

ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК НАКОПИЧЕННЯ ДОЩОВОГО СТОКУ НА ПОВЕРХНІ ВОДОПРОНИКНИХ УДОСКОНАЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

© Жук В. М., Качмар І. З., 2015

В епоху урбанізації та швидкого розвитку міст актуальним питання регулювання поверхневого стоку. Ефективним та перспективним методом управління поверхневим стоком є використання водопроникних удосконалених покриттів (ВУП) та інших споруд фільтраційного типу. Влаштування ВУП забезпечує зменшення об'єму дощового стоку, що надходить у каналізаційну мережу, сприяє його частковому очищенню та поповненню запасів ґрунтових вод, забезпечує зниження рівня шуму та покращує безпеку руху на дорогах.

Регулювання поверхневого стоку за допомогою ВУП – поширений метод в інженерній практиці багатьох країн Європи, США, Японії та ін. Однак відомі методи розрахунку цих покриттів доволі спрощені і потребують удосконалення.

Наведено метод гідравлічного розрахунку накопичення дощового стоку на поверхні водопроникних удосконалених покриттів. Виконано моделювання процесів наповнення верхнього шару ВУП, а також визначення рівня води на поверхні покриття. Отримано залежності максимально можливої висоти шару води на поверхні ВУП від значень коефіцієнта фільтрації його верхнього шару для кліматичних умов м. Києва. Встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта фільтрації покриття зменшується критична тривалість дощу, за якої на поверхні покриття рівень води буде максимальний.

Ключові слова: водопроникне удосконалене покриття, висота наповнення, критична тривалість дощу, коефіцієнт фільтрації.

In the period urbanization and development of cities regulation of runoff is very important. The effective and perspective method of the runoff regulation is the use of pervious pavement (PP) and other structures of filtration type. Pervious pavement provides reduction of stormwater volume entering the sewer system, promotes its partial treatment and recharging of groundwater, ensures noise reduction and improve the safety on the roads.

The method of regulation of runoff using pervious pavement is widespread in engineering practice in many countries in Europe, USA, Japan and others. However, known methods of calculating these pavement rather simplistic and require improvement.

The paper presents the method of hydraulic calculation of stormwater accumulation on the surface pervious pavement. Process of filling the top layer of pervious pavement is modeling and the level of water on the surface of the pavement is determined. The dependencies of maximum water level on the surface of pervious pavement from the top layer filtration coefficient are obtained for climatic conditions of Kyiv. It is obtained that increasing of the filtration coefficient causes the decreasing of the rainfall critical duration, then water level on the surface of PP is maximal.

Key words: pervious pavement, filling depth, critical rainfall duration, filtration coefficient.

1. Відомі методи гідравлічного розрахунку ВУП

Перебіг процесу наповнення ВУП залежить від параметрів гідрографа притоку дощових стічних вод, геометричних та конструктивних характеристик покриття, а також від гідрогеологічних особливостей місцевості.

У США для розрахунку ВУП найчастіше використовують спрощений метод, в якому приймається, що гідравлічний похил фільтраційного потоку крізь дно покриття постійний і дорівнює $I_{\text{ВУП}}=0,5$ [2]. За цим методом глибину шару для тимчасового затримання стоку $H_{\text{рег}}$ визначають за формулою

$$H_{\text{рег}} = \frac{\left[(H_{\text{ст}} \cdot R) + H_{\text{д}} - \frac{k_{\text{ф,гр}}}{2} \cdot t_{\text{н}} \right]}{P_{\text{рег}}}, \quad (1)$$

де $H_{\text{ст}}$ – висота шару поверхневого стоку з площі водозбору (без врахування водопроникного пористого покриття), м; R – коефіцієнт, який обчислюють як відношення площі водозбору до площі ВУП; $R=F_{\text{бас}}/F_{\text{ВУП}}$; $H_{\text{д}}$ – висота шару опадів, м; $k_{\text{ф,гр}}$ – коефіцієнт фільтрації ґрунту, м/год; $t_{\text{н}}$ – час наповнення шару для тимчасового затримання стоку, год.; $p_{\text{рег}}$ – пористість шару для тимчасового затримання стоку.

