

В.М. ЖУК, кандидат технічних наук

І.І. МАТЛАЙ, аспірант

Національний університет "Львівська політехніка"

ГІДРОГРАФИ ПРИТОКУ ДОЩОВИХ СТІЧНИХ ВОД З ПРЯМОКУТНИХ В ПЛАНІ УРБАНІЗОВАНИХ БАСЕЙНІВ СТОКУ ДЛЯ ДОЩІВ ПОСТІЙНОЇ В ЧАСІ ІНТЕНСИВНОСТІ

Виконано огляд сучасних методів розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з урбанізованих територій. Запропоновано удосконалений метод розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з прямокутних у плані однорідних басейнів стоку з урахуванням змінної швидкості течії та взаємовпливу між часом концентрації, тривалістю та інтенсивністю дощу.

Ключові слова: дощовий стік, гідрограф притоку, час концентрації, розрахункова витрата.

Выполнен обзор современных методов расчета гидрографов притока дождевых сточных вод с урбанизированных территорий. Предложен усовершенствованный метод расчета гидрографов притока дождевых сточных вод из прямоугольных в плане однородных бассейнов стока с учетом переменной скорости течения и взаимозависимости времени концентрации, продолжительности и интенсивности дождя.

Ключевые слова: дождевой сток, гидрограф притока, время концентрации, расчетный расход.

An overview of contemporary methods of stormwater hydrographs modeling from the urbanized watersheds is presented. An improved method for stormwater hydrograph calculating from rectangular in plan homogeneous watersheds is substantiated, which takes into account the variable overland flow velocity and cross-dependences of the time of concentration, rainfall duration and intensity.

Key words: runoff, stormwater hydrograph, time of concentration, peak discharge.

Постановка проблеми

Зміна кліматичних особливостей регіонів, інтенсивне зростання площ каналізування та впровадження нових видів штучних покриттів становлять нові виклики щодо надійності роботи систем дощового водовідведення. Збільшення об'єму стоку та підвищення нерівномірності притоку дощових стічних вод з урбанізованих територій спричиняють переповнення

водовідвідних мереж, підтоплення пішохідних і проїжджих ділянок та негативно впливають на санітарний стан прилеглих територій.

Метою роботи є удосконалення методу розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з прямокутних у плані однорідних урбанізованих басейнів стоку з урахуванням змінної швидкості течії та взаємовпливу між часом концентрації, тривалістю та інтенсивністю дощу.

Сучасні методики розрахунку гідрографів притоку дощових вод

На сьогоднішній день в Україні та за кордоном немає єдиного підходу до моделювання гідрографів притоку дощових стічних вод з урбанізованих басейнів стоку. В українській інженерній практиці для побудови гідрографів притоку дощових стічних вод використовують так звану лінійну модель концентрації стоку. Ця модель базується на наступних припущеннях: басейн стоку приймається у вигляді витягнутого прямокутника, інтенсивність випадання дощу змінюється в часі за степеневим спадним законом, а швидкість поверхневої течії є сталою [1, 2]. Тоді гідрограф притоку обчислюється за формулами (1)–(3):

1 етап (при $t < t_r$):

$$Q'_{1,\text{лін}} = X^{1-n}, \quad (1)$$

2 етап (при $t_r \leq t \leq t_d$):

$$Q'_{2,\text{лін}} = X^{1-n} - (X - 1)^{1-n}, \quad (2)$$

3 етап (при $t_d \leq t \leq (t_d + t_r)$):

$$Q'_{3,\text{лін}} = X_d^{1-n} - (X - 1)^{1-n}, \quad (3)$$

де $Q' = Q/Q_r$ – безрозмірна витрата; $X = t/t_r$ – безрозмірний час; $X_d = t_d/t_r$ – відносна тривалість дощу; Q_r , t_r , n – відповідно, розрахункова максимальна витрата, час концентрації дощового стоку та кліматичний коефіцієнт, які визначаються за [3].

