

УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2025-118.2-194-202

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРАВЛІЧНИХ ФАКТОРІВ ПРИ РОЗРАХУНКУ МАЛИХ
МОСТІВ З УРАХУВАННЯМ АККУМУЛЯЦІЇ

STUDY OF THE INFLUENCE OF HYDRAULIC FACTORS IN THE DESIGN OF SMALL
BRIDGES TAKING INTO ACCOUNT ACCUMULATION



Петрович Володимир Володимирович, аспірант кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: menor@ukr.net, тел. +380930932262

<https://orcid.org/0009-0002-1513-2789>



Петрович Ігор Володимирович, аспірант кафедри системного проектування об'єктів транспортної інфраструктури та геодезії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: igor19932008@gmail.com, тел. +380663837188

<https://orcid.org/0009-0008-3551-3718>



Савенко Сергій Сергійович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: sava0304@gmail.com, тел. +380639570047.

<https://orcid.org/0009-0007-2243-3471>



Чечуга Євген Сергійович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: Cecugazena2@gmail.com, тел. +3800937533521

<https://orcid.org/0009-0008-6799-4843>



Юрчук Віталій Васильович, аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: urcukvitalij6@ukr.net, тел. +380966611626

<https://orcid.org/0009-0008-8596-5296>

Анотація: У роботі розглянуто вплив акумуляції води перед малими гідротехнічними спорудами, зокрема мостами, на гідравлічний режим потоку під час паводків. Встановлено, що за умови недостатньої ширини отвору споруди утворюється підпір, а частина води затримується перед насипом дороги, що змінює форму гідрографа витрати. Акумуляція води має суттєвий вплив на величину скидної витрати, особливо при короткотривалих паводках. Врахування цього явища дозволяє оптимізувати габарити споруди, зменшити її отвір або висоту насипу. Історично цей підхід не застосовувався через нестачу вихідних гідрографічних даних, проте сучасні нормативи й методи розрахунку забезпечують можливість урахування акумуляції за допомогою простих інженерних рішень.

Ключові слова: штучні споруди, акумуляція, гідрограф, об'ємом стоку, величина скидної витрати, форми лога.

Вступ. У проектуванні малих гідротехнічних споруд, зокрема мостових переходів, важливим є точне визначення гідравлічних характеристик потоку під час паводків. Особливу увагу слід приділяти явищу акумуляції води перед спорудою, що виникає внаслідок невідповідності ширини отвору споруди ширині потоку. За таких умов відбувається підпір, зростає швидкість течії в отворі, а частина припливної води тимчасово затримується перед насипом дороги.

Це явище суттєво впливає на формування гідрографа витрати в розрахунковому створі, зумовлюючи зміну як максимальної витрати, так і глибини потоку. Акумуляція води особливо важлива при короткотривалих паводках, коли її врахування дозволяє оптимізувати конструкцію споруди — зменшити розміри отвору або знизити висоту насипу без втрати пропускної здатності. Дослідження, викладене в даній роботі, спрямоване на аналіз впливу акумуляції на гідравлічний режим малих мостів та обґрунтування підходів до врахування цього ефекту в інженерних розрахунках.

Виклад основного матеріалу. Отвіри малих штучних споруд зазвичай менший за ширину потоку (при розрахунковій витраті) що впливає на зменшення живого перерізу. В результаті цього частина протікаючої води з басейну тимчасово затримується перед штучною спорудою, утворюючи певний об'єм акумуляції ($W_{ак}$), який в окремих випадках може становити вагомую частку загального об'єму стоку W .

Ступінь накопичення, відображена відношенням $\frac{W_{ак}}{W}$, визначає розміри акумуляції що відповідають розрахунковому об'єму скидної витрати $Q_{ск}$ (тобто об'єму, який фактично проходить через отвір малого мосту при розрахунковому напорі води H). Відповідно, що чим більше відношення $\frac{W_{ак}}{W}$, тобто чим більше накопичиться води перед штучною спорудою, тим менша величина скидної витрати, і навпаки, при зменшенні об'єму накопичення $Q_{ск}$ наближається за своєю величиною до максимальної витрати притоку води Q_{max} .

