

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ БЕЗНАПІРНИХ КАНАЛІВ ДОВІЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ ДЛЯ ВІДВЕДЕННЯ ДОЩОВИХ ВОД

Андрій Кравчук¹, Олександр Кравчук²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітрофлотський, м. Київ, Україна, 03037

¹докт. тех. наук, професор, kravchuk.am@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-8732-9244

²канд. тех. наук, доцент, kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-6578-8896

DOI:10.32347/2524-0021.2021.35.31-37

Анотація. В даній роботі на основі проведеного аналізу геометричних і гідравлічних характеристик перерізів безнапірних водовідвідних каналів розроблено рекомендації щодо розрахунку параметрів даних систем при довільній формі їх поперечного перерізу. При підготовці представленого матеріалу були використані елементи гідравлічного моделювання і аналогії. Розглянуті безнапірні канали знаходять широке застосування при проектуванні систем дощового водовідведення, а також можуть бути використані при розробці інших спеціальних водовідвідних мереж. В процесі написання даної статті використані загальновідомі теоретичні і емпіричні гідравлічні залежності, відповідні довідкові дані, зокрема, витратна і швидкісна характеристики, коефіцієнти місцевих опорів. Приведено необхідні відомості по підбору водовідвідних колодязів. Запропонована методика розрахунку параметрів водовідвідних каналів може бути застосована при різних режимах руху рідини: як безнапірному, так і напірному, усталеному і неусталеному. Вона рекомендується для застосування при проектуванні водовідвідних мереж незалежно від матеріалу трубопроводів.

Ключові слова: безнапірні канали довільного перерізу; відведення дощових вод; гідравлічний радіус; змочений периметр; площа живого перерізу.

ВСТУП

В останні роки в Україні активно відбувається збільшення кількості населення у великих містах і, відповідно, зростає площа міської забудови. Разом з тим, в українських містах все частіше можна спостерігати підтоплення урбанізованих територій внаслідок інтенсивних атмосферних опадів. Це можна пояснити низкою причин. По-перше, активна урбанізація супроводжується зростанням територій із водонепроникними покриттями, що спричиняє різке підвищення об'ємів дощового стоку [1,2]. По-друге, зменшенням пропускну здатності існуючих

мереж дощової каналізації внаслідок замулення, засмічення та зношеності колекторів [3], а також неналежної якості їх обслуговування. Окрім цього, однією з причин є глобальні зміни клімату в світі, що полягають, зокрема, у збільшенні інтенсивності опадів [4]. В Україні також майже на всій території відмічається збільшення повторюваності випадків сильних злив у XXI в порівнянні з попередніми десятиріччями [5], коли прокладались більшість існуючих мереж відведення дощових вод.

В зв'язку з цим, актуальним стає питання реконструкції існуючих та

прокладання нових мереж водовідведення дощових вод, які будуть відповідати теперішнім умовам.

Іншим напрямком вирішення даної проблеми є зменшення об'єму дощового стоку, який надходить у каналізаційну мережу. Цього можна досягти, зокрема, за рахунок використання водонепроникних удосконалених покриттів [6,7], а також

завдяки збереженню та розвитку зеленої інфраструктури міст [8,9].

На практиці при проектуванні водозбірних каналів для відведення дощових вод з забудованих територій використовують канали різної форми поперечного перерізу з різноманітних матеріалів (рис.1) [10].