У роботах [4, 5] було запропоновано радіальну модель концентрації дощового стоку, в якій басейн стоку приймається у вигляді кругового сектора з дощоприймачем у його вершині. При дотриманні тих самих умов, що і в лінійній моделі (зміна в часі інтенсивності випадання дощу за степеневим спадним законом, стала швидкість поверхневої течії), отримано безрозмірний гідрограф притоку з радіальних у плані басейнів стоку, три характерних етапи якого описуються відповідно формулами:

$$Q'_{1,\text{рад}} = \frac{2}{2-n} X^{2-n}, \quad (4)$$

$$Q'_{2,\text{рад}} = \frac{2}{2-n} [X^{2-n} - (X - 1)^{2-n} - (2-n)(X - 1)^{1-n}], \quad (5)$$

$$Q'_{3,\text{рад}} = 2[(X - X_d)X_d^{1-n} - (X - 1)^{1-n}] + \frac{2}{2-n} [X_d^{2-n} - (X - 1)^{2-n}]. \quad (6)$$

За цими спрощеними моделями отримано, що максимальна витрата з радіального в плані басейна стоку в $2/(2 - n)$ рази перевищує відповідну витрату з аналогічного за площею та протяжністю лінійного басейна.

У роботі [5] на основі спрощених моделей стоку отримано чисельні розв'язки для прямокутних у плані басейнів стоку з різним співвідношенням довжин сторін (рис. 1). Отримані гідрографи підтвердили суттєвий вплив конфігурації басейна стоку в плані на гідрографи притоку дощових стічних вод.

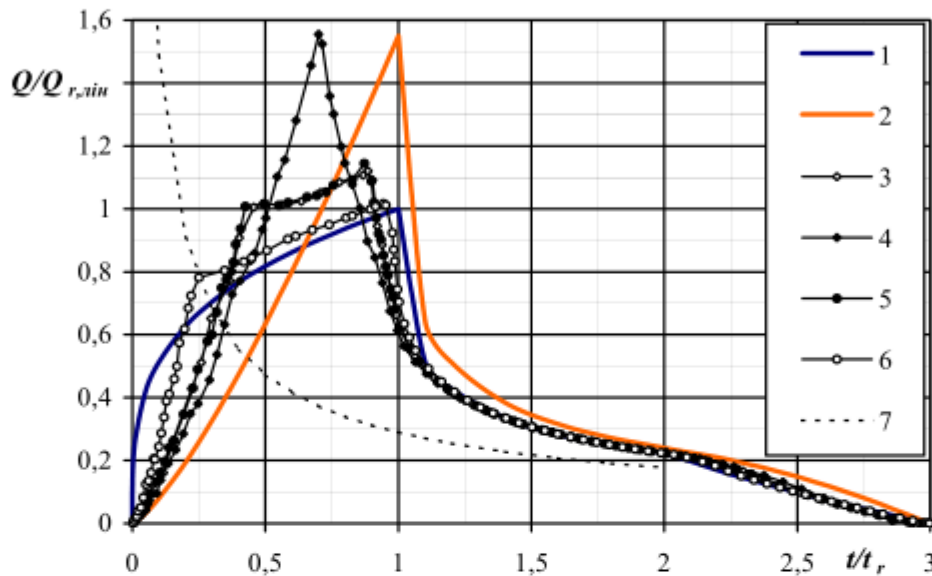


Рис.1. Узагальнені гідрографи притоку дощових стічних вод для: лінійної (1), радіальної (2) моделі концентрації поверхневого стоку та для прямокутних басейнів стоку з відношенням сторін L/B : 3 – 0,25; 4 – 0,5; 5 – 1; 6 – 2; 7 – крива дощу $q = A/t^n$ ($n = 0,71$; $X_d = 2$)

Основними недоліками описаних вище спрощених моделей є припущення, що інтенсивність дощу змінюється за спадним степеневим законом, а швидкість течії при цьому є незмінною, що неадекватно з гідравлічної точки.

У роботах [6, 7] було розроблено методику розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з лінійних та радіальних у плані басейнів стоку з урахуванням змінної швидкості течії та взаємовпливів між часом концентрації, тривалістю та інтенсивністю випадання розрахункового дощу. Отримано аналітичні залежності для обчислення часу поверхневої концентрації та розрахункової витрати.