За умов значного об'єму акумуляції в заданій гідрологічній ситуації, розрахунково несприятливішим може виявитися не гідрограф з максимальною витратою, а той, що характеризується більшим загальним об'ємом стоку при нижчій інтенсивності витрати. [1]

Таку перевірку зазвичай проводять не для кожного гідрографа з серії з однаковою ймовірністю реалізації кожного гідрографа, а приймають до розрахунку беруть лише гідрограф з максимальним об'ємом стоку.

Таким чином, врахування акумуляції води (тобто накопиченої води перед малим мостом для забезпечення розрахункового напору H) дозволяє зменшити розміри споруди (при тому ж самому напорі H) або знизити напір H перед мостом (при тому ж отворі). Максимальний ефект від урахування акумуляції спостерігається для споруд, розташованих у рівнинних або слабо пересічених районах.

При виконанні практичних розрахунків ступінь накопичення регулюється, виходячи з інженерно-технічних міркувань залежно від допустимої глибини підтоплення кромки насипу підходів або місцевості біля споруди, а також узгоджується з розміром отвору і допустимою швидкістю на виході зі штучної споруди.

Відповідно до нормативних вказівок (ВСН 63-67) розрахунок отворів малих мостів на витрати зливого стоку у всіх випадках проводиться з урахуванням акумуляції, а зменшення розрахункової витрати припливу води за рахунок акумуляції допускається не більше ніж на 67 %.

Розрахунок отворів малих мостів [2] на витрати зливого стоку у всіх випадках проводиться з урахуванням акумуляції, а зменшення розрахункової витрати притоку води за рахунок акумуляції допускається не більше ніж на 67%.

Розрахунки з урахуванням акумуляції базуються на розв'язанні диференціального рівняння водного балансу

$$\Omega dH = Q dt - Q_{ск} dt, \quad (1)$$

Де Ω - площа дзеркала ставка, утвореного накопиченою водою перед спорудою;

dH - зміна рівня води у ставку;

Q - витрата зливого стоку, що відповідає зміні гідрографа;

$Q_{ск}$ - скидна витрата, визначена пропускною здатністю споруди при даному напорі;

dt - розглянутий проміжок часу.

За методом розв'язання рівняння (1) всі підходи розрахунку з урахуванням акумуляції можна поділити на аналітичні, графоаналітичні та чисельні (табличні). Найчастіше у практичних розрахунках застосовуються аналітичні та графоаналітичні методи.

Розглянемо розрахунок отвору мосту за методом Ю. М. Даденкова рекомендується виконувати у такій послідовності.

Спочатку необхідно визначити обсяг ставка перед насипом при глибині H_p , для чого підраховують коефіцієнт форми лога [4]

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{i_1} + \frac{1}{i_2} \right) \frac{1}{i_n} \quad (2)$$

де k - коефіцієнт форми лога;

i_1 та i_2 - ухили схилів лога;

i_n - схил лога;

Об'єм води $W_{пр}$ може бути визначений за планом місцевості в горизонталях перед спорудженням. Потім визначають допоміжну величину $l = \frac{2W_{пр}}{W}$ і за даними табл. 1 встановлюють іншу допоміжну величину, відповідну вичисленому значенню l .

Далі рахують час зростання витрат припливу $T_1 = \frac{W}{Q_{\Delta}}$, що робить можливість визначити ширину отвору моста з урахуванням акумуляції за формулою

$$b_{ек} = \frac{1}{m\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{2kQ_{\Delta}}{3a_0 T_1}} \quad (3)$$

Округливши значення до найближчого стандартного значення обчислюють уточнену допоміжну величину

$$a_0 = \frac{kQ_{\Delta}}{1,5 m^2 2g b_{ек}^2 T_1} \quad (4)$$

Для полегшення розрахунків використаємо табл. 1 допоміжних величин a_0 , φ та l . Послідовність розрахунку отвору малого моста з урахуванням акумуляції за способом Ю.М. Даденкова наступна.

