УДК 628.31

© С. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент
© В. М. Васильев, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru, 89119311522@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-4-91-99

© S. V. Fedorov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© V. M. Vasilyev, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru, 89119311522@bk.ru

РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКИ НА КАНАЛИЗАЦИОННОЙ СЕТИ ДЮКЕРНОГО ТИПА

REGULATION OF THE AIR CUSHION AT A SEWER NETWORK OF THE SIPHON TYPE

Для повышения энергоэффективности и экологической безопасности системы магистральной канализации рекомендуется применение эффекта воздушной подушки. Данный эффект позволит промывать систему, организованно отводить воздух на установку очистки воздуха и осуществлять подъем сточной жидкости за счет давления в воздушной подушке. Для надежной работы канализационной сети необходимо поддерживать требуемый уровень сточных вод в условиях постоянно меняющегося расхода газовой среды. В работе предлагается конструкция узла регулирования воздушной подушки, которая работает на основе треугольного водослива. Данная конструкция позволяет сделать систему саморегулируемой и отводить излишки газовой среды автоматически. Струйный поток на водосливе движется при условии изменяющегося сечения выпускающего отверстия. Это условие принципиально отличает истечение газовой среды от существующих исследований в области подводных воздушных и газовых струй, что является основанием для проведения собственного исследования по оценке пропускной способности треугольного водослива. Исследование струйного потока выполнено с помощью программы ANSYS CFX. Модельные расчеты проведены для диапазона расхода воздуха от 0,0078 до 1 л/с. Для оценки работы водослива в другом диапазоне расходов и при других значениях угла наклона ребра α использовалась π -теорема. Результаты исследования могут быть использованы на практике для разработки узла регулирования и внедрения системы канализации, работающей в режиме с воздушной подушкой.

Ключевые слова: канализационная сеть, сточные воды, воздушная подушка, подводная воздушная струя, компьютерное моделирование, ANSYS CFX.

In order to improve the energy efficiency and environmental safety of the main sewerage system, it is recommended to use the air cushion effect. This effect will allow flushing the system, removing the air to the air purification unit in an orderly manner, lifting the sewage due to the pressure in the air cushion. For provision of reliable operation of the sewer network, it is necessary to maintain the required level of wastewater in the conditions of constantly changing gas-air flow rate. The paper proposes the design of the air cushion control unit, which operates on the basis of a triangular spillway. This design allows making the system self-regulating, automatically removing excess gas-air environment. The jet stream on the spillway moves under the condition of a changing cross-section of the outlet orifice. This condition fundamentally distinguishes the outflow of the air from the existing research in the field of underwater air and gas jets. Therefore, this is the basis for conducting our own research to assess the capacity of a triangular shaped spillway. The study of the jet stream was performed using the ANSYS CFX program. Model calculations were carried out for the range of air flow rate from 0.0078 to 1 l / s. There was used the π -theorem to evaluate the operation of the spillway in a different flow range and at different values of the inclination angle of the edge α . The results of the study can be used in practice to develop a control unit and implement a sewage system operating in the air cushion mode.

Keywords: sewer network, sewage, air jet, underwater air jet, computer modeling, ANSYS CFX.

Важными критериями развития современных городов являются обеспечение экологичности окружающей среды, а также повышение надежности и энергоэффективности инженерных систем. По этой причине одно из центральных мест в городской инфраструктуре можно отдать системам водоотведения, эксплуатация которых сталкивается с проблемой высоких энергозатрат по перекачке сточных вод [1] и проблемой негативного влияния на качество городской среды за счет выделения канализационных газов [2]. Перспективным способом решения подобных вопросов является применение эффекта воздушной подушки [3], когда поток сточных вод отжимается газовой средой, создавая расслоенное движение жидкости и газовой среды. На сегодняшний день в Германии есть примеры эксплуатации сооружений, работающих в подобном режиме. Как правило, это отдельные участки сети (дюкеры), на которых с помощью компрессора формируется воздушная подушка в подводящем пространстве трубопровода [4]. Главной целью данного режима является создание высокой скорости течения потока, обеспечивающей смыв осадка с лотка трубопровода. Принципиально новым решением является использование данного эффекта целиком для магистральной канализационной сети [5]. Данный подход позволит не только проводить промывку отдельных участков, но и организованно, под избыточным давлением удалять газозвудушную смесь на установки для очистки воздуха. Кроме этого, с помощью избыточного давления воздуха можно осуществлять подъем сточных вод по восходящему участку дюкера, минуя использование канализационной насосной станции. Подобные технические решения известны [6, 7] и предполагают устройство магистральной сети в виде дюкера, на котором устраиваются шахты для приема сточных вод от районной канализации.

