

Жук В.М., канд. техн. наук, Павлишин В.Г.

**МЕТОД ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НЕСТАЦІОНАРНИХ
ГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БЛОЧНИХ ОЧИСНИХ СПОРУДАХ
ДОЩОВИХ СТІЧНИХ ВОД**

Анотація. У статті розроблено метод гідравлічного розрахунку нестационарних гідравлічних процесів у блочних очисних споруд дощових стічних вод (ОСДСВ) з байпасним трубопроводом за відсутності пристроїв для регулювання витрати дощового стоку залежно від гідрографа притоку дощових вод та з урахуванням гідравлічних взаємозв'язків між усіма суміжними елементами системи. Запропонований метод дозволяє визначати оптимальне з гідравлічної точки зору значення діаметра байпасного трубопроводу. Для типових блочних ОСДСВ з номінальною продуктивністю 30 л/с отримано залежності коефіцієнта регульовального об'єму ОСДСВ від діаметра байпасного трубопроводу та безрозмірної тривалості дощу.

Ключові слова: очисні споруди дощових стічних вод, байпасний трубопровід, очисна витрата, коефіцієнт регульовального об'єму.

Аннотация. В статье разработан метод гидравлического расчета нестационарных гидравлических процессов в блочных очистных сооружениях дождевых сточных вод (ОСДСВ) с байпасным трубопроводом при отсутствии устройств для регулирования расхода дождевого стока в зависимости от гидрографа притока дождевых вод и с учетом гидравлических взаимосвязей между всеми смежными элементами системы. Предложенный метод позволяет определять оптимальное с гидравлической точки зрения значение диаметра байпасного трубопровода. Для типичных блочных ОСДСВ с номинальной производительностью 30 л/с получены зависимости коэффициента

регулюючого об'єму ОСДСВ от діаметра байпасного трубопровода и безразмерной продолжительности дождя.

Ключевые слова: очистные сооружения дождевых сточных вод, байпасный трубопровод, очистной расход; коэффициент регулирующего объема.

Annotation. The paper presents a method of hydraulic calculation of unsteady hydraulic processes in the block-type stormwater treatment system (SWTS) with a bypass pipe and without any flow control devices depending the stormwater runoff hydrograph and taking into account hydraulic dependencies between all adjacent elements of the system. The proposed method allows to determine the optimal hydraulic diameter of the bypass pipe. For typical block-type SWTS with a nominal capacity of 30 l/s there are obtained dependencies of the volume control coefficient versus the diameter of bypass pipe and the dimensionless duration of rain.

Keywords: stormwater treatment system, bypass pipe, treating discharge, volume control coefficient.

Постановка проблеми. Надійність роботи очисних споруд дощових стічних вод (ОСДСВ) значною мірою залежить від режиму надходження на них дощових стічних вод. Відомо, що притік дощових стічних вод характеризується значною нерівномірністю в часі, що негативно впливає на гідравлічний режим роботи очисних споруд [1]. З метою мінімізації капітальних і експлуатаційних затрат та для підвищення надійності роботи ОСДСВ в проектній практиці перевага завжди віддається системам очистки поверхневого стоку без використання насосного обладнання. На сьогодні широкого застосування набули малогабаритні ОСДСВ блочного типу з байпасним трубопроводом для відведення умовно-чистої частини дощового стоку (рис. 1). Поряд з тим, виникає цілий блок гідравлічних питань, пов'язаних з проектуванням цих споруд, оскільки регулювальний об'єм цих споруд є мінімальним, на практиці перепади позначок лотків вхідної та вихідної труби завжди досить жорстко

обмежені, а ОСДСВ за визначенням повинні ефективно працювати у всьому діапазоні витрат притоку, у тому числі і при перевищенні на вході максимальної розрахункової витрати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Великий внесок в теоретичне і експериментальне дослідження процесів очищення поверхневого стоку з урбанізованих територій зробили Молоков М.В., Шифрин В.Н., Дикаревский В.С., Курганов А.М., Нечаев А.П., Алексеев М.И., Иванов В. Г. та ін. [2–4]. Вітчизняні та закордонні дослідники все частіше звертають увагу на удосконалення відомих та пошук нових технологічних схем, які б забезпечували високі вимоги щодо якості очищених дощових стічних вод при мінімально можливому робочому об'ємі споруд. З іншого боку, гідравлічним питанням функціонування компактних блочних ОСДСВ наразі приділяється недостатньо уваги. Найпростішим вирішенням проблеми змінної витрати є влаштування на вході очисних споруд осереднювальної ємкості. Проте простий розрахунок показує, що об'єм такої ємкості часто перевищує загальний об'єм блочних ОСДСВ, що робить таку схему не конкурентоздатною. Іншим шляхом забезпечення нормального режиму роботи ОСДСВ є влаштування спеціальних регуляторів витрати, що також збільшує загальну вартість системи та піднімає питання щодо точності регулювання та надійності роботи регуляторів.

