

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРЕУГОЛЬНОГО ВОДОСЛИВА ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КАНАЛИЗАЦИИ, РАБОТАЮЩЕЙ С «ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКОЙ»*

ASSESSMENT OF THE CAPACITY OF A TRIANGULAR SPILLWAY FOR REGULATING AN AIR CUSHION SEWERAGE SYSTEM

Выполнено исследование пропускной способности треугольного водослива для стравливания избытков воздушной среды в системе канализации, работающей с «воздушной подушкой». Для оценки высоты воздушного потока в зависимости от расхода воздуха и угла треугольного водослива выполнялся лабораторный эксперимент. Получены закономерности, отражающие увеличение пропускной способности водослива по мере роста высоты воздушного потока и угла при вершине водослива. Результаты качественно соотносились с ранее полученными модельными расчетами. Используя уравнение Бернулли и данные эксперимента, было уточнено значение коэффициента сжатия ϵ воздушного потока, проникающего в водную среду. Для расходов от 0,01 до 1,4 л/с величина коэффициента варьировалась в диапазоне от 0,04 до 0,193.

Ключевые слова: треугольный водослив, пропускная способность, затопленная струя, воздушная подушка, канализация, коллектор.

There has been carried out a study of the throughput capacity of a triangular spillway for venting excess air in a sewerage system operating with an «air cushion». A laboratory experiment was performed to estimate the height of the air flow depending on the air flow rate and the angle of the triangular spillway. Patterns have been obtained reflecting an increase in the flow capacity of the spillway as the height of the air flow and the angle at the top of the spillway increase. The results correlated qualitatively with the previously obtained model calculations. Using the Bernoulli equation and experimental data, the value of the compression coefficient ϵ of the air flow penetrating into the aqueous medium was clarified. For flow rates from 0,01 to 1,4 l/s, the coefficient value varied in the range from 0,04 to 0,193.

Keywords: triangular spillway, spillway capacity, submerged jet, air cushion, sewer, collector.

Введение

Система канализации играет важную роль в развитии крупных городов, обеспечивая санитарную и экологическую безопасность городской среды и создавая комфортные условия жизни. Осуществляя основную функцию транспортировки загрязненных сточных вод, система сталкивается с такими проблемами, как заиливание лотка трубопроводов, а также

бесконтрольное выделение канализационных газов, которые скапливаются в подсводном пространстве коллекторов и, попадая на улицы, оказывают негативное воздействие на горожан [1]. Безусловно, подобные процессы оказывают большое влияние на безопасность, надежность и энергоэффективность систем водоотведения и требуют пристального внимания еще на этапе проектирования.

На сегодняшний день достаточно высоко развиты технологии промывки канали-

* Статья публикуется по результатам исполнения гранта СПбГАСУ 2024 года.

зационных коллекторов как передвижным оборудованием [2], так и стационарными устройствами, устанавливаемыми в смотровых колодцах или шахтах [3]. Для удаления токсичных газов применяется технология принудительного вентилирования воздушного пространства крупных коллекторов с последующей очисткой загрязненного воздуха на локальных установках газоочистки [4]. Также постоянно развиваются и совершенствуются сами технологии очистки и нейтрализации вредных газовых примесей, поступающих в воздух в результате турбулизации стоков и массообмена [5, 6].

Большой интерес вызывает технология функционирования системы канализации с «воздушной подушкой», которая сочетает в себе возможности управления вышеуказанными процессами и достаточно проста в эксплуатации. Данная технология достаточно молода, хотя примеры ее применения встречаются и в средние века в системах подачи воздуха. Сегодня встречаются примеры практического применения эффекта «воздушной подушки» в Германии в канализационных дюкерах. Наибольшее по габаритам сооружение находится в Дрездене, имеет длину $L = 600$ м и диаметр трубопровода $D = 2400$ мм. Пропускная способность дюкера составляет $8,8 \text{ м}^3/\text{с}$, а избыточное давление воздуха достигает величины $1,8$ бар [7]. Нагнетание воздуха и формирование воздушной подушки могут осуществляться принудительно компрессором или с помощью увлекающей способности потока сточных вод на трубчатых перепадах [8–10]. Отжатие потока воды позволяет повышать скорость течения и производить промывку коллектора, а наличие избыточного давления обеспечивает централизованное удаление загрязненного потока воздуха на газоочистные установки. Для снижения давления в воздушной подушке может быть использована задвижка или регулирующий клапан. Подобная технология может применяться для участков маги-

стральной канализационной сети, имеющей конфигурацию дюкера [11], что позволит исключить использование насосной станции и повысить энергоэффективность системы. Для регулирования «воздушной подушки» авторами предлагается использование затопленного треугольного водослива, исследованию пропускной способности которого посвящается данная работа.