Для лінійних в плані однорідних басейнів стоку:

$$t_{con,lin} = \left[\frac{5(L_{con} \cdot n_1)^{0,6}}{3(1200^n \psi_{mid} q_{20})^{0,4} i_0^{0,3}} \right]^{\frac{1}{1-0,4n}}, \quad (c) \quad (7)$$

$$Q_{r, \text{лин}} = (\Psi_{\text{mid}} q_{20})^{1-0,4n} \left(\frac{3600 i_0^{0,3}}{5 n_1^{0,6} L_{\text{con}}^{0,6}} \right)^{1-0,4n} \cdot F, \text{ (м}^3\text{/с)} \quad (8)$$

для радіальних басейнів:

$$t_{\text{con, рад}} = \left[\frac{1,41 \cdot (R_{\text{con}} \cdot n_1)^{0,6}}{(1200^n \Psi_{\text{mid}} q_{20})^{0,4} i_0^{0,3}} \right]^{1-0,4n}, \text{ (с)} \quad (9)$$

$$Q_{r, \text{рад}} = (\Psi_{\text{mid}} q_{20})^{1-0,4n} \left(\frac{1200 \cdot i_0^{0,3}}{1,41 \cdot n_1^{0,6} R_{\text{con}}^{0,6}} \right)^{1-0,4n} \cdot F, \text{ (м}^3\text{/с)} \quad (10)$$

де Ψ_{mid} – коефіцієнт стоку; q_{20} – розрахункова інтенсивність дощу для даної місцевості тривалістю 20 хв. при $P = 1$ рік, м/с; L_{con} , R_{con} – довжина шляху концентрації поверхневого стоку, м; i_0 , n_1 – відповідно поздовжній похил та коефіцієнт шорсткості поверхні; F – загальна площа басейна стоку, м².

У роботі [8] отримано теоретичні узагальнені гідрографи стоку в безрозмірних змінних. Для лінійних у плані басейнів:

$$Q'_{1, \text{лин}} = X^\alpha; \quad Q'_{2, \text{лин}} = 1; \quad Q'_{3, \text{лин}} = 1 - (X - X_d)^\alpha; \quad (11)$$

для радіальних басейнів:

$$Q'_{1, \text{рад}} = X^{2\alpha}; \quad Q'_{2, \text{рад}} = 1; \quad Q'_{3, \text{рад}} = 1 - (X - X_d)^{2\alpha}, \quad (12)$$

де $\alpha = 5/3$ при визначенні коефіцієнта Шезі за формулою Маннінга.

Залежності (7)–(12) справедливі лише для ідеальних лінійних чи радіальних однорідних басейнів стоку. Реальні ж басейни стоку, залежно від їх форми та співвідношення сторін, мають ознаки як лінійної так і радіальної моделей.

Гідрографи притоку дощових стічних вод з прямокутних в плані басейнів стоку

У роботі досліджено гідрографи притоку з прямокутних у плані однорідних басейнів стоку з різним співвідношенням довжини та ширини L/B (рис. 2). Значення коефіцієнта шорсткості та поздовжнього похилу приймалися сталими. Інтенсивність випадання дощу та коефіцієнт стоку вважалися постійними в часі та незмінними по всій території басейна стоку.

Для отримання гідрографів притоку дощових стічних вод прямокутний в плані басейн стоку розбивався на елементарні сектори з центральними кутами $\Delta\phi$. Кожний такий сектор з високою точністю може розглядатися як радіальний басейн.