Метою роботи є розроблення методу гідравлічного розрахунку нестационарних процесів у блочних ОСДСВ з байпасним трубопроводом за відсутності спеціальних пристроїв для регулювання витрати дощового стоку з урахуванням гідравлічних взаємозв'язків між окремими елементами.

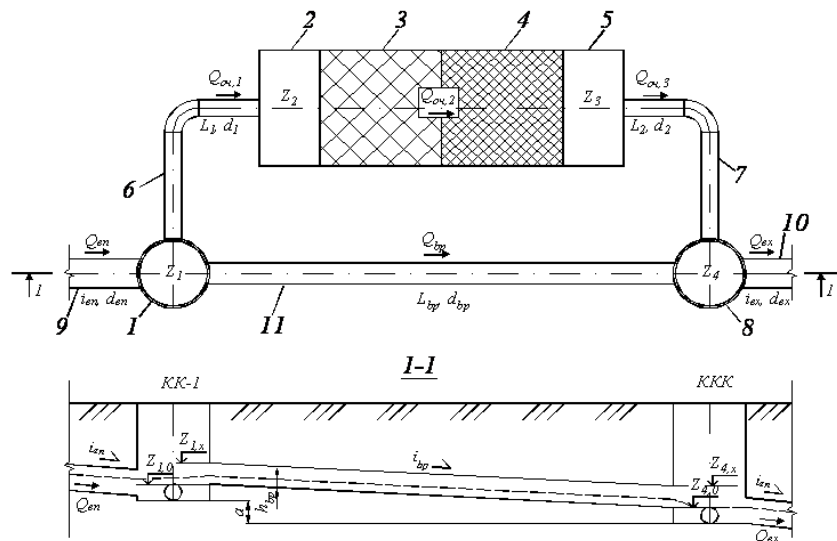


Рисунок 1 – Розрахункова схема блочних ОСДСВ з байпасним трубопроводом:

1 – розподільний колодезь; 2 – пісковловлювач; 3 – блок тонкошарових відстійників; 4 – блок коалесцентного очищення; 5 – вихідне відділення; 6, 7 – підвідний та відвідний трубопроводи блоку ОСДСВ; 8 – контрольний колодезь; 9, 10 – підвідний та відвідний трубопроводи мережі дощового водовідведення; 11 – байпасний трубопровід

Математична модель нестационарних гідравлічних процесів в ОСДСВ блочного типу. Для математичного опису гідравлічних процесів, які відбуваються у системі «ОСДСВ – байпасний трубопровід», необхідно записати рівняння матеріального балансу для кожного елемента системи та гідравлічні взаємозв'язки між усіма суміжними елементами.

Згідно схеми, наведеної на рис. 1, рівняння матеріальних балансів у довільний момент часу t :

– для розподільного колодезя 1:

$$(Q_{en} - Q_{oc,1} - Q_{bp})dt = \Omega_{\kappa,1}dz_1, \quad (1)$$

– для контрольного колодезя 8:

$$(Q_{oc,3} + Q_{bp} - Q_{ex})dt = \Omega_{\kappa,2}dz_4, \quad (2)$$

– для першої частини блочних ОСДСВ:

$$(Q_{oc,1} - Q_{oc,2})dt = \Omega_{OC,1}dz_2, \quad (3)$$

– для другої частини блочних ОСДСВ:

$$(Q_{i^{\pm},2} - Q_{i^{\pm},3})dt = \Omega_{i^{\pm},2}dz_3, \quad (4)$$

де Q_{en} , Q_{ex} – об'ємна витрата відповідно на вході та на виході системи; $Q_{oc,1}$, $Q_{oc,2}$, $Q_{oc,3}$, Q_{bp} – об'ємні витрати між відповідними елементами системи (рис. 1); z_1 , z_2 , z_3 , z_4 – позначки вільної поверхні рідини; $\Omega_{к,1}$, $\Omega_{к,2}$, $\Omega_{oc,1}$, $\Omega_{oc,2}$ – площа в плані вільної поверхні води відповідно у розподільному та контрольному колодязях, у першій та другій частинах блочних ОСДСВ.