Среди современных научных статей встречается достаточно много работ, посвященных вопросам исследования барботирования водной среды воздухом. Интерес вызывает работа [12], в которой описано экспериментальное исследование условий формирования воздушной струи в различных жидкостях, в том числе и в воде. Экспериментом доказана прямая зависимость возникновения струи и ее длины от расхода воздуха, размера сопла и вида жидкой среды. В работе [13] разработана CFD-модель подводной воздушной струи, в которой размеры расчетной области модели соответствовали размерам экспериментальной установки. При моделировании произведена оценка средней скорости струи на оси, ее диаметра и объемной доли воздуха в расчетной области при постоянном расходе воздуха. В ходе моделирования показано влияние высоты столба воды на скорость воздушной струи в области границы раздела фаз. С увеличением столба воды фиксировалось снижение скорости движения воды. В работах [14, 15] выполнено исследование пульсации давления и скорости воздушного потока в затопленной струе. Авторы отмечают снижение скорости струи за счет роста давления при контакте воздуха с водной средой. В работе [16] исследовано влияние диаметра сопла и скорости воздушного потока на траекторию струи и структуру межфазной границы.

В настоящей работе важным фактором, оказывающим влияние на истечение воздушной среды, является наличие градиента давления от столба воды в сечении водосли-

ва. Для изучения пропускной способности треугольного водослива в работе проводился лабораторный эксперимент.

Методы

Для имитирования работы узла регулирования «воздушной подушки» [17] использовалась лабораторная установка (рис. 1). Установка представляла двухсекционный резервуар, выполненный из оргстекла с толщиной стенки 5 мм. Секция «А» была сверху закрытой и не имела прямого сообщения с атмосферой. Секция «В», напротив, была открытой с целью дальнейшего отведения подаваемого в установку воздуха. Для подачи воздуха использовался компрессор с ресивером, от которого по силиконовым пневмошлангам диаметром $d = 4$ мм, 8 мм воздух сначала поступал в ротаметр, а затем в подводное пространство секции «А» резервуара. В стенке между секциями (толщиной 5 мм) резервуара выполнялось крепление накладной пластины с треугольным водосливом. В работе использовалось 4 варианта водослива с различным углом на вершине треугольника α : 30, 60, 90 и 120°.

Измерение уровня воды в резервуаре выполнялось с помощью линейки, имеющей цену деления 1 мм. Эксперимент предполагал измерение высоты воздушного потока на водосливе для диапазона расходов воздуха от 3 до 5 м³/час, с шагом 0,5 м³/час. Температура окружающего воздуха составляла 25 °С.

С целью оценки влияния подпора H_2 на пропускную способность водослива проводилась серия сравнительных экспериментов для двух диапазонов: 15–16 см и 37–38 см. Диапазоны указаны с учетом изменяющейся высоты воздушного потока на водосливе. Результаты измерения высоты воздушного потока на водосливе для обоих вариантов показали достаточно близкие значения. Глубокие исследования в этом направлении в данной работе не проводились, однако результаты работ других авторов свидетельствуют о влиянии значительных глубин на характеристики подводной струи, поэтому в дальнейшем необходимо оценить работу водослива при значениях напора, близких к условиям эксплуатации канализационной