Час концентрації стоку для сектора найбільшої протяжності є часом концентрації для всього прямокутного басейна стоку:

$$t_{\text{con}} = \left[\frac{1,41 \cdot (R_{\text{con}} \cdot n_1)^{0,6}}{(1200^n \Psi_{\text{mid}} q_{20})^{0,4} i_0^{0,3}} \right]^{1-0,4n}. \quad (13)$$

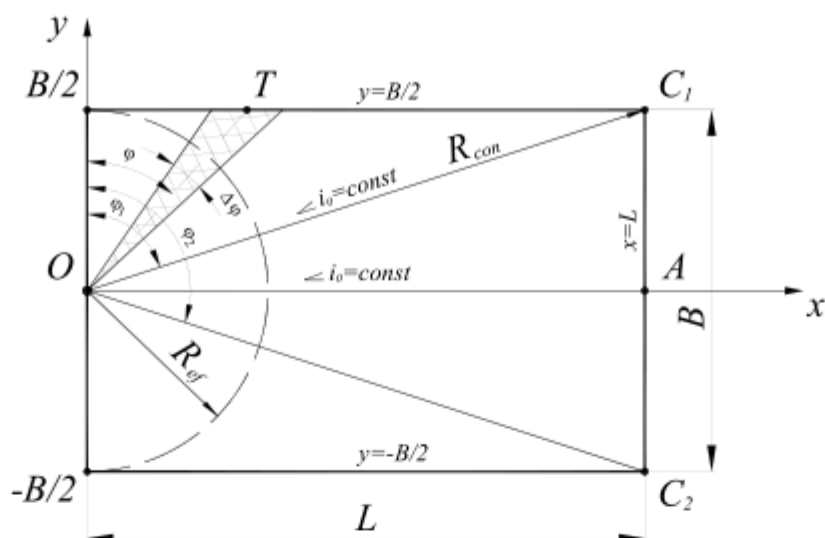


Рис.2. Схема прямокутного в плані однорідного басейна стоку

Критична тривалість дощу, що зумовлює максимальну витрату дощового стоку, дорівнює часу концентрації стоку: $t_d = t_{con}$. Інтенсивність розрахункового дощу

$$q_d = q_{20} (1200 / t_{con})^n, \text{ м/с.} \quad (14)$$

Час поверхневої концентрації та розрахункова витрата для i -того сектора обчислювалися, відповідно, за залежностями (15) і (16):

$$t_{con,i} = \frac{1,41(r_{con,i} n_1)^{0,6}}{(\Psi_{mid} q_d)^{0,4} i_0^{0,3}}, \quad (15)$$

$$Q_{r,i} = \Psi_{mid} q_d \Delta\varphi r_{con,i}^2 / 2, \quad (16)$$

де $r_{con,i}$ – радіус елементарного сектора.

Радіус сектора знаходили залежно від значення центрального кута φ :

$$r_{con,i} = \frac{B}{2 \cos \varphi} \text{ – при } 0 \leq \varphi < \arctg(2L/B), \quad (17)$$

$$r_{con,i} = \frac{L}{2 \sin \varphi} \text{ – при } \arctg(2L/B) \leq \varphi < (\pi - \arctg(2L/B)), \quad (18)$$

$$r_{con,i} = -\frac{B}{2 \cos \varphi} \text{ – при } (\pi - \arctg(2L/B)) \leq \varphi < \pi. \quad (19)$$

Гідрограф притоку з i -того сектора описується теоретичними залежностями (12) для радіальних у плані басейнів стоку:

$$1 \text{ етап – при } t < t_{con,i}: \quad Q_{t,i} = Q_{r,i} \cdot (t / t_{con,i})^{10/3}, \quad (20)$$

$$2 \text{ етап – при } t_{con,i} < t < t_d: \quad Q_{t,i} = Q_{r,i}, \quad (21)$$

$$3 \text{ етап – при } t_d < t < (t_d + t_{con,i}): \quad Q_{t,i} = Q_{r,i} \cdot [1 - (t / t_{con,i} - t_d / t_{con,i})^{10/3}]. \quad (22)$$

Додаючи між собою гідрографи притоку з елементарних секторів, можна отримати загальний гідрограф стоку зі всієї площі басейна стоку:

$$Q_t = \sum Q_{t,i} \quad (23)$$

Для реалізації запропонованої математичної моделі авторами розроблено програму для чисельного розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з прямокутних в плані басейнів стоку з різним співвідношенням довжин сторін L/B . Похибка розрахунків за об'ємами дощового стоку, визначеними теоретично та в результаті чисельного експерименту, не перевищувала 0,01%.