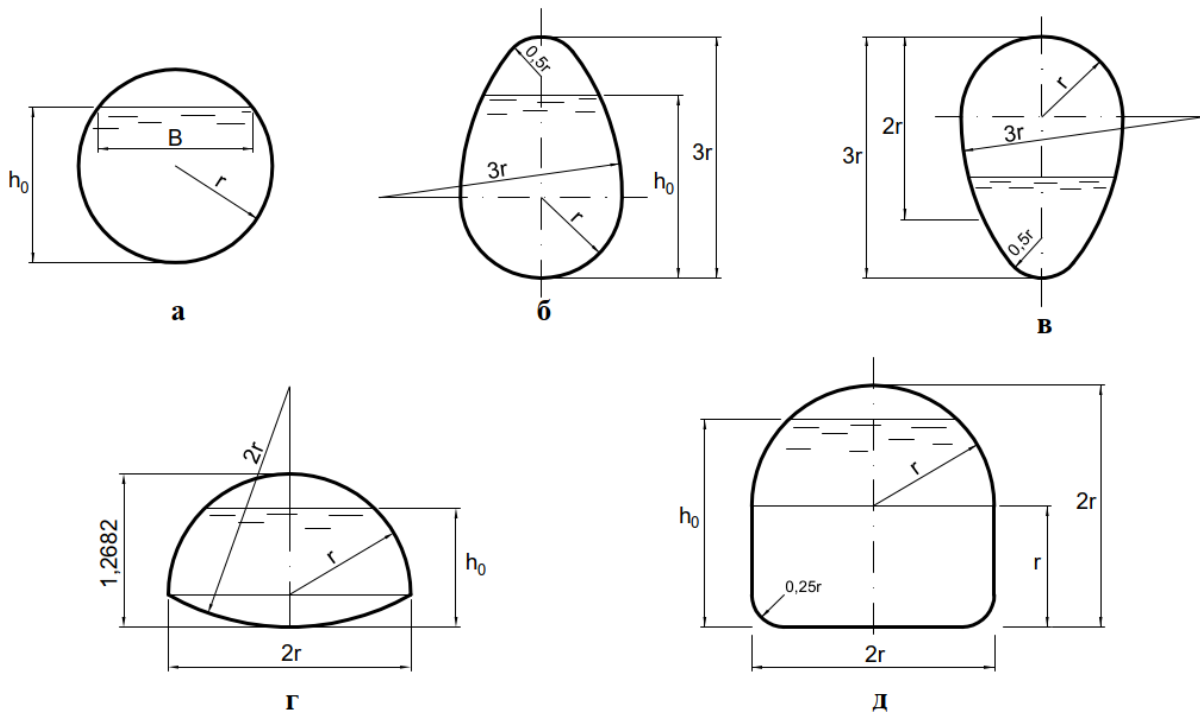


Рис. 1. Типові форми перерізів каналів водовідведення: **а** – круглий; **б** – зворотноовоїдальний; **в** – овоїдальний; **г** – лотковий; **д** – коритоподібний

Fig. 1. Typical cross-sectional shapes of water disposal channels: **a** – round; **b** – reverse ovoidal; **v** – ovoidal; **г** – tray; **д** – trough-shaped

Для каналів круглого поперечного перерізу методики їх гідравлічного розрахунку розроблені достатньо повно, складені і опубліковані спеціальні таблиці для визначення основних характеристик таких систем [11]. У випадку використання каналів некруглого перерізу аргументоване визначення гідравлічних характеристик потоку для кожного з них є окремою, достатньо складною задачею.

При цьому, незалежно від форми перерізу каналу, повинні забезпечуватися певні обов'язкові умови, до яких в першу чергу слід віднести: забезпечення мінімально і максимально допустимих швидкостей руху дощових вод в них;

недопущення прокладки трубопроводів менше мінімального похилу; оптимального наповнення перерізу каналу; застосування трубопроводів виготовлених з ефективного матеріалу (того що має мінімальну ефективну висоту виступів шорсткості стінок каналу).

МЕТА І МЕТОДИ

Метою даної роботи є розробка рекомендацій щодо визначення основних гідравлічних характеристик безнапірних каналів довільної форми перерізу для відведення дощових вод. Даний підхід базується на застосуванні методів

гідравлічної аналогії і моделювання безнапірних потоків.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Особливості руху води в каналах водовідведення

Представлені канали водовідведення некруглої форми перерізу можуть використовуватись в якості збірних систем для прийому дощових вод безпосередньо на облаштованій території майданчиків, а також для відведення і транспортування зібраної води до магістральних мереж або до місць їх обробки і очистки.