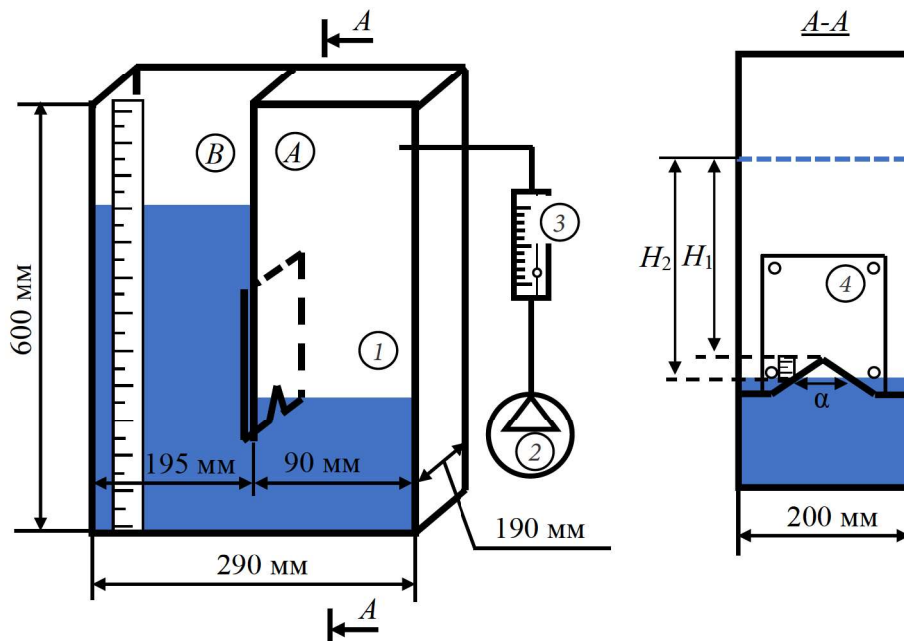


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 — двухсекционный резервуар; 2 — компрессор; 3 — ротаметр; 4 — съемная пластина с треугольным водосливом с различными углами

системы. Дальнейшие эксперименты проводились для диапазона 37–38 см.

В начальный момент времени резервуар заполнялся водой на высоту 40 см. Далее с помощью компрессора осуществлялась подача воздуха в секцию «А» (рис. 2). За счет формирования «воздушной подушки» происходило отжатие и выдавливание воды в секцию «В».

В момент достижения уровнем воды в секции «А» вершины водослива происходило формирование затопленной воздушной струи, высота которой $h = H_2 - H_1$ возрастала по мере увеличения расхода воздуха. Избыточное давление воздуха в секции «А» равнялось величине $\rho_{\text{в}} g H_2$. Поступление воздушной среды в секцию «В» осуществлялось за счет разницы напоров ($H_2 - H_1$).

Пропускную способность треугольного водослива можно оценить с помощью уравнения Бернулли для изотермического процесса ($T = \text{const}$). Для этого выберем сечение

внутри сосуда (А–А), где скорость газа может быть принята равной нулю, и сечение (В–В), находящееся в плоскости водослива и совпадающее с границей раздела фаз (рис. 3). Потери напора будут включать потерю на сжатие потока в отверстии водослива и потерю на гидравлическое сопротивление при входе газового потока в воду. Пренебрегая разностью отметок, запишем зависимость для расхода воздуха:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\omega}{\omega_0}; \\ \varphi &= \frac{1}{\sqrt{(1 + \zeta_{\text{отв}} + \zeta_{\text{вых}})}}; \\ Q &= \underbrace{\varphi \varepsilon}_{\mu} \omega_0 \sqrt{2RT \ln \left(\frac{P_A}{P_B} \right)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для учета разницы давлений между вершиной водослива и уровнем отжатия рассмотрим элементарную площадку в треугольном отверстии (см. рис. 3), которая располагается на глубине Z относительно уровня воды в секции «В».