Гідравлічні взаємозв'язки між суміжними елементами для довільного моменту часу t записуються без урахування інерційних членів як для напірних стаціонарних турбулентних потоків у квадратичній області гідравлічного опору. Так, позначка рівня води у вхідній частині ОСДСВ пов'язана з позначкою у розподільному колодязі залежністю

$$z_2 = z_1 - S_1 Q_{oc,1}^2, \quad (5)$$

де S_1 – гідравлічний опір першої ділянки діаметром d_1 і довжиною L_1 :

$$S_1 = \frac{8(\lambda_1 L_1 / d_1 + \Sigma \zeta_1)}{\pi^2 g d_1^4}, \quad (6)$$

де λ_1 , $\Sigma \zeta_1$ – коефіцієнт гідравлічного тертя та сума коефіцієнтів місцевого опору для першої ділянки.

Аналогічно визначаються позначки z_3 та z_4 :

$$z_3 = z_2 - S_{oc} Q_{oc,2}^2, \quad (7)$$

$$z_4 = z_3 - S_2 Q_{oc,3}^2. \quad (8)$$

Гідравлічний опір другої ділянки трубопроводу визначається аналогічно, як для першої ділянки, а гідравлічний опір ОСДСВ:

$$S_{oc} = \frac{8 \Sigma \zeta_{oc}}{\pi^2 g d_e^4}, \quad (9)$$

де d_e – еквівалентний діаметр проточної частини очисних споруд; $\Sigma \zeta_{oc}$ – сума коефіцієнтів місцевого опору всередині блочних ОСДСВ.

Визначимо умови роботи байпасного трубопроводу:

– при позначці $z_1 < (a + d_1)$ витрата в байпасному трубопроводі відсутня (див. розріз 1–1 на рис. 1);

– при $(a + d_1) \leq z_1 < (a + d_1 + d_{bp})$ байпасний трубопровід «працює» в безнапірному режимі:

$$Q_{bp} = Q_{bp,x} \frac{h_{bp}}{d_{bp}}; \quad (10)$$

– при $z_1 \geq (a + d_1 + d_{bp})$ байпасний трубопровід «працює» в напірному режимі:

$$Q_{bp} = \frac{z_1 - z_4}{S_{bp}}, \quad (11)$$

де $Q_{bp,x}$ – витрата рідини в байпасному трубопроводі на початку напірного режиму течії в ньому, яка знаходиться за формулою (11) при $z_1 = z_{1,x}$; $z_4 = z_{4,x}$ (див. рис. 1).

Аналогічно можна записати характеристику відповідного трубопроводу:

– при $z_4 < d_{ex}$ (для безнапірної течії):

$$Q_{ex} = Q_{ex,0} \frac{z_4}{d_{ex}}, \quad (12)$$

– при $z_4 \geq d_{ex}$ (для напірної течії):

$$Q_{ex} = Q_{ex,0} \sqrt{\frac{z_4 + h_{ex} - d_{ex}/2}{h_{ex} + d_{ex}/2}}, \quad (13)$$

де $Q_{ex,0}$ – витрата у відповідному трубопроводі на початку напірного режиму течії:

$$Q_{ex,0} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot g \cdot d_{ex} (h_{ex} + d_{ex}/2)}{8(\lambda_{ex} \cdot L_{ex} / d_{ex} + \sum \zeta_{ex})}}, \quad (14)$$

де h_{ex} – перепад позначок лотка відповідного трубопроводу.

Таким чином, отримано систему з дев'яти нелінійних диференціальних рівнянь з дев'ятьма невідомими функціями: чотирьох висотних позначок (z_1, z_2, z_3, z_4) та п'яти об'ємних витрат ($Q_{оч,1}, Q_{оч,2}, Q_{оч,3}, Q_{bp}, Q_{ex}$).

Метод гідравлічного розрахунку нестационарних процесів в ОСДСВ блочного типу. Отриману вище систему диференціальних рівнянь можна вирішити чисельним інтегруванням за методом кінцевих різниць. Авторами розроблено комп'ютерну програму, в якій на кожному часовому інтервалі з рівнянь (5)–(14) визначаються значення витрат $Q_{оч,1}, Q_{оч,2}, Q_{оч,3}, Q_{bp}$, і Q_{ex} , які відповідають поточним значенням позначок z_i , а з рівнянь матеріального балансу (1)–(4) обчислюється зміна позначок Δz_i для цього часового інтервалу.