Для работы сети с воздушной подушкой необходимо устройство сооружений, выполняющих ее формирование и регулирование. На рис. 1 представлена схема канализационной сети, имеющей конфигурацию дюкера и работающей в режиме с воздушной подушкой. Наиболее эффективным способом нагнетания газовой среды в подводящее пространство дюкера является использование перепадных шахт, в которых

устраиваются трубчатые стояки (узел А). За счет падения сточной жидкости по стояку А.1 происходит эжектирование газовой среды из верхнего бьефа в нижний. В результате этого наблюдается избыточное давление воздуха в нижнем бьефе [8]. Результаты модельных расчетов подтверждают достаточно быстрое и стабильное формирование воздушной подушки, которое не требует каких-либо энергозатрат [3]. Устройство вертикальных перегородок между участками позволяет формировать независимые воздушные подушки на разных участках дюкера. Пройдя горизонтальные участки сети, вода покидает дюкер в выходной шахте (узел В), поднимаясь по вертикальному трубопроводу В.1. Рост объема воздушной подушки понижает уровень и вызывает смыв образовавшегося в лотке осадка к сборному приемку выходной шахты В.5. После закрытия задвижки на вертикальном трубопроводе В.3 и открытия задвижки на трубопроводе удаления осадка В.4 происходит выдавливание осадка в отводящий самотечный трубопровод В.6.

Для отведения из воздушной подушки избыточного количества газовой среды и регулирования уровня, в существующих конструкциях [4, 6, 7] применяется воздухопровод, подключенный к шельге канализационного трубопровода и снабженный либо запорной арматурой, либо предохранительным клапаном. Данное решение обладает рядом недостатков. Применение задвижки требует постоянного регулирования степени ее открытия, что обеспечивается системой автоматики или постоянным контролем наблюдателя. На практике это снижает надежность системы, поэтому область применения запорной арматуры является ограниченной, в основном для накопления и стравливания воздушной среды. Работа предохранительного клапана может быть настроена только на поддержание фиксированного давления, что исключает возможность постоянного регулирования уровня потока сточных вод в трубе. Поэтому применение клапана ограничивается использованием на системах аварийного сброса воздушной среды в случае достижения давления критической величины.

Подытоживая вышесказанное, можно выделить техническую проблему, которая заключается в том, что существующие конструкции воздухоотведения малонадежны в условиях по-

Рис. 1. Схема канализационной сети в виде дюкера, работающего с эффектом воздушной подушки

стоянно меняющегося расхода газовой среды, нагнетаемой стояками в подводящее пространство дюкера.