Згідно з [1, 2], рекомендується приймати $t_{\text{н}}=2$ год. Отже, робиться припущення, що критична тривалість дощу, який обумовлює максимальне заповнення ВУП, є сталою і дорівнює дві години.

У випадку влаштування дренажу ВУП у формулі (1) рекомендовано враховувати відповідний відтік через дренаж:

$$H_{\text{рег}} = \frac{\left[H_{\text{ст}} \cdot R + H_{\text{д}} - \frac{k_{\text{ф,гр}}}{2} \cdot t_{\text{н}} - q_{\text{др}} \cdot t_{\text{н}} \right]}{P_{\text{рег}}}. \quad (2)$$

де $q_{\text{др}}$ – питома витрата дренажного потоку, м/год.

Виконуючи гідравлічний розрахунок ВУП, можемо виділити два типи задач. У задачі першого типу відомими є всі конструктивні параметри покриття (площа в плані, висота, пористість завантаження), а потрібно визначити динаміку зміни в часі наповнення ВУП. У задачі другого типу необхідно визначити мінімально допустиму глибину регулювального шару ВУП, призначеного для тимчасового затримання дощового стоку, за умови непідтоплення ВУП та врахування максимально допустимого часу його спорожнення у разі випадання розрахункового дощу з певним періодом одноразового перевищення P .

Проте в зарубіжній методиці розрахунку детально не розглядають процеси, що відбуваються в кожному окремому шарі ВУП, зокрема на поверхні ВУП та в товщі самого удосконаленого покриття.

Метою роботи є наукове обґрунтування та розроблення методу гідравлічного розрахунку накопичення дощового стоку на поверхні водопроникних удосконалених покриттів з урахуванням процесу наповнення його верхнього шару.

2. Математична модель наповнення УП

Розглянемо процес наповнення лише шару удосконаленого покриття у випадку, коли немає притоку на територію ВУП з прилеглих водонепроникних територій та відсутній поверхневий стік у водовідвідну мережу.

Згідно з методом граничних інтенсивностей розрахункова інтенсивність випадання дощу тривалістю $t_{\text{д}}$:

$$q_{\text{д}} = q_{20}(1200/t_{\text{д}})^n, \text{ м/с}, \quad (3)$$

де q_{20} – розрахункова інтенсивність випадання дощу тривалістю 20 хв за періоду одноразового перевищення $P=1$ рік, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; n – кліматичний коефіцієнт. Значення q_{20} та n зазвичай, визначають за ДБН В.2.5-75:2013. Значення розрахункової тривалості дощу $t_{\text{д}}$ у формулі (3) потрібно підставляти в секундах.

Тоді розрахункова об'ємна витрата дощу, що випадає на ВУП, буде

$$Q_{\text{д}} = q_{\text{д}} F_{\text{ВУП}}, \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (4)$$

Найважливішою з експлуатаційного погляду частиною ВУП є його верхній шар, надалі удосконалене покриття (УП). Розглянемо ВУП з висотою верхнього шару $H_{УП}$ (рис. 1), об'ємною пористістю $\rho_{УП}$ та коефіцієнтом фільтрації $k_{ф,УП}$. Глибину проникнення фільтраційного потоку у покриття $h_{УП}$ визначає поточний рівень проникнення дощового стоку в УП $P_{пр}$. Процес наповнення УП відбувається подібно як для фільтраційних траншей [3].