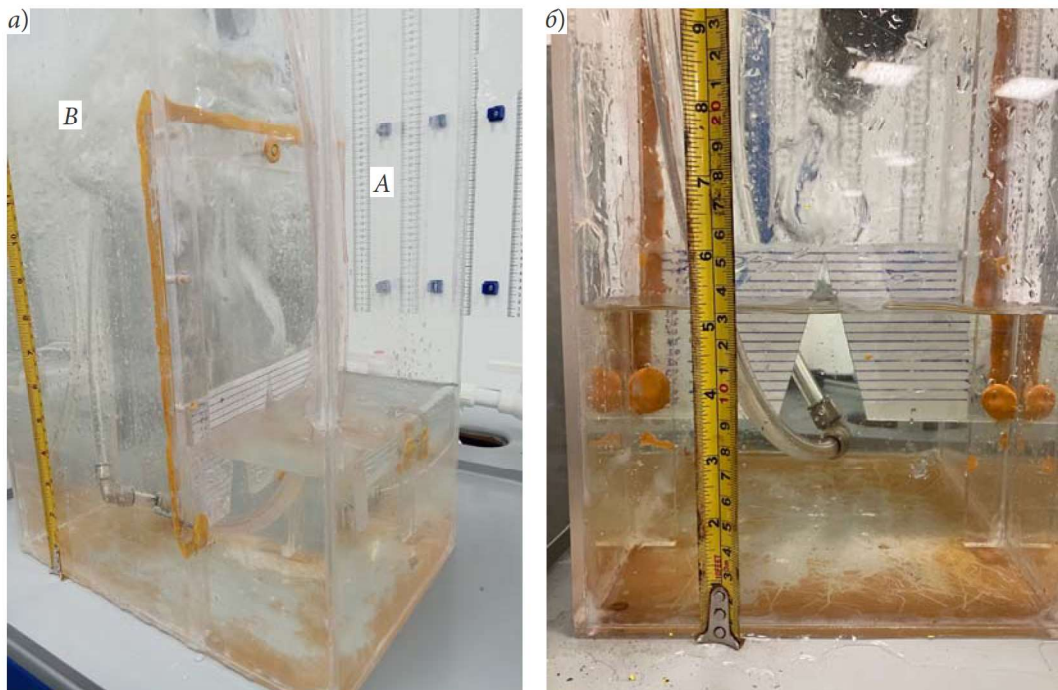


Рис. 2. Стравливание воздуха из «воздушной подушки» с помощью затопленного треугольного водослива: а — формирование воздушной подушки в секции А; б — воздушный поток на треугольном водосливе

Заменяя давление в формуле (1) на величину напора, запишем выражение для расхода воздуха через малую площадку:

$$dQ = \mu b_z \sqrt{2RT \ln\left(\frac{H_2}{Z}\right)} dz, \quad (2)$$

где z является величиной переменного напора над центром элементарной площадки.

Для определения полного расхода воздуха на треугольном водосливе, подставляя функцию $bz = f(z)$ и выполняя интегрирование, получаем:

$$Q = \mu 2tg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{2RT} \int_{H_1}^{H_2} (z - H_1) \sqrt{\ln\left(\frac{H_2}{Z}\right)} dz, \quad (3)$$

где коэффициент расхода μ учитывает процесс проникновения воздуха в водную среду. Коэффициент μ сочетает в себе как гидравлическое сопротивление, так и процесс сжатия воздушного потока. Коэффициент потери напора в отверстии водослива $\zeta_{отв}$, на основании справочных данных², можно принять равным 0,06. Коэффициент потери на-

пора при выходе воздушного потока в водную среду $\zeta_{вых}$ зависит от степени турбулентности. В выполненных экспериментах критерий Рейнольдса варьировался в диапазоне $Re\ 10^3 < Re < 10^5$. Согласно работе [18], величина коэффициента $\zeta_{вых}$ попадала в диапазон 0,4–0,6. Сжатие потока характеризуется отношением площади живого сечения потока, попадающего в водную среду ω_0 , к площади живого сечения отверстия водослива ω . Это соотношение может быть уточнено на основании экспериментальных данных.

Результаты и обсуждение

Для более полного отражения зависимости пропускной способности водослива от высоты воздушного потока h на график были совместно вынесены модельные и экспериментальные данные (рис. 4). Модельные данные были получены ранее в ходе моделирования процесса в ANSYS CFX в работе [17] для водослива с углом на вершине 90° . Как видно на рис. 4, модельные и экспериментальные данные хорошо согласуются и ложатся на функцию параболы.