Важливим вхідним параметром, який впливає на перебіг нестационарних процесів в ОСДСВ блочного типу, є гідрограф притоку дощових вод. Як

показано в роботі [5], для розрахункового дощу з тривалістю, що дорівнює часові концентрації поверхневого стоку ($t_0=t_r$), гідрограф стоку з лінійних у плані урбанізованих басейнів стоку описується рівняннями:

– при $t < t_r$:

$$Q_{en} = Q_r (t/t_r)^{5/3}, \quad (15)$$

– при $t_r \leq t < 2t_r$:

$$Q_{en} = Q_r [1 - (t/t_r - 1)^{5/3}]. \quad (16)$$

Розрахункова максимальна витрата Q_r та час концентрації дощового стоку t_r залежать від кліматичних особливостей місцевості та характеристик басейну стоку:

$$Q_r = (\psi_{mid} q_{20})^{\frac{1}{1-0,4n}} \left(\frac{720 i_o^{0,3}}{n_1^{0,6} L_{con}^{0,6}} \right)^{\frac{n}{1-0,4n}} \cdot F_{бас}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (17)$$

$$t_r = \left[\frac{5(L_{con} \cdot n_1)^{0,6}}{3(1200^a \psi_{mid} q_{20})^{0,4} i_o^{0,3}} \right]^{\frac{1}{1-0,4n}}, \quad \text{с}; \quad (18)$$

де ψ_{mid} – коефіцієнт стоку; q_{20} – розрахункова інтенсивність випадання дощу тривалістю 20 хв при періоді одноразового перевищення $P=1$ рік, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; n – показник степеня в рівнянні $q_0 = A/t_0^n$; i_o , n_1 , $F_{бас}$ – відповідно поздовжній похил, коефіцієнт шорсткості поверхні та загальна площа басейну стоку, м^2 ; L_{con} – довжина шляху концентрації стоку, м.

За допомогою розробленої програми виконано дослідження динаміки наповнення та спорожнення типової системи «ОСДСВ – байпасний трубопровід», що характеризується номінальною очисною витратою $Q_{OC}=30$ л/с при різних значеннях діаметра байпасного трубопроводу. За нульову позначку прийнято відмітку дна контрольного колодязя. Діаметри розподільного та контрольного колодязів прийнято такими, що дорівнюють $D_{к,1}=D_{к,2}= 2$ м; діаметри підвідного та відвідного трубопроводів з ОСДСВ – $d_1=d_2= 150$ мм; площа в плані першої та другої частини блочних ОСДСВ: $\Omega_{OC,1}=\Omega_{OC,2}= 10 \text{ м}^2$.

Розраховано перехідні процеси в системі «ОСДСВ – байпасний трубопровід» для гідрографа притоку дощового стоку з $P=1$ рік. Кліматичні параметри: $q_{20} = 100$ л/(с·га), $n=0,71$, як для рівнинних областей України. Басейн стоку площею $F_{бас}=1,68$ га – прямокутний у плані однорідний басейн зі співвідношенням довжин сторін 4:1, з удосконаленими водонепроникними покриттями ($\psi_{mid} = 0,95$). Розрахункова витрата, обчислена за формулою (17) дорівнює $Q_r=136$ л/с, $t_r=25$ хв, прийняте значення коефіцієнта очисної витрати $K_{оч}=0,22$, що відповідає номінальній продуктивності ОСДСВ $Q_{ос}=30$ л/с.

Динаміка зміни позначок рівнів рідини в елементах системи наведена на рис. 2.