Рух дощових вод у водовідвідних лотках зазвичай відбувається у безнапірному (самопливному) режимі, який потребує прокладання лотків з певним додатнім похилом. Подальше транспортування зібраної води може здійснюватись як у безнапірному, так і в напірному режимі.

Рух води у збірних лотках і каналах зазвичай є нерівномірним, окрім цього він є рухом зі змінною витратою вздовж шляху [12,13]. На початкових ділянках каналу витрата мінімальна, за його довжиною вона збільшується і досягає максимального значення в кінцевих перерізах. В цілому у водовідвідних дощових мережах рух є також нерівномірним, оскільки у вони мають місцеві опори (повороти, приєднання, зміна діаметра, перепади та ін.). При скиді дощових вод в резервуар або водойму, в залежності від рівня води в останньому, у водовідвідному трубопроводі може встановлюватися крива підпорю або спаду.

Оскільки інтенсивність дощу може змінюватися з часом, в загальному випадку нерівномірний рух зі змінною витратою у збірних водовідвідних лотках є неусталеним. Це ж саме стосується і відвідних каналів. Однак, з метою спрощення розрахунків, а також зважаючи на відносно повільну зміну параметрів дощового потоку з часом, на окремих ділянках мережі рух розглядається усталеним.

Гідравлічний розрахунок мережі для відведення дощових вод

На основі проведеного аналізу існуючих методів розрахунку водовідвідних колекторів запропоновано методіку розрахунку геометричних і гідравлічних характеристик мережі відведення дощових вод для каналів різних форм поперечного перерізу.

При використанні для дощового водовідведення безнапірних каналів довільної форми поперечного перерізу справедливі співвідношення: витрата Q і швидкість V в довільному перерізі відкритого потоку розраховуються за формулою Шезі [14]:

$$Q = \omega \cdot C \sqrt{R \cdot i_{кан}}, = K \sqrt{i_{кан}}, \quad (1)$$

$$V = C \sqrt{R \cdot i_{кан}} = W \sqrt{i_{кан}}, \quad (2)$$

де ω – площа живого перерізу потоку у збірному лотку, м²; $R = \omega/\chi$ – гідравлічний радіус, м; χ – змочений периметр, м; C – коефіцієнт Шезі (швидкісний коефіцієнт); $i_{кан}$ – геометричний похил дна каналу.

При цьому витратна K і швидкісна W характеристики потоку визначаються за співвідношеннями:

$$K = \omega \cdot C \sqrt{R}, \quad (3)$$

$$W = C \sqrt{R}. \quad (4)$$

В приведених виразах для визначення коефіцієнта Шезі (C) використовується залежність, яка справедлива при турбулентному режимі руху рідини, що має місце в збірних каналах для прийому дощових вод

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda_{зб}}}, \quad (5)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²; $\lambda_{зб} = 1,3\lambda$ – гідравлічний коефіцієнт тертя при русі потоку з приєднанням рідини вздовж шляху [15]; λ – гідравлічний коефіцієнт тертя, який при розвиненому турбулентному русі можна розраховувати за формулою Шифринсона [14]

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{екв}}{D_{екв}} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

тут $\Delta_{екв}$ – еквівалентна шорсткість стінок каналу, мм; $D_{екв}$ – еквівалентний діаметр каналу, мм.

Оскільки форма поперечного перерізу аналів водозбірних лотків, що розглядаються, має певні особливості, математично описати її параметри в загальному випадку досить складно.

При виконанні розрахунків попередньо необхідно провести вимірювання основних геометричних характеристик перерізів каналів різного діаметра і форми при всіх можливих його наповненнях $\Delta = h/H$ (h – глибина потоку води в каналі, H – висота стінок каналу); b – ширина вільної поверхні рідини; χ – змочений периметр. При цьому розраховувались: ω – площа перерізу потоку; R – гідравлічний радіус, $\lambda_{зб}$ – гідравлічний коефіцієнт тертя для даного випадку; C – коефіцієнт Шезі; W – швидкісна характеристика; K – витратна характеристика.