На рис. 3–4 представлено типові гідрографи притоку з прямокутних в плані однорідних басейнів стоку. Збільшення інтенсивності q_{20} та зменшення коефіцієнта шорсткості n_1 спричиняють зростання максимальної витрати та зменшення часу концентрації дощового стоку. Проте, при зведенні гідрографів до безрозмірного вигляду всі вони лягають на одну лінію. Аналогічно отримано автомоделність безрозмірних гідрографів притоку за площею F , коефіцієнтом стоку Ψ_{mid} , поздовжнім похилом i_0 та коефіцієнтом n .

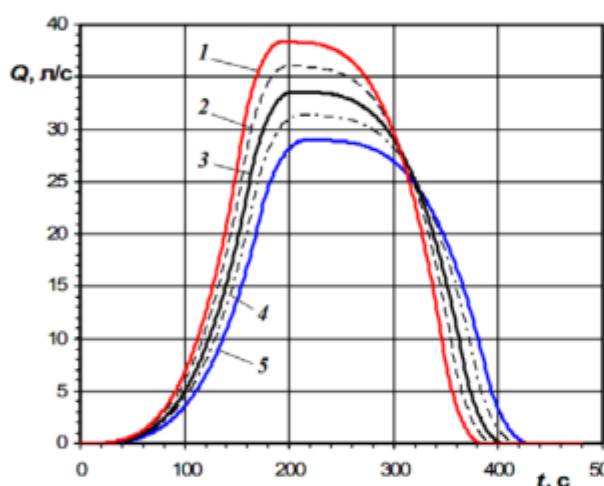


Рис.3. Гідрографи притоку при різних q_{20} , л/(с·га): 1 – 110; 2 – 105; 3 – 100; 4 – 95; 5 – 90 ($L/B = 0,5$; $i_0 = 0,01$; $\Psi_{mid} = 0,95$; $F = 1000 \text{ м}^2$; $n_1 = 0,013$; $n = 0,71$)

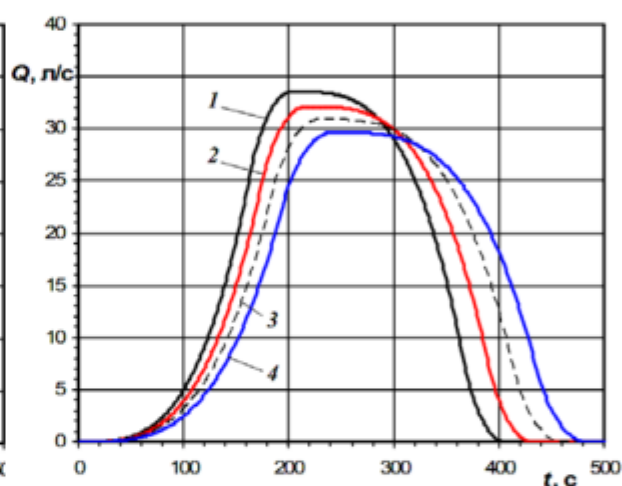


Рис.4. Гідрографи притоку при різних n_1 : 1 – 0,013; 2 – 0,014; 3 – 0,015; 4 – 0,016 ($L/B = 0,5$; $i_0 = 0,01$; $\Psi_{mid} = 0,95$; $F = 1000 \text{ м}^2$; $q_{20} = 100 \text{ л/с га}$; $n = 0,71$)

При збільшенні відношення довжини до ширини басейна стоку L/B зростає довжина шляху концентрації, що, відповідно, зумовлює збільшення часу концентрації та зменшення максимальної розрахункової витрати (рис. 5). Разом з тим, змінюються і безрозмірні гідрографи притоку. Як і для спрощеної моделі (при $V=\text{const}$), найбільш наближений за формою до радіальної моделі безрозмірний гідрограф притоку спостерігається при $L/B=0,5$, так як у цьому випадку відношення ефективного радіуса концентрації R_{ef} до довжини шляху концентрації R_{con} є максимальним. При збільшенні та зменшенні виразу L/B відносно його значення $L/B = 0,5$ має місце поступове наближення безрозмірного гідрографа до теоретичного розв'язку для лінійного басейна.