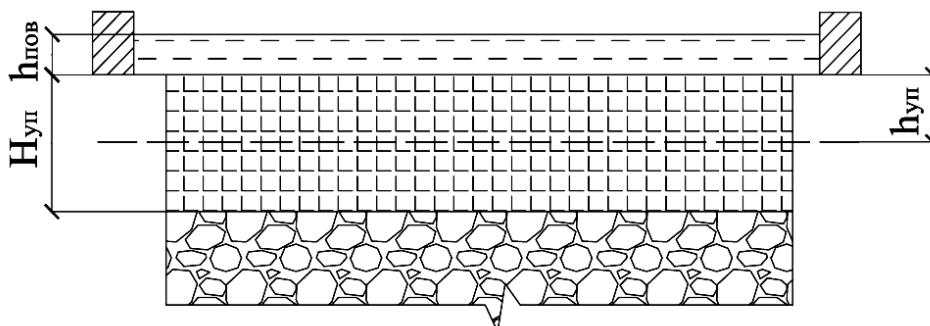


Рис. 1. Схематичний розріз верхнього шару водопроникного удосконаленого покриття

Нехтуючи втратами вологи на випаровування з поверхні ВУП, рівняння матеріального балансу води в момент часу t можна записати у такому вигляді:

$$dW_{ен} = dW_{ВУП} + dW_{inf} , \quad (5)$$

де $dW_{д} = Q_{д} dt$ – об'єм дощової води, що потрапляє на територію ВУП за час dt ; $Q_{д}$ – об'ємна витрата притоку, яка чисельно дорівнює витраті дощу; $dW_{ВУП} = \Omega_{ВУП} dh_{пов}$ – зміна об'єму води, затриманої на поверхні ВУП за час dt ; $\Omega_{ВУП}$ – площа ВУП у плані; $dW_{inf} = Q_{inf} dt$ – об'єм води, який за проміжок часу dt фільтрується в товщу ВУП.

Приймаючи, що наявний ламінарний режим фільтрації, можемо записати вираз для визначення інфільтраційної витрати в довільний момент часу t :

$$Q_{inf} = k_{ф,УП} I_{УП} \Omega_{ВУП} , \quad (6)$$

де $k_{ф,УП}$ – коефіцієнт фільтрації УП; $I_{УП}$ – гідравлічний похил для фільтраційного потоку всередині УП.

За умови, що в момент часу t глибина води на поверхні УП становить $h_{пов}$, а глибина проникнення фронту фільтраційного потоку в товщу УП – $h_{УП}$, гідравлічний похил, під яким відбувається інфільтрація:

$$I_{УП} = \frac{h_{пов} + h_{УП}}{h_{УП}} = (1 + h_{пов} / h_{УП}) \quad (7)$$

У випадку, коли $h_{УП} = 0$, значення $I_{УП}$ приймаємо 1.

Очевидно, що вираз (7) має фізичний зміст лише при $h_{УП} < H_{УП}$. Після досягнення фільтраційним потоком дна удосконаленого покриття, $h_{УП} = H_{УП}$:

$$I_{УП} = (1 + h_{пов} / H_{УП}) , \quad (8)$$

де $H_{УП}$ – висота шару удосконаленого покриття (рис. 1).

Отже, диференціальне рівняння матеріального балансу можна записати у вигляді:

$$Q_{ен} dt = \Omega_{ВУП} (dh_{пов} + k_{ф,УП} I_{УП} dt) , \quad (9)$$

$$dh_{пов} = \frac{Q_{ен} dt}{\Omega_{ВУП}} - k_{ф,УП} I_{УП} dt , \quad (10)$$

$$dh_{пов} = \left(\frac{Q_{ен}}{\Omega_{ВУП}} - k_{ф,УП} \frac{h_{пов} + h_{УП}}{h_{УП}} \right) dt . \quad (11)$$

Повне проникнення поверхневого стоку у товщу удосконаленого покриття відбувається в момент часу, коли $(\frac{Q_{en}}{\Omega_{ВУП}} - k_{ф,УП} \frac{h_{пов} + h_{УП}}{h_{УП}}) < 0$, тобто $h_{пов} = 0$.