Для устройства узла регулирования воздушной подушки (узла С) можно использовать стандартный щитовой затвор, у которого на конце заслонки устраивается вырез в виде треугольного водослива. На рис. 2 показана схема узла регулирования, подключенного к участку канализационной сети. Узел представляет собой отдельную шахту 1, которая с помощью горизонтального трубопровода 2 гидравлически и аэродинамически связана с дюкером 3. В шахте 1 предусмотрено сухое 4 и мокрое 5 отделения. Горизонтальный трубопровод 2 от дюкера заводится в шахту 1 и подключается к мокрому отделению 5. В сухом отделении 4 на горизонтальном трубопроводе 2 устраивается стандартная запорная арматура 6 для обеспечения возможности отключения узла регулирования, а на конце трубопровода 2 в мокром отделении устанавливается щитовой затвор 7, нижняя граница которого выполнена в виде водосливного ребра треугольной формы. В перекрытие мокрого отделения 5 нижним концом встраивается вертикальный трубопровод 8, который сверху подключается к установке очистки воздуха 9, которая установлена в сухом отделении 4. На схеме видно установившееся равновесие между воздушной подушкой, находящейся слева от щитового затвора 7, и столбом жидкости, находящейся справа. Принцип работы заключается в следующем. Щитовой затвор 7 устанавливается на том уровне по высоте трубопровода, на котором необходимо поддерживать заполнение дюкера. По мере разрастания воздушной подушки уровень воды будет приближаться к верши-

не водосливного ребра щита 7, при достижении которого излишки газовой среды начнут проникать через ребро водослива в виде пузырькового потока сначала в мокрое отделение 5, а потом и в вертикальный трубопровод 8. Истечение газовой среды в водную происходит за счет разницы давлений, соответствующей при пересчете на высоту напору воды на водосливе. Достигнув свободной поверхности, газовый поток отделяется от водной среды и под избыточным давлением по трубопроводу 8 направляется на установку газоочистки воздуха 9, которая устанавливается выше в сухом отделении. После стравливания части воздуха уровень снова незначительно поднимется над водосливным ребром затвора 7. Дальнейшее разрастание воздушной подушки повторит цикл стравливания газовой среды. Таким образом, за счет данной конструкции достигается саморегулирование системы. При необходимости изменения заполнения трубопровода дюкера 3 с помощью затвора 7 изменяется положение заслонки на соответствующий уровень.

Таким образом, предлагаемая конструкция, в отличие от существующих аналогов, позволяет управлять уровнем потока в дюкере, поддерживая уровень сточных вод в том положении, где находится вершина треугольного водослива, обеспечивает саморегулирование воздушной подушки за счет удаления избытков газовой среды через треугольный водослив и осуществляет организованный отвод воздуха на установку очистки. Данная конструкция упрощает эксплуатацию дюкера с воздушной подушкой и повышает его надежность.

Рис. 2. Схема узла регулирования воздушной подушки (узла С)

Для применения в инженерной практике данного сооружения необходимо определять пропускную способность водослива Q_{air} , скорость V_{air} и высоту воздушного потока h .

В современной научно-технической литературе известно достаточно много работ, посвященных изучению вопросов движения воздушных и газовых сред в воде. В работе [9] рассматриваются основные закономерности дозвукового барботажа жидкости. В работах [10, 11] исследована структура двухфазного потока после нагнетания воздуха в вертикальный канал, получены расстояния между пузырями, их размеры и скорости. В исследовании [12] выполняется сравнение различных численных программ при рассмотрении осесимметричной задачи истечения газа в емкость с жидкостью. В работах [13, 14] описывается эжектирующая способность воздушных струй в воде. Работа [15] посвящена изучению надводного газожидкостного бугра в зависимости от характеристик струи. В работе [16] отмечаются закономерности изменения объемного газосодержания в вертикальной затопленной струе. В работе [17] рассматривается

вопрос обратной циркуляции газовой среды (обратной атаки) в момент отрыва порции газа от струи и негативного воздействия на подводный двигатель. В дополнение к предыдущей статье интересна работа [18], которая рассматривает эффект обратной циркуляции с учетом влияния на струю гравитации и плавучести. Работа [19] рассматривает закономерности динамического колебания подводной струи, особенно на границе раздела двух фаз.

В отличие от указанных выше работ, в данном исследовании рассматривается процесс истечения воздуха при условии изменения сечения выпускающего отверстия, размеры которого устанавливаются в зависимости от пропускной способности.