Встановлено, що має місце симетрія результатів відносно центрального значення $L/B = 0,5$. Наприклад, ідентичними є безрозмірні гідрографи притоку для басейнів зі співвідношеннями $L/B = 1$ і $0,25$; $L/B = 2$ і $0,125$ і т.д. При $L/B \geq 10$ (і, відповідно, $L/B \leq 0,025$) безрозмірні гідрографи притоку практично ідентичні з безрозмірним гідрографом для лінійного басейна (рис. 6).

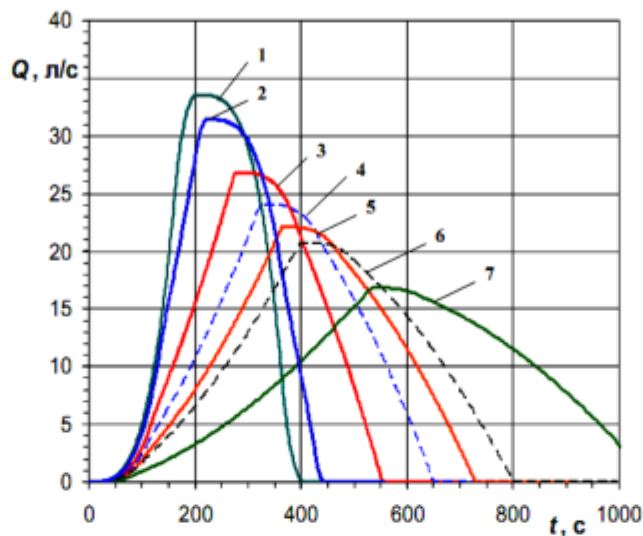


Рис.5. Типові гідрографи притоку з прямокутних у плані однорідних басейнів стоку з різним співвідношенням L/B :

1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4; 6 – 5; 7 – 10

($\Psi_{mid} = 0,95$; $F = 1000 \text{ м}^2$; $q_{20} = 10^{-5} \text{ м/с}$; $n = 0,71$; $i_0 = 0,01$; $n_1 = 0,013$)

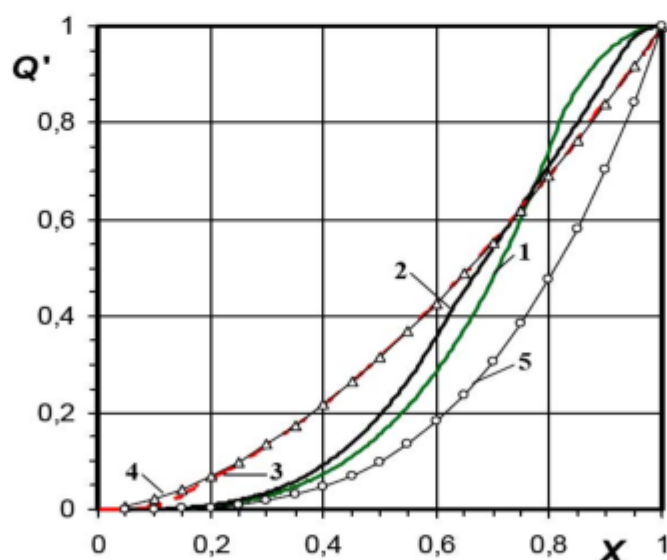


Рис.6. Перший етап безрозмірних гідрографів притоку дощових стічних вод:

1, 2, 3 – для прямокутних в плані басейнів стоку при $L/B = 0,5$; 1; 10 відповідно;

4, 5 – для лінійних та радіальних у плані басейнів стоку відповідно

Висновки

Розроблено удосконалений метод розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з прямокутних у плані однорідних урбанізованих басейнів стоку з урахуванням змінної швидкості течії, взаємовпливу між часом концентрації, тривалістю та інтенсивністю дощу. Метод полягає у розділенні басейна стоку на незалежні елементарні сектори, кожен з яких розглядається як радіальний басейн стоку. Чисельним інтегруванням гідрографів стоку з елементарних секторів отримано загальні гідрографи притоку зі всього басейна стоку. Метод може бути застосований для однорідних басейнів стоку довільної конфігурації в плані лише відповідною зміною рівнянь, що описують межі майданчика каналізування (для прямокутних майданчиків – це рівняння (17)–(19)).