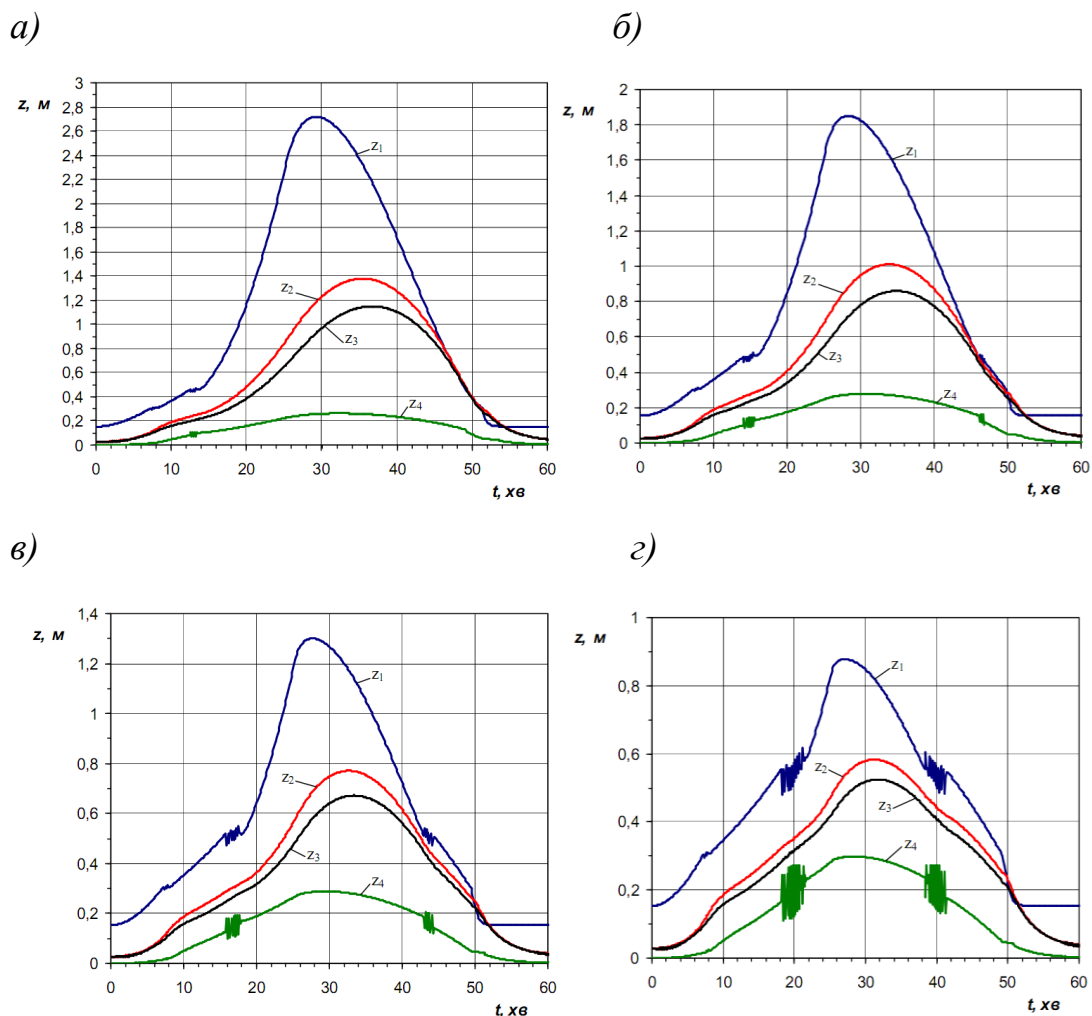


Рисунок 2 – Динаміка зміни рівнів рідини при різних діаметрах байпасного трубопроводу: а) $d=150$ мм; б) $d=180$ мм; в) $d=210$ мм; г) $d=250$ мм ($q_{20}=100$ л/(с·га); $n=0,71$; $\psi_{mid}=0,95$; $L/B=5$; $n_1=0,013$; $i_o=0,01$; $Q_r=136,26$ л/с; $K_{оч}=0,22$; $Q_{ос}=30$ л/с)

Як видно з графіків на рис. 2, система «ОДСВ – байпасний трубопровід» дуже чутлива до конструктивних параметрів, у даному випадку – до діаметра байпасного трубопроводу. Наприклад, максимальна позначка рівня рідини на початку ОДСВ z_2 при значенні діаметра $d_{bp}=150$ мм в 2,4 рази більша, ніж для $d_{bp}=250$ мм. Загалом, підвищення рівня рідини всередині ОДСВ такої продуктивності більш, як на 400–500 мм, в реальних умовах вже призводить до їх підтоплення.

На рис. 3 показано графіки зміни в часі об'ємних витрат води в досліджуваній системі.