Збільшення глибини $h_{УП}$ за час dt , зумовлене фільтрацією води в товщу ВУП, визначимо з рівняння (6):

$$Q_{inf} dt = \Omega_{ВУП} \rho_{УП} dh_{УП}, \quad (12)$$

$$dh_{УП} = \frac{k_{ф,УП}}{\rho_{УП}} \cdot \frac{(h_{пов} + h_{УП})}{h_{УП}} dt, \quad (13)$$

У такий спосіб отримано систему двох диференціальних рівнянь (11), (13), що описують динаміку наповнення УП та містять дві невідомих функції: $h_{пов}(t)$ та $h_{УП}(t)$.

3. Чисельне моделювання наповнення УП

Систему диференціальних рівнянь (11) і (13) можна проінтегрувати за методом кінцевих різниць. Збільшення рівня води на поверхні покриття на i -му часовому відрізку від моменту початку дощу:

$$\Delta h_{пов,i} = (\frac{Q_{en}}{\Omega_{ВУП}} - k_{ф,УП} \frac{h_{пов,i} + h_{УП,i}}{h_{УП,i}}) \Delta t \quad (14)$$

Рівень води на поверхні на початку $(i+1)$ часового відрізка:

$$h_{пов,i+1} = h_{пов,i} + \Delta h_{пов,i}. \quad (15)$$

Аналогічно можна визначити зміну глибини проникнення фільтраційного потоку в товщі УП:

$$\Delta h_{УП,i} = \frac{k_{ф,УП}}{\rho_{УП}} \cdot \frac{h_{пов,i} + h_{УП,i}}{h_{УП,i}} \Delta t, \quad (16)$$

При $h_{УП} = H_{УП}$,

$$\Delta h_{УП} = \frac{k_{ф,гр}}{\rho_{ВУП}} \cdot I_{ВУП} \cdot \Delta t.$$

$$h_{УП,i+1} = h_{УП,i} + \Delta h_{УП,i} \quad (17)$$

Якщо в певний момент часу значення $h_{УП,i+1}$ перевищує значення $H_{УП}$, то надалі приймаємо його $H_{УП}$.

Чисельне розв'язування системи рівнянь (14)–(16) виконано за спеціально розробленою комп'ютерною програмою.

4. Результати гідравлічного розрахунку УП

Виконано серію чисельних експериментів для УП, в які надходить дощовий стік тільки з території покриття. Кліматичні параметри прийняті за ДБН В.2.5-75:2013 як для м. Києва при $P = 1$ рік: $q_{20} = 104$ л/(с·га); $n = 0,69$. На значення $k_{ф,УП}$ впливає структура і пористість УП. У роботі проаналізовано УП з коефіцієнтом фільтрації в межах від $1 \cdot 10^{-7}$ м/с до $8 \cdot 10^{-6}$ м/с (розглядали максимально малі значення $k_{ф,УП}$, що відповідають більшій їх міцності) та значенням пористості $\rho_{УП} = 0,15$ [4].

На рис. 2 показано типові результати динаміки зміни $h_{пов}(t)$, $h_{УП}(t)$, $I_{УП}(t)$ за результатами комп'ютерного моделювання.

Залежність рівня води на поверхні покриття ($h_{пов}$) від коефіцієнта фільтрації УП ($k_{ф,УП}$) за різної тривалості дощу (t_d) наведено на рис. 3. Як бачимо, під час короткотривалих дощів вся кількість опадів не встигає просочитися в товщу покриття навіть у разі значних коефіцієнтів фільтрації, тому на поверхні покриття зберігається шар опадів товщиною $h_{пов}$.