Таблиця 1 - допоміжних величин
Table 1 - Auxiliary values

a_0	φ	l	a_0	φ	l	a_0	φ	l
0	1	0	2,0	0,58	0,68	5,8	0,42	1,03
0,1	0,93	0,09	2,2	0,57	0,71	6,0	0,41	1,05
0,2	0,89	0,16	2,4	0,56	0,74	6,5	0,40	1,07
0,3	0,85	0,21	2,6	0,54	0,77	7,0	0,39	1,10
0,4	0,81	0,26	2,8	0,53	0,79	8,0	0,38	1,14
0,5	0,79	0,31	3,0	0,52	0,81	9,0	0,36	1,17
0,6	0,76	0,35	3,2	0,51	0,83	10	0,35	1,21
0,7	0,74	0,39	3,4	0,50	0,85	12	0,33	1,27
0,8	0,73	0,42	3,6	0,49	0,87	14	0,31	1,31
0,9	0,71	0,45	3,8	0,48	0,89	16	0,29	1,35
1,0	0,69	0,48	4,0	0,48	0,91	18	0,28	1,39
1,1	0,68	0,50	4,2	0,47	0,92	20	0,27	1,43
1,2	0,66	0,52	4,4	0,46	0,94	25	0,24	1,47
1,3	0,65	0,55	4,6	0,46	0,95	30	0,23	1,54
1,4	0,64	0,57	4,8	0,45	0,97	35	0,21	1,58
1,5	0,63	0,60	5,0	0,44	0,98	40	0,20	1,60
1,6	0,62	0,62	5,2	0,43	0,99	50	0,18	1,67
1,7	0,61	0,64	5,4	0,43	1,00	100	0,13	1,76
1,8	0,60	0,65	5,6	0,42	1,01	-	0	2,00
1,9	0,59	0,67						

А потім по таблиці 1 знаходять коефіцієнт акумуляції що дозволяє встановити потрібну величину скидного витрати [5]

$$Q_{сδ} = \varphi_1 Q_{л} \tag{5}$$

На закінчення обчислюють дійсний натиск перед спорудженням [6]

$$H_p = \sqrt[3]{\left(\frac{Q_{ск}}{m\sqrt{2gb}}\right)^2} \tag{6}$$

Проведемо дослідження зміни отвору малого мосту з урахуванням акумуляції при нахилі лога $i_{л}$ від 0,001 до 0,1, середні похили схилів $i_1 = i_2 = 0,01$, допустимий напір перед насипом $H_p = 2,0$ м, ширина розриву ставка $B = 370$ м, максимальний розхід зливових вод $Q = 15,5$ м³/сек, повний об'єм стоку $W = 180$ тис\м³.

Результати розрахунків по вище наведених формулах занесемо в таблицю 2.

Таблиця 2 – Зміна отвору розміру малого моста від схилу лога

Table 2 – Change in the opening size of the small bridge from the slope of the ravine

Схил лога ‰	0,001	0,003	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,05	0,1
Отвір мосту м	5,26	3,03	2,35	1,66	1,36	1,18	1,05	0,74	0,53

Для зручності сприйняття даних показників побудуємо діаграму.