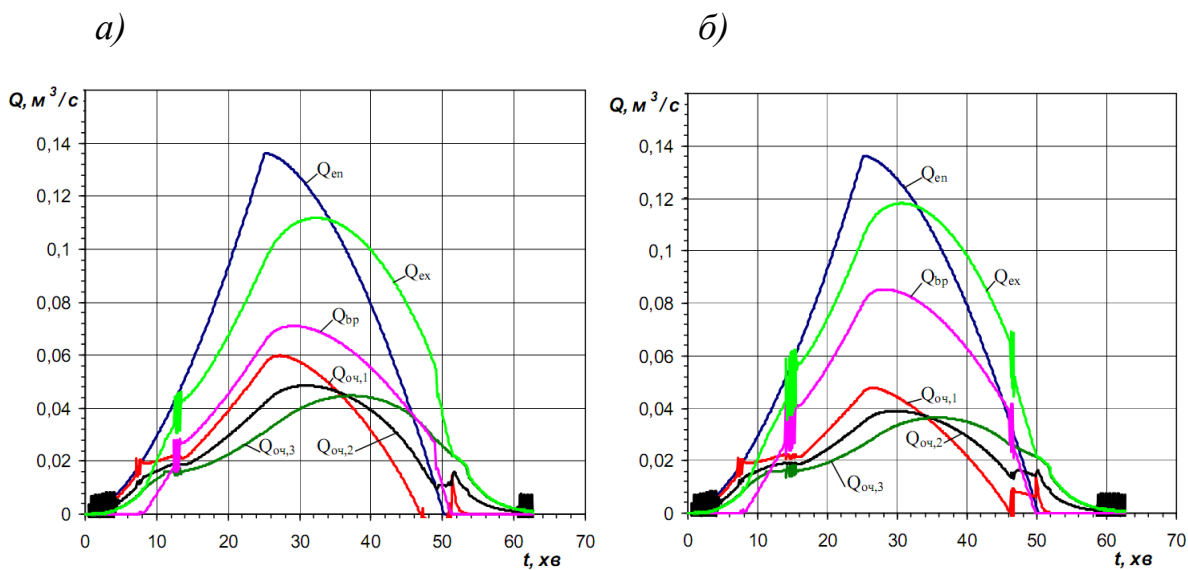


Рисунок 3 – Графіки зміни витрат води в системі при різних діаметрах байпасного трубопроводу для: а) $d=150$ мм; б) $d=180$ мм (при тих самих умовах, що на рис. 2)

З рис. 3 видно, що об'ємна витрата в ОДСВ блочного типу ($Q_{оч,2}$) протягом 15–25 хв перевищує номінальну продуктивність очисних споруд (Q_{OC}), досягаючи при $d_{bp}=150$ мм максимального значення 48,5 л/с, що становить 162 % від Q_{OC} , а при $d_{bp}=180$ мм – 38,9 л/с або 130 % від Q_{OC} .

На рис. 4 показано графіки, що описують зміну максимальних рівнів води в елементах системи та максимальної очисної витрати $Q_{оч,max}$ залежно від діаметра байпасного трубопроводу.

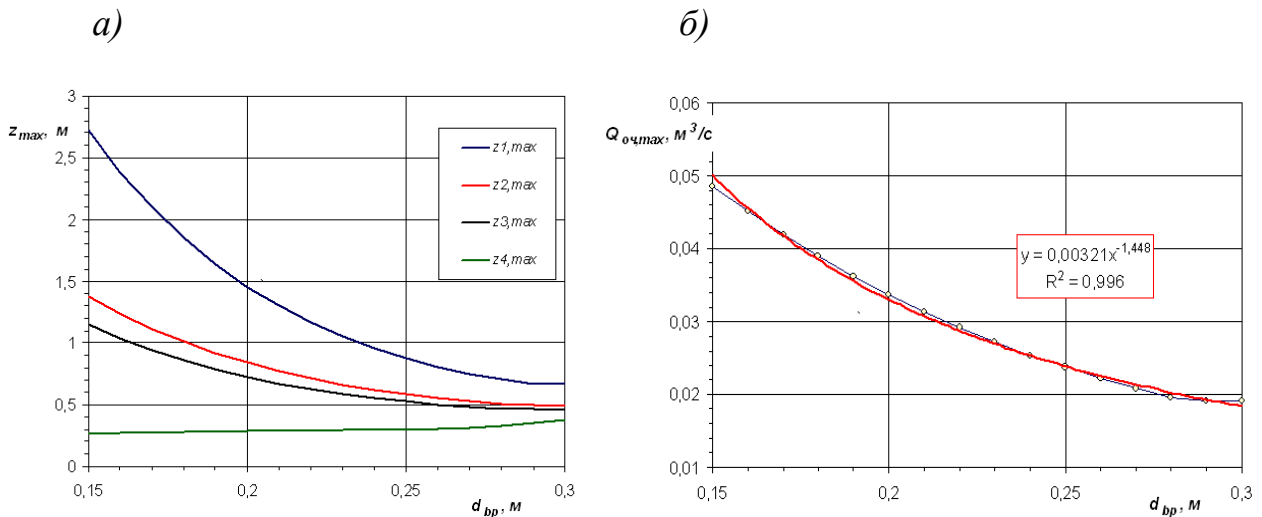


Рисунок 4 – Вплив діаметра d_{bp} на максимальні значення рівнів та витрат: а) залежність максимальних рівнів води в системі; б) залежність максимальної очисної витрати $Q_{оч, max}$ від діаметра d_{bp} (при тих самих умовах, що на рис. 2)