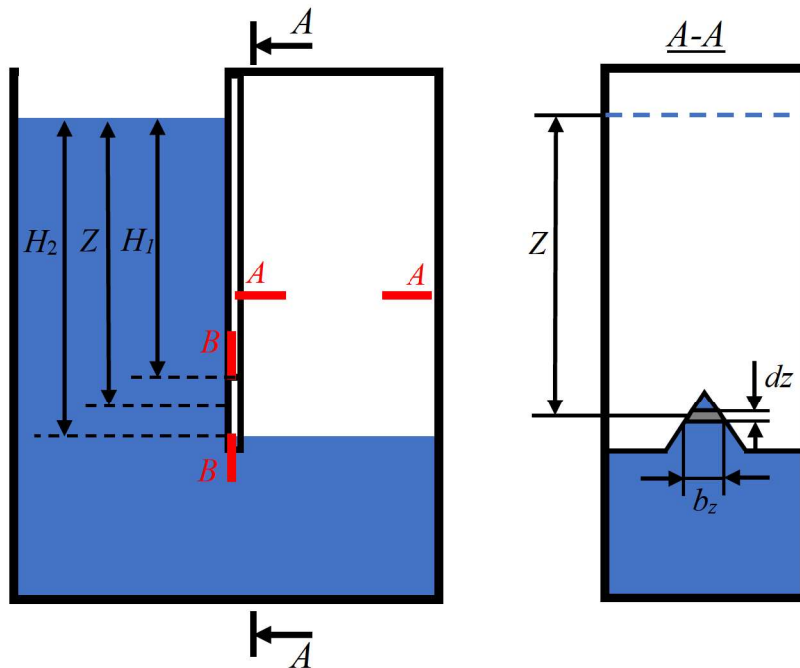


Рис. 3. Расчетная схема

² Справочник по гидравлике / под ред. В. А. Большакова. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Вища шк.: Головное изд-во, 1984. 343 с.

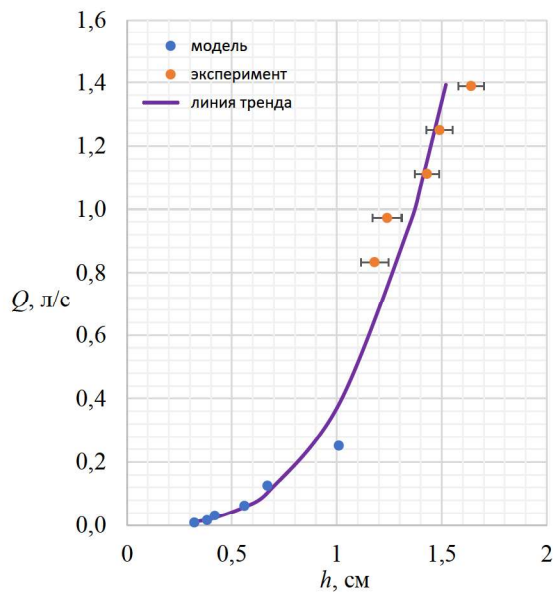


Рис. 4. График зависимости расхода воздуха от высоты воздушного потока на водосливе с углом 90°

По мере увеличения высоты воздушного потока возрастала пропускная способность водослива, что качественно соответствовало ожиданиям. Средняя скорость воздушного потока в сечении водослива определялась расчетом, который зависел от площади отверстия водослива, и возрастала по мере роста высоты потока, однако после значения $h = 1,18$ см наблюдалось снижение и незначительное колебание в диапазоне от 5 до 6 м/с.

На рис. 5 показаны графики зависимости расхода воздуха от высоты потока h и угла треугольного водослива. По мере увеличения угла возрастает пропускная способность водослива. Наибольший расход воздуха при одинаковой высоте потока наблюдается у водослива с углом в 120° .

Далее с помощью зависимости (3) и экспериментальных данных были вычислены значения коэффициента сжатия воздушного потока ϵ . Значение коэффициента попало в диапазон от 0,04 до 0,193 для диапазона расхода воздуха от 0,01 до 1,4 л/с. Руководствуясь значением коэффициента ϵ , была вычислена площадь сжатого потока воздуха.

На рис. 6 показана зависимость площади сжатого потока от расхода и угла водослива с учетом результатов модельных расчетов [17]. На всех конфигурациях водослива наблюдается закономерность роста площади сечения сжатого потока по мере увеличения расхода.

Выводы

С целью регулирования уровня воды и скорости течения сточных вод в системе магистральной канализации для обеспечения промывки участков сети и централизованного отведения загрязненного воздуха в условиях городской среды предлагается применение узлов регулирования, осуществляющих отвод избытков газовой воздушной среды из-под сводной части коллектора с помощью щита с треугольным водосливом. В работе проведен эксперимент, который позволил оценить пропускную способность в зависимости от угла треугольного водослива и высоты воздушного потока.