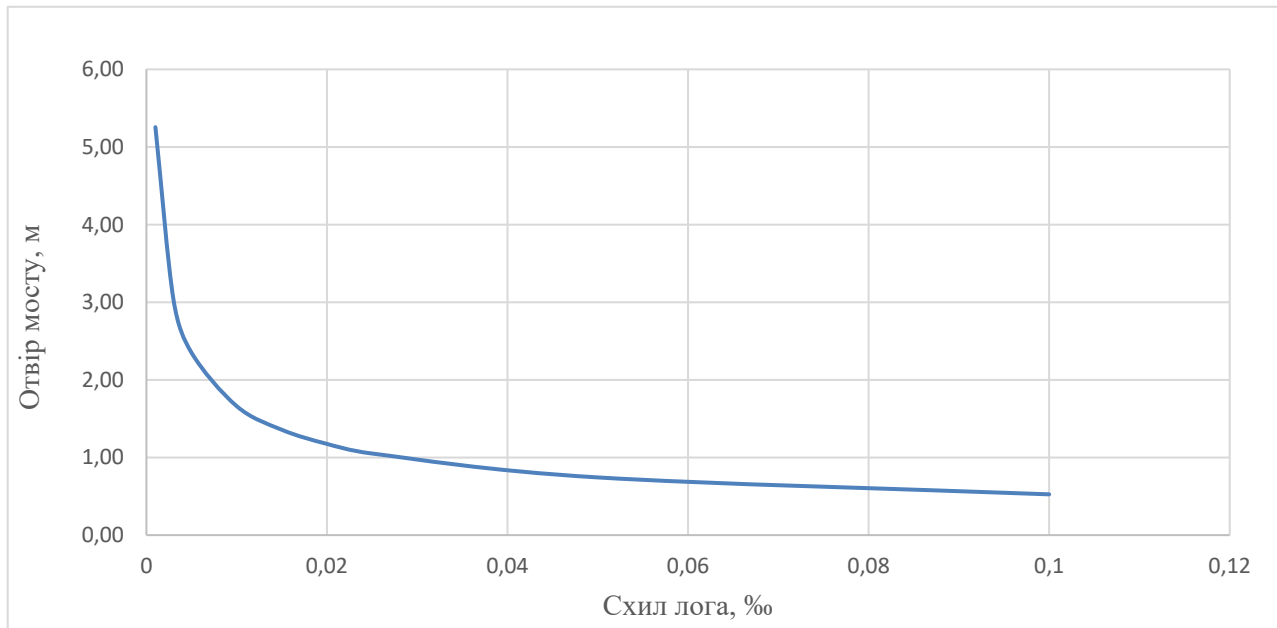


Рисунок 1 – залежність зміни отвору мосту від схилу лога

Figure 1 – Dependence of bridge span variation on slope gradient

Виходячи з виконаних розрахунків та побудованого графіка рис. 1 розмір отвору малого моста зменшується від збільшення схилу лога.

Проведемо дослідження зміни отвору малого мосту з урахуванням акумуляції, нахилі лога i_l від 0,005, середні похили схилів $i_1 = i_2 = 0,01$, допустимий напір перед насипом $H_p = 2,0$ м, ширина розриву ставка $B = 370$ м, максимальний розхід зливових вод $Q =$ від 1 до 100 м³/сек, повний об'єм стоку $W = 180$ тис\м³. [7]

Результати розрахунків по вище наведених формулах занесемо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Зміна отвору розміру малого моста від максимального розходу ливневих вод

Table 3 – Change in the opening size of the small bridge from the maximum storm water discharge

Макс. розхід ливневих вод м/сек ³	1	3	5	10	15	20	25	50	100
Отвір мосту м	0,60	1,03	1,33	1,89	2,31	2,67	2,98	4,22	5,97

Для зручності сприйняття даних показників побудуємо діаграму.