Видно, що завищення діаметра байпасу також має свій негативний аспект. Так, для проаналізованих блочних ОСДСВ при $d_{bp} > 210$ мм максимальна витрата в очисних спорудах не перевищує номінального значення (30 л/с), тобто з подальшим збільшенням діаметра d_{bp} має місце недовантаження ОСДСВ та зростає частка забрудненого дощового стоку, який байпасним трубопроводом без очищення надходить прямо в контрольний колодезь.

Отримано, що залежність $Q_{оч, max}$ від діаметра байпасного трубопроводу добре описується апроксимаційною степеневою формулою ($R^2 \geq 0,99$):

$$Q_{оч, max} = \frac{0,00321}{d_{bp}^{1,45}} \cdot \quad (19)$$

Аналогічною є залежність відносної максимальної очисної витрати $Q_{оч, max} / Q_{OC}$ від діаметра байпасного трубопроводу d_{bp} :

$$Q_{оч, max} / Q_{OC} = \frac{0,107}{d_{bp}^{1,448}} \cdot \quad (20)$$

Виконаний вище аналіз дозволяє визначити оптимальний з гідравлічної точки зору діаметр байпасної лінії. Для розглянутої системи "ОСДСВ – байпасний трубопровід" – це діаметр $d_{bp} = 210$ мм, за якого $Q_{оч, max} / Q_{OC} \approx 1$.

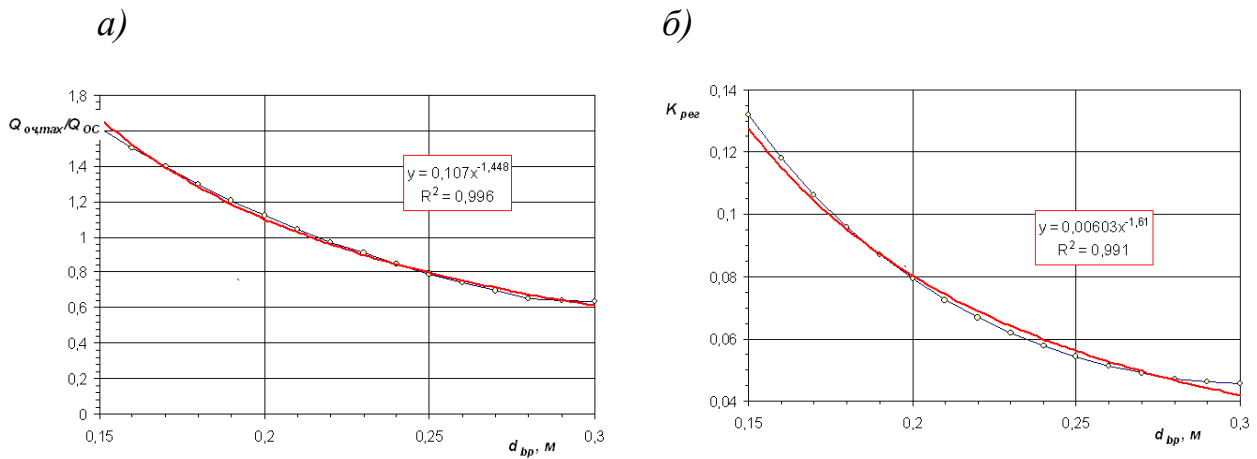


Рисунок 5 – Вплив діаметра байпасного трубопроводу на значення: а – відносної максимальної очисної витрати $Q_{оч,max}/Q_{ОС}$; б – коефіцієнта регулювального об'єму ОСДСВ $K_{рег}$ (при тих самих умовах, що на рис. 2)

Для аналізу регулювальної здатності ОСДСВ блочного типу по аналогії з регулювальними резервуарами введено до розгляду коефіцієнт регулювального об'єму ОСДСВ:

$$K_{рег} = \frac{W_{рег}}{Q_r t_r} = \frac{\Omega_{ОС}(z_{2,max} - z_{3,0})}{Q_r t_r}. \quad (21)$$