За визначеними значеннями вказаних параметрів за формулами (1–6) розраховуються необхідні характеристики потоку для всіх зазначених перерізів водовідвідного каналу, а саме Q , V , Δ , i . Отримані величини для зручності використання, як правило, представляються в табличній формі.

При проектуванні даних каналів обов'язково необхідно враховувати наявність місцевих опорів (поворот каналу, приєднання або від'єднання бічних каналів, наявність різних перегородок та ін.), які викликають виникнення підпорів, що призводить до зменшення швидкості руху стічних вод. При виникненні підпорів можливе випадіння різного роду забруднень і швидке замулення каналів. Найбільше зниження швидкості відбувається на ділянках перед поворотом і перед приєднанням потоку.

Для того, щоб підпор не виникав перед місцевим опором, необхідно забезпечити в лотках самопливної мережі додаткове падіння, яке повинно дорівнювати втратам напору в місцевому опорі і визначається за формулою

$$h_{,м} = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (7)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору, віднесений до середньої швидкості потоку до або після опору.

За даними Н.Ф. Федорова [16] значення коефіцієнта місцевого опору залежить від геометричних розмірів живого перерізу потоку і числа Фруда.

Для приблизних розрахунків можуть бути прийняті наступні коефіцієнти опору: в поворотному колодязі при куті повороту 90^0 в залежності від діаметра труби (табл. 1):

Табл. 1.
Table 1.

D_{mp} , мм	200-500	600-800	900-1000
ζ	1,2	1,5	2,0

Те ж саме при куті повороту $45-90^0$ (для всіх діаметрів труб) 0,8–1,0.

При приєднанні притоку до основного колектора під кутом 45^0 в залежності від співвідношення $Q_{np}/Q_{сум}$ (де Q_{np} – приєднана витрата, $Q_{сум}$ – сумарна витрата рідини) і діаметра трубопроводу, коефіцієнт опору ζ можна визначати за табл. 2.

Табл. 2.
Table 2.

D , мм	Значення ζ при $Q_{np}/Q_{сум}$				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
До 300	0,6	1,0	1,2	1,3	1,5
Більше 300	0,3	0,5	0,65	0,8	1,0

Те ж саме під кутом 90^0 – за табл. 3.

Табл. 3.
Table 3.

D , мм	Значення ζ при $Q_{np}/Q_{сум}$				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
До 300	0,9	1,5	1,7	1,9	2,1
Більше 300	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5