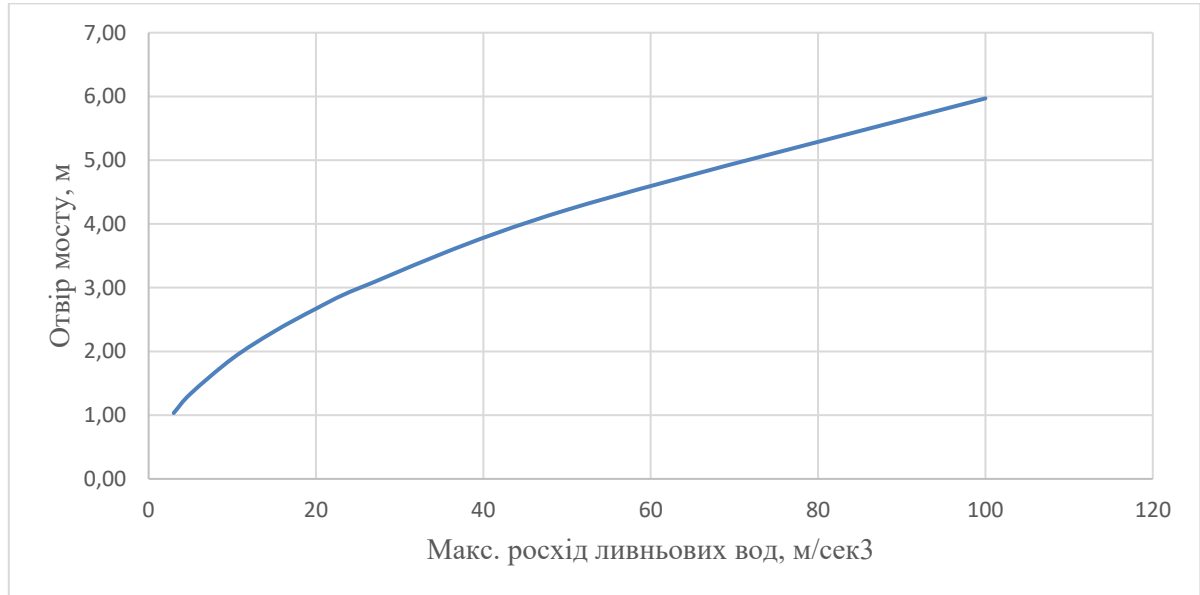


Рисунок 2 – Залежність зміни отвору мосту від максимального розходу ливньових вод
Figure 2 – Dependence of bridge opening change on maximum storm water discharge

Виходячи з виконаних розрахунків та побудованого графіка рис. 2 розмір отвору малого моста збільшується від збільшення максимального розходу ливньових вод.

Проведемо дослідження зміни отвору малого мосту з урахуванням акумуляції, нахилі лога $i_{\text{л}}$ від 0,005, середні похили схилів $i_1 = i_2 = 0,01$, допустимий напір перед насипом $H_p = 2,0$ м, ширина розриву ставка $B = 370$ м, максимальний розхід зливових вод $Q = 15,5$ м³/сек³, повний об'єм стоку $W =$ від 10 до 400 тис\м³.

Результати розрахунків по вище наведених формулах занесемо в таблицю 4.

Таблиця 4 – Зміна отвору розміру малого моста від об'єму стоку
Table 4 – Change in the opening size of the small bridge from the volume of runoff

Повний об'єм стока м³	10	50	100	150	200	250	300	350	400
	000,00	000,00	000,00	000,00	000,00	000,00	000,00	000,00	000,00
Отвір мосту м	9,97	4,46	3,15	2,57	2,23	1,99	1,82	1,69	1,58

Для зручності сприйняття даних показників побудуємо діаграму.