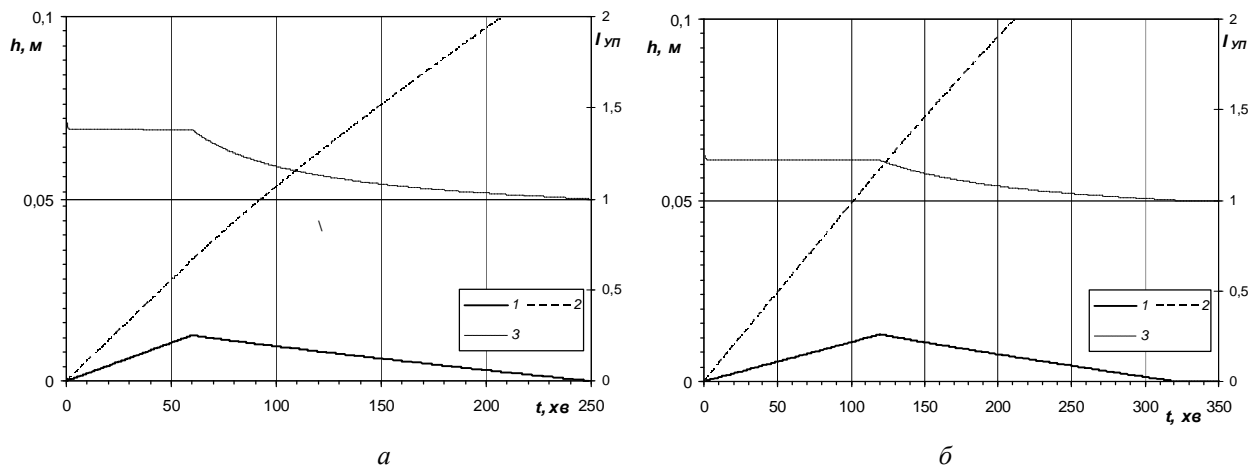


Рис. 2. Динаміка зміни основних параметрів у разі наповнення УП: а – $t_0=60$ хв; б – $t_0=120$ хв, $1 - h_{пов}$; $2 - h_{УП}$; $3 - I_{УП}$, (при $q_{20}=104$ л/(с·га); $n=0,69$; $k_{ф,УП}=1 \cdot 10^{-6}$ м/с; $p_{УП}=0,15$)

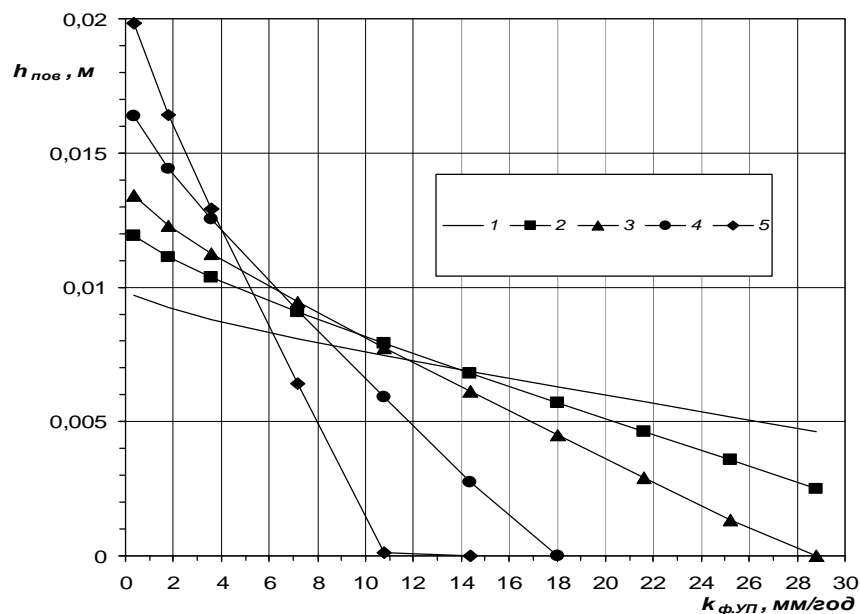


Рис. 3. Залежність рівня води на поверхні від коефіцієнта фільтрації удосконаленого покриття за різної тривалості дощу: $1 - t_0 = 10$ хв, $2 - t_0 = 20$ хв, $3 - t_0 = 30$ хв, $4 - t_0 = 60$ хв, $5 - t_0 = 120$ хв

На рис. 4 показано зміну рівня води на поверхні УП залежно від тривалості дощу за різних значень $k_{ф,УП}$. Встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта фільтрації покриття ($k_{ф,УП}$), критична тривалість дощу ($t_{д,кр}$), за якої рівень води на поверхні відповідає $h_{пов,макс}$, зменшується.