На рис. 5,б показано залежність розрахункового значення коефіцієнта регулювального об'єму $K_{рег}$ від діаметра байпасного трубопроводу $d_{бп}$ для аналізованих ОСДСВ блочного типу. Ця залежність добре описується степеневою лінією тренду:

$$K_{рег} = \frac{0,00603}{d_{бп}^{1,61}}. \quad (22)$$

Для узагальнення результатів виконано аналіз залежності коефіцієнта регулювального об'єму ОСДСВ від безрозмірної тривалості дощу $X_0 = t_0/t_r$ (у випадку випадання дощів більшої тривалості, ніж t_r та, відповідно, меншої інтенсивності). Для оптимального з гідравлічної точки зору діаметра байпасного трубопроводу $d_{бп} = 210$ мм отримано, що при $1 \leq X_0 \leq 2$ залежність коефіцієнта $K_{рег}$ від безрозмірної тривалості дощу X_0 добре описується лінійною формулою

$$K_{рег} = 0,11 - 0,034X_{\partial} \quad (23)$$

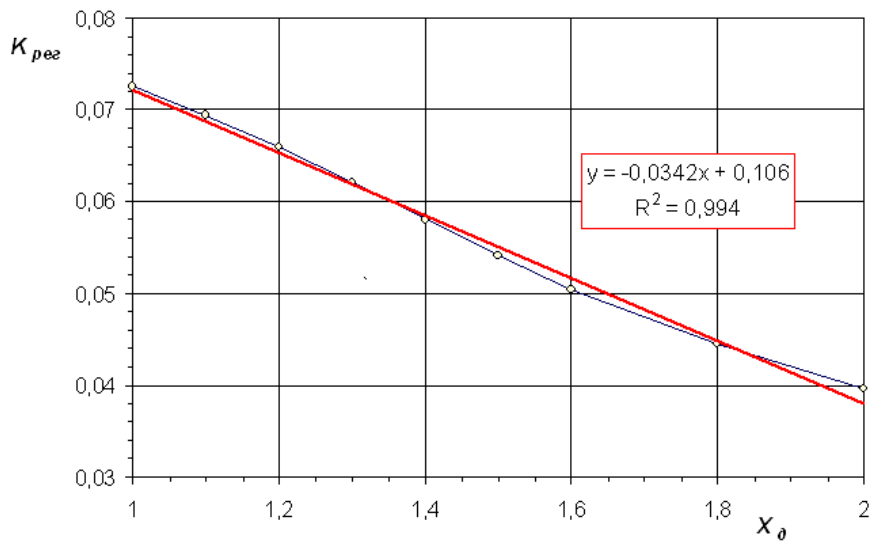


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта регульовального об'єму ОСДСВ $K_{рег}$ від безрозмірної тривалості дощу X_{∂} ($d_{bp}=210$ мм та при тих самих умовах, що на рис. 2)

ВИСНОВКИ

Розроблено метод гідравлічного розрахунку нестационарних гідравлічних процесів у блочних ОСДСВ з байпасним трубопроводом за відсутності пристроїв для регулювання витрати дощового стоку залежно від гідрографа притоку дощових стічних вод та з урахуванням гідравлічних взаємозв'язків між усіма суміжними елементами системи. Показано, що система «ОСДСВ – байпасний трубопровід» особливо чутлива до значення діаметра байпасного трубопроводу d_{bp} . Запропонований метод дозволяє визначати оптимальне з гідравлічної точки зору значення діаметра d_{bp} . Проаналізовано залежності коефіцієнта регульовального об'єму ОСДСВ від діаметра байпасного трубопроводу та безрозмірної тривалості дощу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жук В.М. Розрахункова витрата дощових стічних вод для лінійних в плані басейнів стоку з постійним поздовжнім похилом / В.М. Жук, І.І. Матлай / Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Теорія і практика будівництва". — № 697.— Львів. — 2011. — С. 97–103.
2. Молоков М. В. Очистка поверхностного стока с территорий городов и промышленных площадок / М. В. Молоков, В. Н. Шифрин. — М.: Стройиздат, 1977. — 104 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. Иванов В.Г. Тонкослойные отстойники для интенсификации очистки природных и сточных вод: дисс. д-ра техн. наук: 05.23.04 / Иванов В.Г. — СПб., 1998. — 304 с.
5. 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.