При функционировании водослива возможно два режима истечения газовой воздушной смеси: 1) в виде отдельных пузырей, всплывающих на поверхность воды; 2) в виде струи, которая в дальнейшем дробится на отдельные пузыри. В работе [9] представлен критерий, характеризующий режим истечения газа:

$$\Delta P = \frac{\rho' \Delta P R_1}{\rho'' \sigma}, \quad (1)$$

где ρ' — плотность воды; ρ'' — плотность воздуха; ΔP — разница давления в водяной и газовой среде; σ — коэффициент поверхностного натяжения; R_1 — радиус отверстия истечения, при значениях критерия более 4 будет формироваться струйный поток.

С целью получения характеристик работы треугольного водослива было проведено моделирование.

Моделирование треугольного водослива осуществлялось в программе конечно-элементного анализа *ANSYS CFX*. В качестве расчетной области была создана прямоугольная емкость (рис. 3), которая была разделена на две секции стенкой с треугольным вырезом. Угол в основании треугольного выреза составлял $\alpha = 45^\circ$. Для расчетной области назначалась модель турбулентности $k-\epsilon$ и воздействие гравитации вдоль оси z . Граница между фазами определялась моделью смеси. В начальный момент времени емкость заполнена водой и уровни в обеих секциях совпадают. Избыточное давление на поверхности жидкости отсутствовало. Правая секция являлась закры-

той и не сообщалась с окружающей средой. Над уровнем воды в этой секции предусматривался трубопровод, который подавал воздух. Для этого трубопровода задавалось граничное условие скорости воздушного потока V . Значения скорости принимались из диапазона от 0,1 до 12,8 м/с. Левая секция сообщалась с окружающей средой за счет окна сверху для входа и выхода воздушной среды. Избыточное давление P_m на этой границе равнялось нулю. В ходе исследования проводилась серия модельных расчетов для разных расходов воздуха в диапазоне от 0,0078 до 1 л/с. При моделировании решалась нестационарная задача.

В результатах расчета фиксировалась высота h_{air} и площадь живого сечения ω_{air} воздушного потока на водосливе, периметр контакта воздушного потока со стенками водослива χ_{air} , а также максимальная скорость.

При моделировании нагнетаемый воздушный поток снижает уровень воды в правой секции сосуда. Вода частично выдавливается в левую секцию. После достижения вершины водослива происходит поступление воздуха в водную сре-

Рис. 3. Схема расчетной области, начальные и граничные условия модели с треугольным водосливом

ду в левой секции. При этом устанавливается струйный режим движения воздушной среды. В дальнейшем струя разрушается на отдельные пузыри. Высота воздушного потока h для заявленного диапазона расходов воздуха изменялась от 0,003 м до 0,016 м. Площадь живого сечения потока ω_{air} изменялась в диапазоне от $9,7 \cdot 10^{-6}$ до $2,7 \cdot 10^{-4}$ м². Рассмотренный критерий режима истечения (1) для данных условий прогнозирует наличие струйного потока. На рис. 4 показаны результаты модельного расчета для расхода воздуха $Q_{air} = 0,13; 0,25; 0,5$ л/с. Увеличение расхода воздуха приводит к росту высоты потока на водосливе и длины струйного потока. Также отметим, что воздушная струя имеет конусовидную форму, угол раскрытия которой возрастает с ростом расхода по аналогии с экспериментальными данными [10].

В процессе движения воздушной среды уровень в правой секции незначительно пульсирует, что вызывается отрывом пузырей от струи и самим колебанием струи. В живом сечении на

водосливе наблюдается подковообразная форма потока, которая более четко проявляется с увеличением расхода воздуха. Граница раздела двух фаз получилась размазанной, что объясняется моделированием двух взаимопроникающих сред в условиях модели смешения [11].

На рис. 5 представлен график зависимости средней скорости потока от расхода воздушной среды. Значения скорости вычислены через площадь потока ω_{air} и расход Q_{air} . Максимальные скорости воздуха, зафиксированные в результатах моделирования, имеют более высокие значения и попадают в диапазон от 4,1 до 13,7 м/с.