Для расчета пропускной способности треугольного водослива предложено уравнение Бернулли для изотермического процесса, адаптированное под условия треугольного водослива, когда давление в принимающей среде изменяется по высоте потока. На основании экспериментальных данных произведен расчет коэффициента сжатия воздушного потока ϵ , значение которого попало в диапазон от 0,04 до 0,193. Также произведена оценка площади сечения воздушного потока, проникающего в водную среду. Используя расчетное значение коэффициента сжатия, можно применить предложенную формулу для расчета пропускной способности треугольного водослива. В дальнейшем исследовании необходимо произвести оценку работы водослива для больших значений расхода воздуха и подпора водной среды с помощью моделирования.

Полученные результаты могут быть использованы в инженерной практике при проектировании узла регулирования «воздушной подушки». Развитие данной техно-

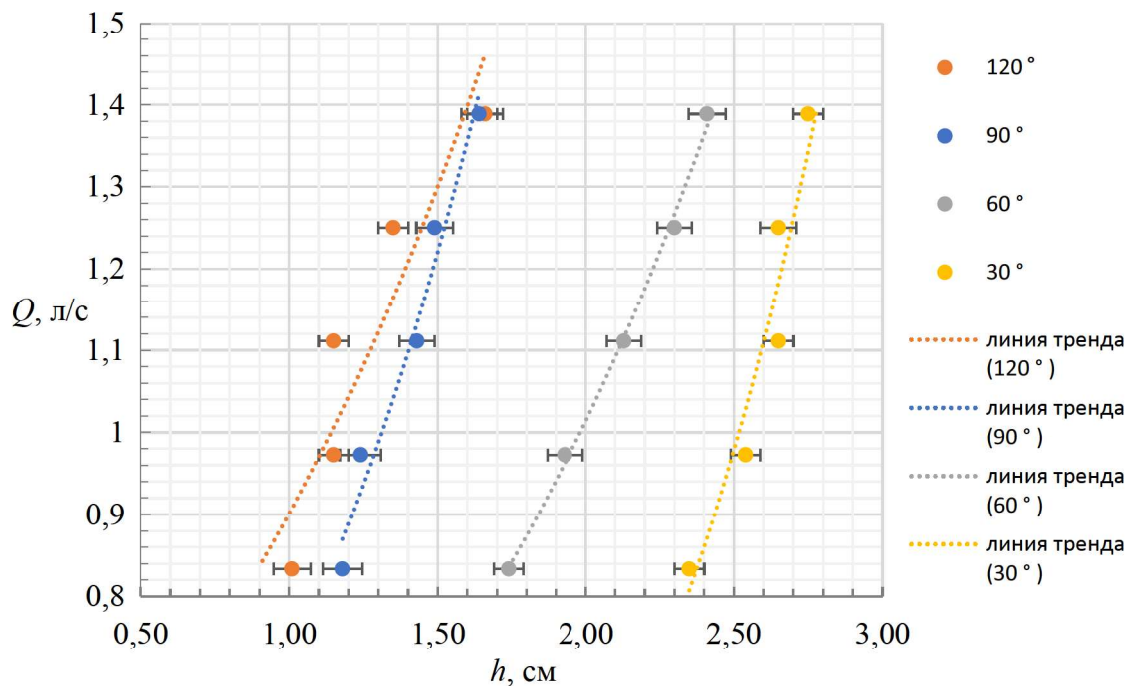


Рис. 5. График зависимости расхода воздуха от высоты потока и угла треугольного водослива

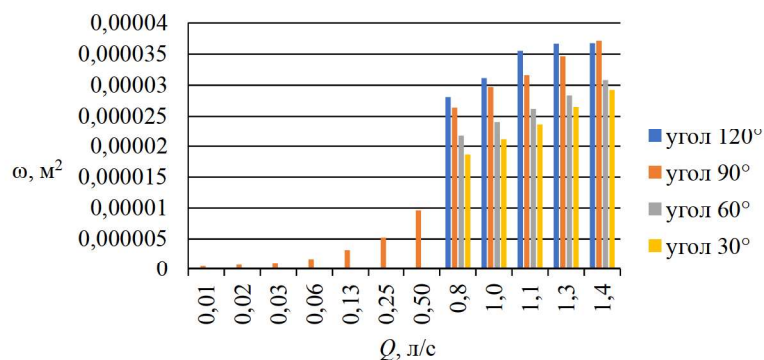


Рис. 6. Зависимость площади сечения воздушного потока от расхода воздушного потока

логии позволит повысить надежность, а также экологическую и санитарную безопасность системы канализации города.