Вхід в канал:
при гострих вхідних кромках (бічне сти-
снення).....0,4;
при плавному вході.....0,1.
Плавне розширення
каналу ($\omega_2 > \omega_1$)..... $(\omega_2/\omega_1 - 1)^2$.
Плавне звуження каналу ($\omega_2 < \omega_1$)....0,1.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В даній роботі представлено методику визначення основних геометричних і гідравлічних характеристик безнапірних каналів для відведення дощових вод при довільній формі їх поперечного перерізу. Дана методика рекомендується до використання при проектуванні нових і реконструкції існуючих водовідвідних каналів складної геометричної форми поперечного перерізу.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Bonneau J., Fletcher T. D., Costelloe J. F., Burns M. J.** Stormwater infiltration and the “urban karst” – A review. *Journal of Hydrology*, 2017, 552. P. 141-150. doi: [10.1016/j.jhydrol.2017.06.043](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.043)
2. **Markovič G., Zeleňáková M., Káposztásová D., Hudáková G.** Rainwater infiltration in the urban areas // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2014. 181. P. 313-320. doi: [10.2495/EID140271](https://doi.org/10.2495/EID140271)
3. **Ткачук О. А., Сальчук В. Л., Олексіюк О. В.** Оцінка причин затоплення каналізованих міських територій дощовими водами // *Вісник НУВГП*. 2014. 1(65). С. 344-350.
4. **Willems P., Arnbjerg-Nielsen K., Olsson J., Nguyen V. T. V.** Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings // *Atmospheric Research*. 2012. 103. P. 106-118. doi: [10.1016/j.atmosres.2011.04.003](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.003)
5. **Гребенюк Н. П.** Характеристика повторюваності сильних злив на території України в умовах сучасних змін клімату // *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2014. 1(32). С. 96-101.
6. **Drake J., Bradford A., Van Seters T.** Stormwater quality of spring–summer–fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement // *Journal of Environmental Management*. 2014. 39. P. 69-79. doi: [10.1016/j.jenvman.2013.11.056](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.056)
7. **Жук В. М., Качмар І. З., Фасуляк В. Є.** Експериментальне дослідження стоку з водопроникного бетонного покриття для високоінтенсивних дощів малої тривалості // *Науковий вісник НЛТУ України*, 2019, т. 29, 9. С. 132-135. doi: [10.36930/40290923](https://doi.org/10.36930/40290923)
8. **Kim H., Lee D.-K., Sung S.** Effect of Urban Green Spaces and Flooded Area Type on Flooding Probability // *Sustainability*. 2016. 8. 134. doi: [10.3390/su8020134](https://doi.org/10.3390/su8020134)
9. **Жидкова Т. В., Чепурна С. М., Белозьоров О. С.** Пропозиції щодо зменшення наслідків зливових дощів на міських територіях // *Комунальне господарство міст*. 2019. Т. 1, 147. С. 269-273. doi: [10.33042/2522-1809-2019-1-147-269-273](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-1-147-269-273)
10. **Кравчук А. М., Кравчук О. А.** Спеціальні питання гідравліки систем водопостачання і водовідведення: Навч. посібник. Київ: КНУБА, 2020. 175 с.
11. **Константинов Ю. М., Василенко А. А., Сапухин А. А. Батченко Б. Ф.** Гидравлический расчет сетей водоотведения: Расчетные таблицы. Киев: Будівельник, 1987. 120 с.
12. **Kravchuk A., Kochetov G., Kravchuk O.** Improving the calculation of collecting perforated pipelines for water treatment structures // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, 10(108). P. 23-28. doi: [10.15587/1729-4061.2020.216366](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216366)
13. **Кравчук А. М., Кочетов Г. М., Кравчук О. А.** Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2020. Вип. 33. С. 34-40. doi: [10.32347/2524-0021.2020.33.34-40](https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40)
14. **Большаков В. А., Константинов Ю. М., Попов В. Н., Даденков В. Ю.** Справочник по гидравлике. Киев: Вища школа, 1977. 280 с.
15. **Кравчук А. М., Кравчук О. Я.** Аналіз кінематичних характеристик збірних перфорованих трубопроводів // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2016. Вип. 26. С. 152-160.
16. **Курганов А. М., Федоров Н. Ф.** Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Ленинград: Стройиздат, 1978. 424 с.

