рис. 4).

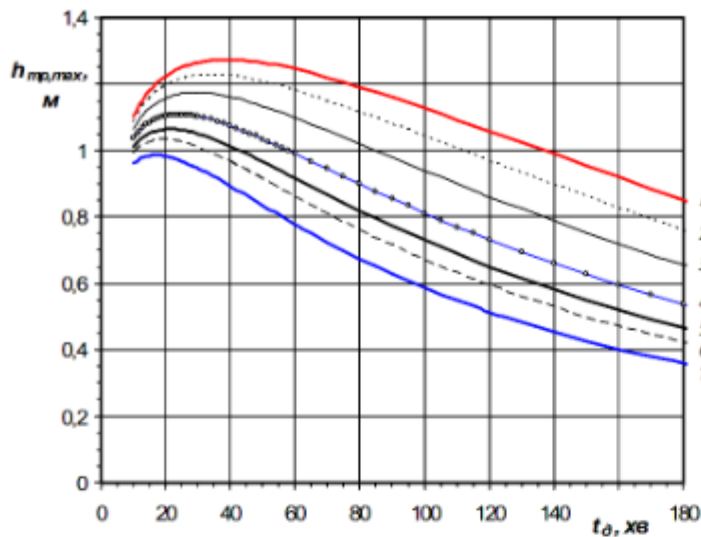


Рис.3. Максимальне наповнення ексфільтраційної траншеї при різній тривалості дощу залежно від співвідношення $L_{тр}/B_{тр}$:
 1 – $L_{тр}/B_{тр} = 2$; 2 – 5; 3 – 10;
 4 – 20; 5 – 30; 6 – 40; 7 – 60
 (при $x_F = 1,5\%$; $\rho_{тр} = 0,4$;
 $H_{тр} = H_{РГВ} = 2$ м)

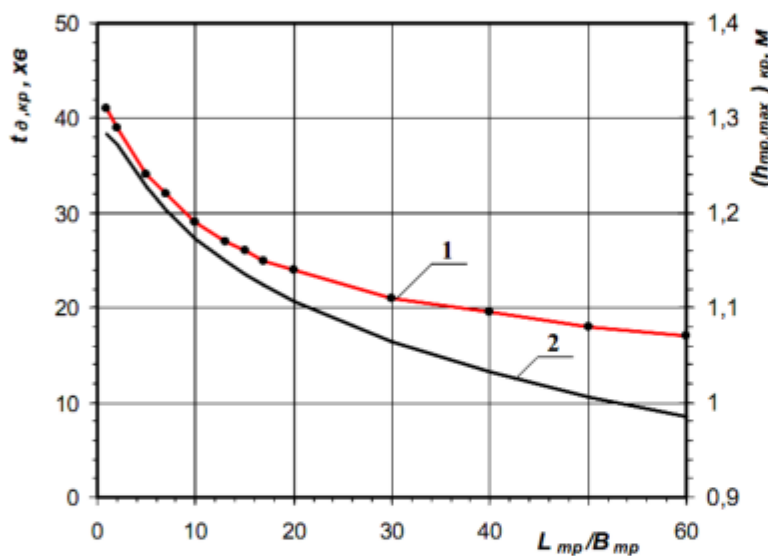


Рис.4. Критична тривалість дощу та відповідні максимальні наповнення ексфільтраційних траншей залежно від $L_{тр}/B_{тр}$:
 1 – $t_{д,кр}$; 2 – $(h_{тр,макс})_{кр}$
 (при $F_{бас} = 1000$ м²;
 $x_F = 1,5\%$; $\rho_{тр} = 0,4$;
 $H_{тр} = H_{РГВ} = 2$ м;
 $q_{20} = 100$ л/(с·га);
 $\psi_{mid} = 0,95$;
 $k_{ф} = 180$ мм/год; $\rho_{гр} = 0,3$;
 $\rho_{тр} = 0,4$)

Досліджено вплив пористості завантаження ексфільтраційних траншей на їх відносну площу в плані та значення критичної тривалості дощу, що обумовлює максимально можливе наповнення траншеї. Отримано, що використання завантаження з пористістю $\rho_{тр} = 0,9$ при співвідношенні довжин сторін траншеї $L_{тр}/B_{тр} = 60$ дозволяє зменшити площу траншеї в плані на 42% порівняно із традиційним щебеним завантаженням (при $\rho_{тр} = 0,4$).