Библиографический список

1. Orlov V., Zotkin S. Formation of harmful volatile substances in sewage systems and their neutralization // E3S Web of Conferences 263, 04003 (2021) FORM-2021. DOI 10.1051/e3sconf/202126304003
2. Kamali M., Pirouz M., Ghobadian M., Tashayoe H. R. Investigation of Capabilities and Limitations of Different Cleaning Methods for Sewer Lines // Journal of Water and Sustainable Development. 2017. Vol. 3, no. 2. Pp. 43–54.
3. Shirazi R., Willems P., Berlamont J. Application of Flushing Tanks in Simple Sewer Networks for In-Sewer Sediment Erosion and Transport // Journal of Water Management Modeling. 2010. R236-07. Pp. 85–106. DOI 10.14796/JWMM.R236-07.
4. Brocard D., McMasters F., Thomas D. Air Flow in Sewers. Proceedings of the Water Environment Federation // 2012 (16). Pp. 949–955. DOI 10.2175/19386471281174149
5. Camarillo M. K., Stringfellow W. T., Hanlon J. S., Basha E. Performance of sanitary sewer collection system odour control devices operating in diverse conditions // Water

Science & Technology. 2013. № 39 (04). Pp. 2527–2533. DOI 10.2166/wst.2013.492

6. Чурикова В. И., Голованчиков А. Б., Чичерина Г. В. Исследование процесса массовыделения серы при электрохимическом окислении сероводорода // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. № 68 (12). С. 134–139.

7. Horlacher H.-B. Ulf Helbig Rohrleitungen 2 Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation // Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature. 2023. P. 1187. DOI 10.1007/978-3-662-60804-3

8. Ma Y., Rajaratnam N., David Z. Z. Air Entrainment in a Tall Plunging Flow Dropshaft // Journal of Hydraulic Engineering. 2016. 142(10):04016038:1-11.

9. Granata F., Marinis G. D., Hager W. Hydraulics of Circular Drop Manholes // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2011. 137:102-111.

10. Camino G. A., Zhu D. Z., Rajaratnam N. Flow Observations in Tall Plunging Flow Dropshafts // Journal of Hydraulic Engineering. 2015. Vol. 141. Iss. 1: 06014020:1-7.

11. Федоров С. В., Васильев В. М. Моделирование дюкера с воздушной подушкой // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 158–165.

12. Sultana R. S., Ashfaq M. A. Formation And Development Of Submerged Air Jets // Journal of Mechanical Engineering, Vol. ME 44, No. 2, December 2014 Transaction of the Mechanical Engineering Division, The Institution of Engineers, Bangladesh. Pp. 137–141. DOI 10.3329/jme.v44i2.21721

13. Nikolaos A. A., Panagiotis N. CFD analysis and comparison with experimental results of underwater vertical upward air and oil jets // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.). Vol. 9, no 5 (2015). DOI 10.15866/ireme.v9i5.6618

14. Yakovchuk M. S., Volkov K. N., Emelyanov V. N. Outflow of a supersonic gas jet into a liquid // APITECH-IV–2022. Journal of Physics: Conference Series. 2388 (2022) 012111. DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012111

15. Volkov K. N., Emelyanov V. N., Yakovchuk M. S. Competition between instability mechanisms of a supersonic overexpanded air jet as it flows into water // Technical Physics Letters. 2023. Vol. 49, No. 11. Pp. 25–27. DOI 10.61011/TPL.2023.11.57193.19706

16. Harby K., Chiva S., Muñoz-Cobo J. L. An experimental investigation on the characteristics of submerged horizontal gas jets in liquid ambient // Experimental Thermal and Fluid Science. 2014. № 53. Pp. 26–39. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.10.009>

17. Федоров С. В., Васильев В. М. Регулирование воздушной подушки на канализационной сети дюкерного типа // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 128–134.

18. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 296 с.

References

1. Orlov V., Zotkin S. Formation of harmful volatile substances in sewage systems and their neutralization. *E3S Web of Conferences* 263, 04003 (2021) FORM-2021. DOI 10.1051/e3sconf/202126304003

2. Kamali M., Pirouz M., Ghobadian M., Tashayoe H. R. Investigation of Capabilities and Limitations of Different Cleaning Methods for Sewer Lines. *Journal of Water and Sustainable Development*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 43–54.

3. Shirazi R., Willems P., Berlamont J. Application of Flushing Tanks in Simple Sewer Networks for In-Sewer Sediment Erosion and Transport. *Journal of Water Management Modeling*, 2010, R236-07, pp. 85–106. DOI 10.14796/JWMM.R236-07.

4. Brocard D., McMasters F., Thomas D. Air Flow in Sewers. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2012 (16), pp. 949–955. DOI: 10.2175/19386471281174149.

5. Camarillo M. K., Stringfellow W. T., Hanlon J. S., Basha E. Performance of sanitary sewer collection system odour control devices operating in diverse conditions. *Water Science & Technology*, 2013, no. 39 (04), pp. 2527–2533. DOI 10.2166/wst.2013.492.

6. Churikova V. I., Golovanchikov A. B., Chicherina G. V. *Issledovanie protsessa massovydeleniya sery pri elektrokhimicheskom okislenii serovodoroda* [Investigation of sulfur mass release process at electrochemical oxidation of hydrogen sulfide]. *Vestnik volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: construction and architecture*, 2015, no. 68 (12), pp. 134–139.

7. Horlacher H.-B. Ulf Helbig Rohrleitungen 2 Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation. Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature, 2023, p. 1187. DOI 10.1007/978-3-662-60804-3.

8. Ma Y., Rajaratnam N., David Z. Z. Air Entrainment in a Tall Plunging Flow Dropshaft. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 142 (10): 04016038: 1-11.

9. Granata F., Marinis G. D., Hager W. Hydraulics of Circular Drop Manholes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2011, 137:102-111.

10. Camino G. A., Zhu D. Z., Rajaratnam N. Flow Observations in Tall Plunging Flow Dropshafts. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, vol. 141, iss. 1: 06014020:1-7.

11. Fedorov S. V., Vasil'ev V. M. *Modelirovanie dyukera s vozduшной podushkoy* [Modeling of a culvert with an air cushion]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 2 (85), pp. 158–165.

12. Sultana R. S., Ashfaq M. A. Formation And Development Of Submerged Air Jets. *Journal of Mechanical Engineering*, vol. ME 44, no. 2, December 2014. Transaction of the Mechanical Engineering Division, Institution of Engineers, Bangladesh, pp. 137–141. DOI 10.3329/jme.v44i2.21721.
13. Nikolaos A. A., Panagiotis N. CFD analysis and comparison with experimental results of underwater vertical upward air and oil jets. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, vol. 9, no. 5 (2015). DOI 10.15866/ireme.v9i5.6618
14. Yakovchuk M. S., Volkov K. N., Emelyanov V. N. Outflow of a supersonic gas jet into a liquid. *APITECH-IV – 2022. Journal of Physics: Conference Series*, 2388 (2022) 012111. DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012111.
15. Volkov K. N., Emelyanov V. N., Yakovchuk M. S. Competition between instability mechanisms of a supersonic over expanded air jet as it flows into water. *Technical Physics Letters*, 2023, vol. 49, no. 11, pp. 25–27. DOI 10.61011/TPL.2023.11.57193.19706
16. Harby K., Chiva S., Muñoz-Cobo J.L. An experimental investigation on the characteristics of submerged horizontal gas jets in liquid ambient. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, no. 53, pp. 26–39. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.10.009>
17. Fedorov S. V., Vasil'ev V. M. *Regulirovanie vozduшной podushki na kanalizatsionnoy seti dyukernogo tipa* [Regulation of an air cushion on a sewerage network of a culvert type]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 6 (89), pp. 128–134.
18. Kutateladze S. S., Styrikovich M. A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. 2-nd ed., revised. Moscow, Energiya Publ., 1976, 296 p.