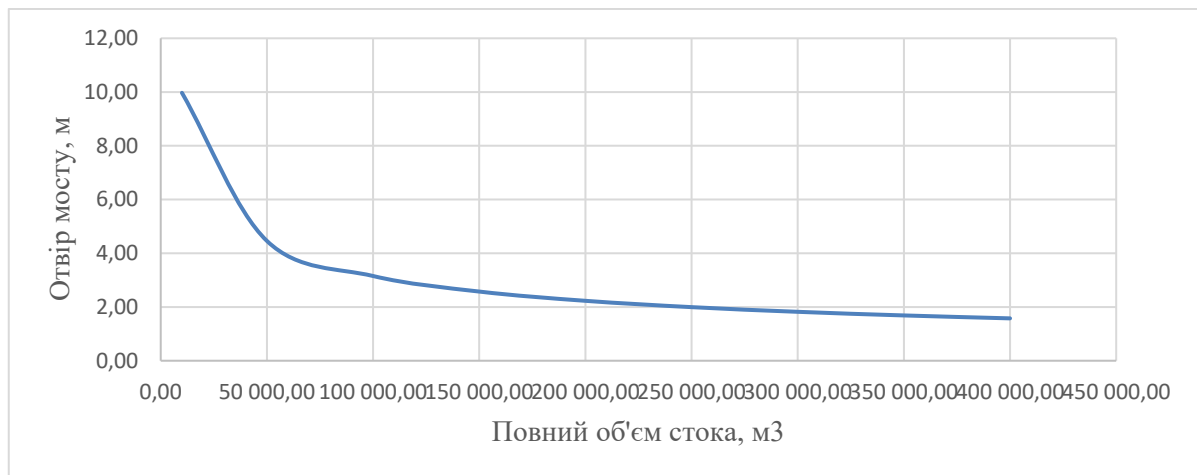


Рисунок 3 – Залежність зміни отвору моста від об'єму стоку
Figure 3 – Dependence of bridge opening change on flow volume

Виходячи з виконаних розрахунків та побудованого графіка рис. 3 розмір отвору малого моста зменшується від збільшення повного об'єму стоку.

Висновки. У стисненому стані величина витрати, що проходить через розрахунковий створ, і відповідно глибина потоку наростає від нуля до максимального значення. Потім витрата та глибина поступово спадають знову до нуля.

Отвір штучної споруди менший за ширину потоку, що веде до утворення підпору перед спорудою, а в самій споруді зростає швидкість течії. Таким чином, при пропуску паводків малими мостами частина води, що притікає, затримується перед земляним полотном автомобільної дороги. У ряді випадків обсяг тимчасово накопиченої води перед спорудою становить значну частину паводку, що може призвести до зменшення скидної витрати в отворі споруди порівняно з найбільшою витратою припливу води до мосту. Фактично явище акумуляції спостерігається завжди. Проте за великої тривалості паводку це впливає на величину скидної витрати.[8]

Облік акумуляції перед спорудженням при коротких паводках дає змогу зменшити розміри отвору споруди або знизити висоту насипу.

Ідея обліку акумуляції не використовувалася в практичних розрахунках через відсутність даних для побудови розрахункових гідрографів стоку, тобто припливу води до споруд. Роботи ряду дослідників (Д. І. Кочеріна, Ю. М. Даденкова, О. О. Рассказова) та вдосконалення норм стоку, які тепер дають можливість визначати не тільки максимальну витрату, а й об'єм притоку води до дороги, дозволяють у даний час проводити облік акумуляції води перед спорудою при коротких паводках шляхом застосування простих та зручних прийомів розрахунку.

Перелік посилань

1. Большаков В.О., Курганович О.О. Гідрологічні та гідравлічні розрахунки. Київ: 1983. 197-200с.
2. Даденков Ю.М. Гідравлічний розрахунок отворів малих мостів з урахуванням накопичення води перед спорудою. Праці Київського автомобільного дорожнього інституту. – М-во культури СРСР, Управління будівельних вузів. Київ: 1953. - 65-83с.
3. Курганович О.О., Лютик П.М. Гідрологічне обґрунтування проектування мостових переходів: навчальний посібник. Київ: КАДІ, 1977. - 130 с.

4. Большаков В.О., Курганович О.О. Розрахунок стоку та отворів малих мостів та гофрованих труб. Київ: 1966. 85-89с.
5. Большаков В.О. Збірник завдань з гідравліки. Київ 1979. 193-200с.
6. Хом'як Я. В. Гідравлічні розрахунки малих мостів і дорожніх труб. Київ. автомобільно-дорожній інститут, кафедра проектування доріг. 1961. 92 с.
7. Даденков Ю.М. Дослідження пропускання дощових вод малими мостами автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Київський політехнічний інститут. – Київ: 1952 - 26 с.
8. Даденков Ю.М. Встановлення графіків припливу води до споруди за даними спостережень за пропуском дощових вод малими мостами. Праці Київського автомобільного дорожнього інституту. – М-во культури СРСР, Головне управління гірничо-металургійних і будівельних вузів. Київ: 1955. 36. 2. 116-118с.