Висновки

Розроблено новий метод гідралічного розрахунку ексфільтраційних траншей, у якому враховується зміна в часі напору та площі фільтрації рідини з траншеї. З використанням методу кінцевих різниць розроблено комп'ютерну програму для математичного моделювання процесів наповнення та спорожнення траншей та визначення їх розрахункових параметрів.

Встановлено, що збільшення відношення довжини траншеї до її ширини, а також зростання коефіцієнта пористості завантаження зумовлюють зменшення максимального наповнення траншеї та її відносної площі в плані.

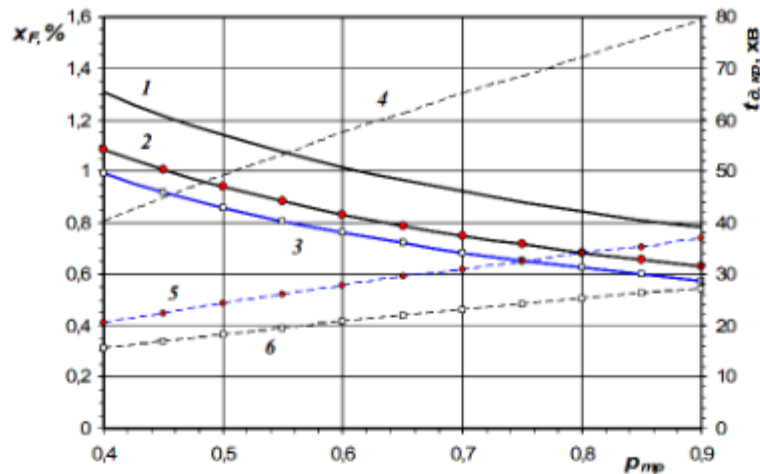


Рис.5. Залежність відносної площі ексфільтраційних траншей (1–3) та критичної тривалості дощу (4–6) від коефіцієнта пористості завантаження при $H_{тр} = 1,5$ м; $H_{РГВ} = 2$ м; $q_{20} = 100$ л/(с·га); $F_{бас} = 1000$ м²; $\psi_{mid} = 0,95$; $k_{ф} = 180$ мм/год; $\rho_{гр} = 0,3:1$ і 4 – при $L_{тр}/B_{тр} = 2$; 2 і 5 – $L_{тр}/B_{тр} = 30$; 3 і 6 – $L_{тр}/B_{тр} = 60$

Список літератури

1. Georgia stormwater management manual. Volume 2: Technical handbook. – Atlanta: AMEC Earth and Environmental, Center for Watershed Protection, 2001. — 844 p.
2. Жук В.М. Гідрографи притоку для дощів постійної в часі інтенсивності та лінійних басейнів стоку / В.М. Жук // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Теорія і практика будівництва". — № 602. — Львів. — 2007. — С. 61–65.
3. Жук В.М. Теоретичні гідрографи притоку для дощів постійної в часі інтенсивності при змінній швидкості течії / В.М. Жук // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Випуск 15. — К.: КНУБА, 2010. — С. 119–130.
4. Жук В.М. Розрахункова витрата дощових стічних вод для лінійних в плані басейнів стоку з постійним поздовжнім нахилом / В.М. Жук, І.І. Матлай // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Теорія і практика будівництва". — № 697. — Львів. — 2011. — С. 97–103.
5. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод / П.Я. Полубаринова-Кочина — М.: Гос. изд-ние технико-теоретической литературы, 1952. — 678 с.