За запропонованим методом складено комп'ютерну програму для розрахунку гідрографів притоку дощових стічних вод з прямокутних у плані однорідних басейнів стоку. Чисельні експерименти показали, що безрозмірні гідрографи притоку автомодельні за площею F , середнім похилом i_0 та коефіцієнтом шорсткості n_1 басейна стоку, коефіцієнтом стоку Ψ_{mid} , інтенсивністю дощу q_{20} та показником степеня n , і залежать лише від співвідношення довжини та ширини басейна L/B . Встановлено, що при центральному відношенні $L/B=0,5$ гідрограф стоку найбільше зміщений у напрямку теоретичного гідрографа з радіального басейна, а при $L/B \geq 10$ і $L/B \leq 0,025$ безрозмірні гідрографи притоку практично ідентичні з безрозмірним гідрографом для лінійного басейна.

Список літератури

1. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
2. Калицун В.И. Водоотводящие сети и сооружения.– М.: Стройиздат, 1987.– 336 с.
3. Отведение и очистка поверхностных сточных вод: Учеб. пособие для вузов / В.С. Дикаревский, А.М. Курганов, А.П. Нечаев, М.И. Алексеев. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.– 224 с.
4. Жук В.М. Гідрографи притоку поверхневих стічних вод при різних моделях концентрації стоку / В.М. Жук, Л.І. Вовк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – Львів: В-во НУ "ЛП". № 506, 2004. – С. 105–113.
5. Жук В.М. Радіальна модель концентрації дощових стічних вод / В.М. Жук, Л.І. Вовк // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Випуск 4. – К.: КНУБА, 2005.– С. 84–96.
6. Жук В.М. Розрахункова витрата дощових стічних вод для лінійних в плані басейнів стоку з постійним поздовжнім похилом / В.М. Жук, Л.І. Матлай / Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Теорія і практика будівництва". — № 697.— Львів. — 2011.—С. 97—103.

7. *Матлай І.І.* Розрахункова витрата та час концентрації дощового стоку з радіальних у плані басейнів з постійним поздовжнім похилом / І.І. Матлай, В.М. Жук, М.А. Саницький // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. Вип. 22.1 — Львів: НЛТУ — 2012. — С. 119-125.

8. *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.

УДК 625.731

О.С. СЛАВІНСЬКА, доктор технічних наук
В.В. СТЬОЖКА, аспірант
О.С. СТРОКАЧ, аспірант
Національний транспортний університет

ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДРЕНУЮЧОГО ШАРУ ДОРОЖНЬОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Результати експерименту по визначенню коефіцієнту фільтрації піску підтвердили припущення, про вплив вібрації на швидкість фільтрації води в піщаному шарі. Оскільки збільшення інтенсивності вібрації призводить до зростання коефіцієнту фільтрації, потрібно враховувати вплив вібрації, яка передається на дренажні шари дорожньої конструкції від транспортного потоку.

Ключові слова: коефіцієнт фільтрації, вібрація, дренажний шар, гранулометричний склад, максимальна щільність, оптимальна вологість, коефіцієнт неоднорідності.

Результаты эксперимента по определению коэффициента фильтрации песка подтвердили предположение, о влиянии вибрации на скорость фильтрации воды в слое песка. Поскольку увеличение интенсивности вибрации приводит к увеличению коэффициента фильтрации, необходимо учитывать влияние вибрации, которая передается на дренажные слои дорожной конструкции от транспортного потока.

Ключевые слова: коэффициент фильтрации, вибрация, дренажный слой, гранулометрический состав, максимальная плотность, оптимальная влажность, коэффициент неоднородности.