Для получения безразмерного уравнения с целью оценки работы сооружения в другом диапазоне расходов воздуха и при других значениях угла α использовалась π -теорема. На основании данных модельных расчетов и экспериментальных исследований [9, 10] можно предположить, что средняя скорость истечения газовоздушной среды на треугольном водосливе зависит от следующих физических величин:

Рис. 4. Результаты модельного расчета по объемной доле двух фаз (красный цвет — вода, синий — воздух):
а — $Q_{air} = 0,13$ л/с; б — $Q_{air} = 0,25$ л/с; в — $Q_{air} = 0,5$ л/с

Рис. 5. Зависимость средней скорости воздушного потока на водосливе V_{air} от расхода Q_{air}

$$V_{air} = f(R_{air}, \Delta P, \rho_{air}, \mu_{air}, g), \quad (2)$$

где величина R_{air} является аналогом гидравлического радиуса, то есть представляет собой отношение площади ω_{air} к χ_{air} ; ρ_{air} и μ_{air} — плотность и динамическая вязкость воздуха; g — ускорение свободного падения.

Используя π -теорему, исходную функциональную зависимость (2) можно свести к трем безразмерным отношениям:

$$\frac{\sqrt{\rho_{air}} V_{air}}{\sqrt{\Delta P}} = a \left(\frac{R_{air} \rho_{air} g}{\Delta P} \right)^b \left(\frac{\mu_{air}}{R_{air} \sqrt{\Delta P} \sqrt{\rho_{air}}} \right)^c. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов a , b , c была составлена система из трех безразмерных уравнений (3) (безразмерные критерии для каждого

уравнения в системе были вычислены на основании данных из модельных расчетов с расходом Q_{air} 0,0078; 0,12; 1 л/с). Решение системы уравнений позволило получить следующие значения коэффициентов: $a = 1,873 \cdot 10^{24}$, $b = 7,770$, $c = -0,383$.

Далее умножаем левую и правую часть зависимости (3) на площадь ω_{air} , заменяем гидравлический радиус на соотношение $\omega_{air} / \chi_{air}$ и выражаем расход Q_{air} . Вместо ω_{air} , ΔP и χ_{air} подставляем следующие зависимости:

$$\omega_{air} = \frac{h^2}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad \Delta P = \rho_{water} g h, \quad \chi_{air} = \frac{2h}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где ρ_{water} — плотность воды.

Подставим ранее вычисленные коэффициенты в выражение (3), а также значения $\rho_{water} = 997,1 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{air} = 1,184 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{air} = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. После всех преобразований зависимость (3) примет вид:

$$Q_{air} = \frac{4354 \cdot h^{2,5} \cdot \cos^{7,7}(\alpha)}{\left(\frac{1}{h^{1,5} \cdot \cos(\alpha)} \right)^{0,383} \operatorname{tg}(\alpha)}. \quad (5)$$

На рис. 6 представлено два графика зависимости расхода и скорости от высоты воздушного потока на водосливе, построенных с помощью зависимости (5). На графиках показано семейство функций для различных углов α . С уменьшением угла α (см. рис. 3) возрастают пропускная способность водослива и средняя скорость воздушного потока.

Рис. 6. Зависимость расхода воздушного потока Q_{air} и скорости V_{air} от высоты потока на водосливе h

Выводы

В результате проведенного исследования:

1. Предложена конструкция узла регулирования канализационной сети, работающей с воздушной подушкой, которая предусматривает использование треугольного водослива для отведения газозвушной среды.

2. Для оценки работы треугольного водослива выполнено моделирование для диапазона расхода воздуха от 0,0078 до 1 л/с. Получены гидравлические характеристики потока.

3. Получена формула для оценки пропускной способности треугольного водослива в зависимости от высоты воздушного потока и угла в основании треугольного водослива.

Результаты исследования в дальнейшем могут быть использованы при расчете сооружения узла регулирования воздушной подушки.