STUDY OF THE INFLUENCE OF HYDRAULIC FACTORS IN THE DESIGN OF SMALL BRIDGES TAKING INTO ACCOUNT ACCUMULATION

Petrovych Volodymyr V., postgraduate student of the Road Construction Materials and Chemistry Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: menor@ukr.net, tel.+380930932262, <https://orcid.org/0009-0002-1513-2789>.

Petrovych Ihor V., postgraduate student of the System Design of Transport Infrastructure and Geodesy Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: igor19932008@gmail.com, tel.+380663837188, <https://orcid.org/0009-0008-3551-3718>.

Savenko Sergey S., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: sava0304@gmail.com, тел.+380639570047, <https://orcid.org/0009-0007-2243-3471>.

Chechuha Yevhen S., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: Cecugazena2@gmail.com, tel.+3800937533521, <https://orcid.org/0009-0008-6799-4843>.

Yurchuk Vitaly V., postgraduate student of the International Transportation and Customs Control Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: urcukvitalij6@gmail.com, tel.+380966611626, <https://orcid.org/0009-0008-8596-5296>.

Summary. In a compressed state, the flow rate passing through the calculated section and, accordingly, the depth of the flow increases from zero to the maximum value. Then the flow rate and depth gradually decrease back to zero.

The opening of the artificial structure is smaller than the width of the flow, which leads to the formation of a backwater in front of the structure, and the flow velocity increases in the structure itself. Thus, when floods pass through small bridges, part of the inflowing water is retained in front of the earthen roadbed. In some cases, the volume of water temporarily accumulated in front of the structure constitutes a significant part of the flood, which can lead to a decrease in the discharge through the structure's opening compared to the maximum inflow to the bridge. In fact, the phenomenon of accumulation is always observed. However, during prolonged floods, this affects the discharge rate.

Accounting for accumulation before construction during short floods makes it possible to reduce the size of the structure's opening or lower the height of the embankment.

The idea of accounting for accumulation was not used in practical calculations due to the lack of data for constructing calculated hydrographs of runoff, i.e., water inflow to structures. The work of a number of researchers (D. I. Kocherina, Yu. N. Dadenkov, O. A. Rasskazov) and the improvement of runoff standards, which now make it possible to determine not only the maximum flow rate but also the volume of water inflow to the road, currently allow for the accounting of water accumulation in front of the structure during short floods by using simple and convenient calculation methods.

Keywords: artificial structures, accumulation, hydrograph, runoff volume, discharge rate, log forms.

References

1. Bolshakov V.O., Kurghanovich O.O. Hydrological and hydraulic calculations. Kyiv: 1983. 197-200
2. Dadenkov Yu.M. Hydraulic calculation of small bridge openings taking into account water accumulation in front of the structure. Works of the Kyiv Automobile Road Institute. – Ministry of Culture of the USSR, Department of Construction Universities. Kyiv: 1953. pp. 65–83.
3. Kurghanovich O.O., Lyutik P.M. Hydrological justification for the design of bridge crossings: a textbook. Kyiv: KADI, 1977. - 130 p.
4. Bolshakov V.O., Kurghanovich O.O. Calculation of flow and openings of small bridges and corrugated pipes. Kyiv: 1966. 85-89 p.
5. Bolshakov V.O. Collection of problems in hydraulics. Kyiv 1979. 193-200 p.
6. Khomyak Ya.V. Hydraulic calculations of small bridges and road pipes. Kyiv. Automobile Road Institute, Department of Road Design. 1961. 92 p.
7. Dadenkov Yu.M. Research on rainwater drainage through small bridges. Abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Kyiv Polytechnic Institute. – Kyiv: 1952. 26 pp.
8. Dadenkov Yu.M. Establishing schedules for water inflow to structures based on observations of rainwater drainage through small bridges. Works of the Kyiv Automobile Road Institute. – Ministry of Culture of the USSR, Main Directorate of Mining, Metallurgical, and Construction Universities. Kyiv: 1955. Collection 2. pp. 116-118.