Під час функціонування ВУП виникають проблеми, пов'язані з короткочасними дощами. За доволі короткий проміжок часу, покриття, навіть з великими коефіцієнтами фільтрації, встигають поглинути лише незначну кількість дощового стоку. У такому разі $h_{пов} \approx h_д$ (рис. 5), що відповідає на рис. 4 кривій 1.

$$h_д = \int_0^{t_д} q_д dt = \int_0^{t_д} \frac{A}{t^n} dt = \frac{A t_д^{1-n}}{1-n} \quad (18)$$

Отже,

$$h_{пов,макс} \rightarrow \frac{A t_д^{1-n}}{1-n} \quad (19)$$

Різде зменшення $h_{\text{пов,мак}}$ для кривих 6 – 11 пояснюється тим, що, якщо інтенсивність випадання дощу q_d наближається до значення коефіцієнта фільтрації $k_{\text{ф,УП}}$, накопичення води на поверхні ВУП не відбувається, тобто, при $q_d \leq k_{\text{ф,УП}}$, $h_{\text{пов,мак}} = 0$.

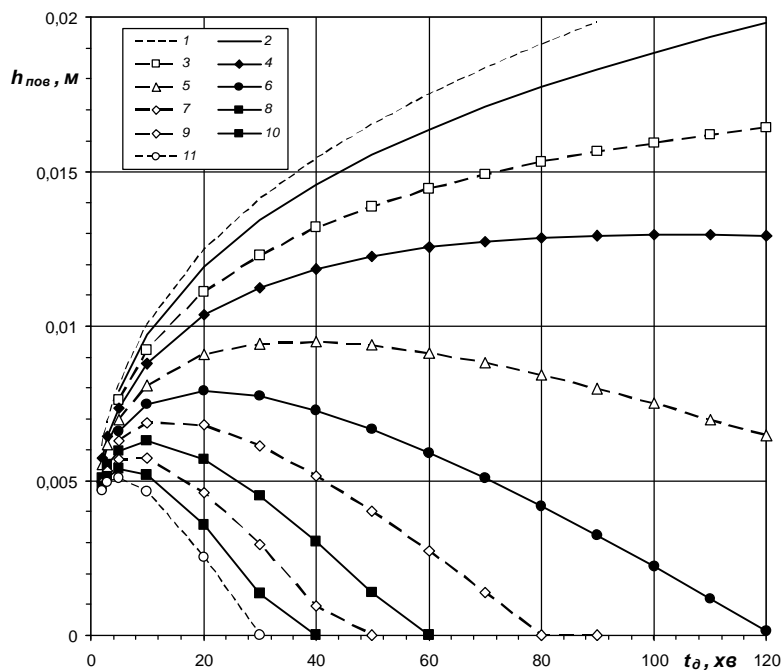


Рис. 4. Максимальний рівень води на поверхні ВУП за різної тривалості дощу залежно від значення коефіцієнта фільтрації УП, $k_{\text{ф,УП}}$, м/с:
 1 – 0; 2 – $1 \cdot 10^{-7}$; 3 – $5 \cdot 10^{-7}$; 4 – $1 \cdot 10^{-6}$; 5 – $2 \cdot 10^{-6}$; 6 – $3 \cdot 10^{-6}$; 7 – $4 \cdot 10^{-6}$; 8 – $5 \cdot 10^{-6}$; 9 – $6 \cdot 10^{-6}$;
 10 – $7 \cdot 10^{-6}$; 11 – $8 \cdot 10^{-6}$; (при $q_{20}=104$ л/(с·га); $p_{\text{УП}}=0,15$)

На рис. 5 показано залежність критичної тривалості дощу ($t_{\text{д,кр}}$) та критичного максимального рівня води на поверхні ($h_{\text{пов,мак,кр}}$) від коефіцієнта фільтрації ($k_{\text{ф,УП}}$).