Библиографический список

1. Великанов Н. Л., Корягин С. И. Энергоэффективность городских сетей водоснабжения и водоотведения // Технико-технологические проблемы сервиса. 2014. № 4 (30). С. 84–88.
2. Стукалина Ю. Н., Боронина Л. В., Давыдова Е. В., Мурзаева Э. К., Лукичева И. В. Обеспечение экологической безопасности на объектах коммунального хозяйства // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 3 (33). С. 31–34.
3. Федоров С. В., Васильев В. М. Моделирование дюкера с воздушной подушкой // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 158–165.
4. Horlacher H.-B., Helbig U. (Ed.). Rohrleitungen 2: Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation. 2nd ed. Springer Vieweg, 2018. 1187 / 1174 S.
5. Vasilyev V., Vasilyev F. Innovations in Saint Petersburg's 12 km siphon sewer, Russia // Proceedings of institution of civil engineers: waste and resource management. 2016. Vol. 169. № 1. Pp. 42–51.
6. Пат. 2107782С1, Российская Федерация, МПК E03 F5/20. Канализационный дюкер / В. М. Васильев; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. № 95120853/03; заявл. 09.12.1995; опубл. 27.03.1998.
7. Пат. 2101425, Российская Федерация, МПК E03 F5/20. Канализационный дюкер / В. М. Васильев; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. № 95107781/03; заявл. 15.05.1995; опубл. 10.01.1998.
8. Shuai Guo, Yu Qian, Zhu D., Wenming Zhang, Edwini-Bonsu S. Effects of Drop Structures and Pump

Station on Sewer Air Pressure and Hydrogen Sulfide: Field Investigation // Journal of Environmental Engineering. 2018. № 144 (3). 04018011-1-9.

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

10. Исаков Н. Ш., Перевезенцев В. В. Диагностика двухфазных течений в вертикальных каналах в режиме естественной циркуляции по пристеночным пульсациям давления // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2015. № 3 (102). С. 17–29.

11. Yang X., Schlegel J. P., Liu Y., Paranjape S., Hibiki T., Ishii M. Experimental study of interfacial area transport in air-water two phase flow in a scaled 8×8 BWR rod bundle // International Journal of Multiphase Flow. 2013. № 50. Pp. 16–32.

12. Lezhnin S. I., Alekseev M. V., Vozhakov I. S., Pribaturin N. A. Simulating gas (vapor) outflow into a liquid // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1105. No. 1. 012081. 5 p.

13. Akabane M., Koizumi Y., Uchibori A., Kamide H., Ohshima H. Velocity of entrainments formed by high velocity air jet flow in stagnant water // Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering ICONE22. 2014. Pp. 1–6.

14. Sugimoto T., Saito S., Kaneko A., Abe Y., Uchibori A., Ohshima H. Visualization Study on Droplet-Entrainment in a High-Speed Gas Jet into a Liquid Pool // Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26. 2018. Pp. 1–6.

15. Иванников А. В. Экспериментальное исследование истечения газожидкостной струи через слой жидкости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 24 с.

16. Гизатулин Р. А. Закономерности распределения газовой фазы в жидкости при продувке снизу // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Металлургия. 2006. № 10 (65). С. 63–68.

17. Tang J., Li S., Wang N., Wei Y., Wei S. Flow Structures of Gaseous Jet Injected into Liquid for Underwater Propulsion // Acta Mechanica Sinica (Acta Mech Sin). 2010. № 27 (4). Pp. 461–472.

18. Tang Y., Li S. Research into the characteristics of horizontal gaseous jets underwater // Journal of Vibroengineering. 2016. № 18 (7). Pp. 4678–4691.

19. Zhang X., Li S., Yu D., Yang B., Wang N. The Evolution of Interfaces for Underwater Supersonic Gas Jets // Water. 2020. № 12 (2). 488. Pp. 1–18.

References

1. Velikanov N. L., Koryagin S. I. *Energoeffektivnost' gorodskikh setey vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Energy efficiency of urban water supply and sanitation

networks]. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa – Technical and technological problems of maintenance*, 2014, no. 4 (30), pp. 84–88.