REFERENCES

1. **Bonneau, J., Fletcher, T. D., Costelloe, J. F. & Burns, M. J. (2017).** Stormwater infiltration and the “urban karst” – A review. *Journal of Hydrology*, 552, 141-150. doi: [10.1016/j.jhydrol.2017.06.043](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.043)
2. **Markovič, G., Zelenáková, M., Káposztásová, D. & Hudáková, G. (2014).** Rainwater infiltration in the urban areas. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 181, 313-320. doi: [10.2495/EID140271](https://doi.org/10.2495/EID140271)
3. **Tkachuk, O. A., Salchuk, V. L. & Oleksiyuk, O. V. (2014).** Assessing causes flooding of urban areas canalized rain water. *Bulletin of NUVGP*, 1(65), 344-350. [in Ukrainian]
4. **Willems, P., Arnbjerg-Nielsen, K., Olsson, J. & Nguyen, V. T. V. (2012).** Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, 103, 106-118. doi: [10.1016/j.atmosres.2011.04.003](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.003)
5. **Grebenyuk, N. P. (2014).** Characteristics of repetition of heavy thundershowers on the territory of Ukraine in conditions of modern climate changes. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1(32), 96-101. [in Ukrainian]
6. **Drake, J., Bradford, A. & Van Seters, T. (2014).** Stormwater quality of spring–summer–fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement. *Journal of Environmental Management*, 139, 69-79. doi: [10.1016/j.jenvman.2013.11.056](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.056)
7. **Zhuk, V. M., Kachmar, I. Z., & Fasuliak, V. Ye. (2019).** Experimental study of the outflow from a pervious concrete system for short-term rainfalls of high intensity. *Scientific Bulletin of UNFU*, Vol. 29(9), 132-135. [in Ukrainian] doi: [10.36930/40290923](https://doi.org/10.36930/40290923)
8. **Kim, H., Lee, D.-K. & Sung, S. (2016).** Effect of Urban Green Spaces and Flooded Area Type on Flooding Probability. *Sustainability*, 8(2), 134. doi: [10.3390/su8020134](https://doi.org/10.3390/su8020134)
9. **Zhydkova, T. V., Chepurna, S. N. & Belozarov, O. S. (2019).** Propositions about reducing stormwater in urban areas. *Municipal economy of cities*, 1(147), 269-273. [in Ukrainian] doi: [10.33042/2522-1809-2019-1-147-269-273](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-1-147-269-273)
10. **Kravchuk, A. M. & Kravchuk, O. A. (2020).** *Special issues of hydraulics of water supply and water sewerage systems: Tutorial*. Kyiv, Ukraine: KNUCA, 175. [in Ukrainian]
11. **Konstantinov, Yu. M., Vasilenko, A. A., Sapuhin, A. A. & Batchenko, B. F. (1987).** *Hydraulic calculation of water sewerage networks: Calculation tables*. Kiev, Ukraine: Budivelnik, 120. [in Russian]
12. **Kravchuk, A., Kochetov, G. & Kravchuk, O. (2020).** Improving the calculation of collecting perforated pipelines for water treatment structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, 10(108), 23-28. doi: [10.15587/1729-4061.2020.216366](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216366)
13. **Kravchuk, A., Kochetov, G. & Kravchuk, O. (2020).** Pipelines designing for steady water collection along the path. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 33, 34-40. [in Ukrainian] doi: [10.32347/2524-0021.2020.33.34-40](https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40)
14. **Bolshakov, V. A., Konstantinov, Yu. M., Popov, V. N., & Dadenkov, V. Yu. (1997).** *Hydraulics handbook*. Kiev, Ukraine: Vysha Shkola, 280. [in Russian]
15. **Kravchuk, A. M. & Kravchuk, O. Y. (2016).** Analysis of kinematic characteristics of collecting perforated pipelines. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 26, 152-160. [in Ukrainian]
16. **Kurganov, A. M. & Fedorov, N. F. (1978).** *Handbook on hydraulic calculations of water supply and sewerage systems*. Leningrad, USSA: Stroyizdat, 424. [in Russian]

Recommendations for parameters calculation of pressureless channels with arbitrary cross section for rainwater disposal

Andriy Kravchuk, Oleksandr Kravchuk

Abstract. Based on the analysis of geometric and hydraulic characteristics of pressureless water channels cross sections, recommendations for parameters calculation of these systems with an arbitrary shape of their cross section were elaborated in this article. Elements of hydraulic modeling and analogy were used in the preparation of the presented material. The considered pressureless channels are widely used in rainwater disposal systems designing and can also be used in the designing of other special water disposal networks. Well-known theoretical and empirical hydraulic dependences, relevant reference data, in particular, discharge and velocity characteristics, local resistance coefficients were used in this article. Necessary information on selection of water disposal wells is given. The proposed method of calculation the parameters of water disposal channels can be used in different fluid flow modes: both pressureless and pressure, steady and unsteady. It is recommended for use in the water disposal networks designing, regardless of the pipelines material.

Key words: pressureless channels with arbitrary cross section; rainwater disposal; hydraulic radius; wetted perimeter; cross section area.

Стаття надійшла до редакції 31.03.2021