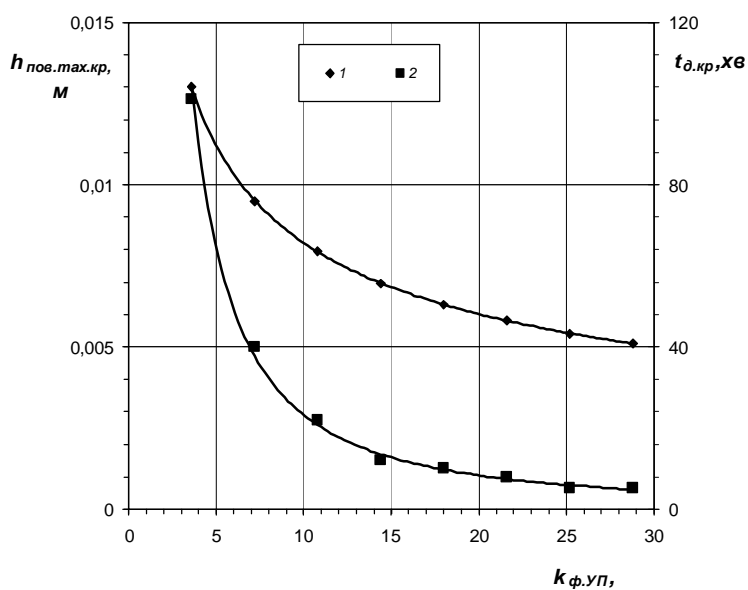


Рис. 5. Залежність критичного максимального рівня води на поверхні покриття $h_{\text{пов,мак,кр}}$ (1) та критичної тривалості дощу $t_{\text{д,кр}}$ (2) від коефіцієнта фільтрації УП: при $k_{\text{ф,УП}}$ від 3,6 до 28,8 мм/год (для кліматичних умов м. Києва, при $P = 1$ рік)

З рис. 5 видно, що зі зменшенням коефіцієнта фільтрації зростає критична тривалість дощу, за якої рівень води на поверхні буде максимальним.

Залежність максимального рівня води на поверхні покриття від коефіцієнта фільтрації УП описується рівнянням (20), $R^2=0,999$

$$y = 0,0231 h_{\text{пов}}^{-0,4494} \quad (20)$$

А залежність критичної тривалості дощу від коефіцієнта фільтрації УП відображає рівняння (21), $R^2=0,994$

$$y = 695 \cdot t_{\text{д}}^{-1,4762} \quad (21)$$

Висновки

Розроблено математичну модель процесів накопичення дощового стоку на поверхні ВУП та процесу наповнення його верхнього шару. Ці процеси описує система диференціальних рівнянь (11) і (13). Виконано чисельне інтегрування цієї системи рівнянь з використанням методу кінцевих різниць. Отримано залежності максимально можливої висоти шару води на поверхні ВУП від значень коефіцієнта фільтрації його верхнього шару для кліматичних умов м. Києва. Встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта фільтрації покриття, зменшується критична тривалість дощу, за якої на поверхні покриття рівень води буде максимальним.

1. *Georgia stormwater management manual. Volume 2: Technical handbook.* – Atlanta: AMEC Earth and Environmental, Center for Watershed Protection, 2001. – 844 p. 2. *Virginia DCR stormwater design, Specification No. 7. Permeable Pavement .– Version 1.8. – march 2011.– 25p.* 3. Жук В. М. Метод гідравлічного розрахунку ексфільтраційних траншей / В. М. Жук, В. В. Бошота // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Вип. 19.* – К.: КНУБА, 2012.– С. 22–31. 4. *Paul D. Tennis Pervious concrete pavement/ Paul D. Tennis, Michael L. Leming, and David J. Akers.–USA.: Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, 2004.–36p.*