2. Stukalina Yu. N., et al. *Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti na ob'ektakh kommunal'nogo khozyaystva* [Provision of environmental safety at municipal facilities]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya – Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea Region*, 2020, no. 3 (33), pp. 31–34.

3. Fedorov S. V., Vasilyev V. M. *Modelirovanie dyukera s vozduшной podushkoy* [Simulation of the air cushion inverted siphon]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2021, no. 2 (85), pp. 158–165.

4. Horlacher H.-B., Helbig U. (Ed.). *Rohrleitungen 2: Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation*. 2nd ed. Springer Vieweg, 2018, 1187 / 1174 S.

5. Vasilyev V., Vasilyev F. Innovations in Saint Petersburg's 12 km siphon sewer, Russia. *Proceedings of institution of civil engineers: waste and resource management*, 2016, vol. 169, no. 1, pp. 42–51.

6. Vasilyev V. M. *Kanalizatsionnyy dyuker* [Sewage syphon]. Patent RF, no. 95120853/03, St. Petersburg, 1998.

7. Vasilyev V. M. *Kanalizatsionnyy dyuker* [Sewage syphon]. Patent RF, no. 95107781/03, St. Petersburg, 1998.

8. Shuai Guo, et al. Effects of Drop Structures and Pump Station on Sewer Air Pressure and Hydrogen Sulfide. Field Investigation. *Journal of Environmental Engineering*, 2018, no. 144 (3), 04018011-1-9.

9. Kutateladze S. S., Styrikovich M. A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. 2nd ed., revised. Moscow, Energiya Publ., 1976, 296 p.

10. Isakov N. Sh., Perevezentsev V. V. *Diagnostika dvukhfaznykh techeniy v vertikal'nykh kanalakh v rezhime estestvennoy tsirkulyatsii po pristenochnym pul'satsiyam davleniya* [Diagnostics of two-phase flows in vertical channels in the mode of natural circulation by wall pressure pulsations]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie» – Bulletin of the Bauman Moscow*

State Technical University. Ser. "Mechanical Engineering", 2015, no. 3 (102), pp. 17–29.

11. Yang X., et al. Experimental study of interfacial area transport in air-water two phase flow in a scaled 8×8 BWR rod bundle. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, no. 50, pp. 16–32.

12. Lezhnin S. I., Alekseev M. V., Vozhakov I. S., Pribaturin N. A. Simulating gas (vapor) outflow into a liquid. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 1105, no. 1. 012081, 5 p.

13. Akabane M., et al. Velocity of entrainments formed by high velocity air jet flow in stagnant water. *Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering ICONE22*, 2014, pp. 1–6.

14. Sugimoto T., et al. Visualization Study on Droplet-Entrainment in a High-Speed Gas Jet into a Liquid Pool. *Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26*, 2018, pp. 1–6.

15. Ivannikov A. V. *Eksperimental'noe issledovanie istecheniya gazozhidkostnoy strui cherez sloy zhidkosti. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Experimental study of the outflow of gas-liquid jet through liquid layer. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2007, 24 p.

16. Gizatulin R. A. *Zakonomernosti raspredeleniya gazovoy fazy v zhidkosti pri prodavke snizu* [Regularities of the distribution of the gas phase in liquid during purging from below]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gos. un-ta. Seriya: Metallurgiya – Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*, 2006, no. 10 (65), pp. 63–68.

17. Tang J., Li S., Wang N., Wei Y., Wei S. Flow Structures of Gaseous Jet Injected into Liquid for Underwater Propulsion. *Acta Mechanica Sinica (Acta Mech Sin)*, 2010, no. 27 (4), pp. 461–472.

18. Tang Y., Li S. Research into the characteristics of horizontal gaseous jets underwater. *Journal of Vibroengineering*, 2016, no. 18 (7), pp. 4678–4691.

19. Zhang X., Li S., Yu D., Yang B., Wang N. The Evolution of Interfaces for Underwater Supersonic Gas Jets. *Water*, 2020, no. 12 (2), pp. 1–18.