

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ КАМЕР

Телятникова А. М., Федоров С. В., Кудрявцев А. В.

MODELING THE OPERATION OF SEPARATION CHAMBERS

Telyatnikova A. M., Fedorov S. V., Kudryavtsev A. V.

Аннотация

Введение. Разделительные камеры проектируются и строятся для полураздельной и раздельной систем канализации населенных пунктов. Их основная функция заключается в отделении потока условно чистых вод во время интенсивного дождя. Данный подход позволяет проводить сброс условно чистых вод в водные объекты или накопительные резервуары без очистки и тем самым значительно снизить нагрузку, оказываемую на очистные сооружения. Для корректного проектирования разделительных камер требуется понимание влияния их конструктивных особенностей на процесс деления потока. Изучение гидравлических характеристик разделительных камер любой конструкции возможно при помощи компьютерного моделирования. В рамках данной работы исследовались две конструкции: с кольцевым водосливом, имеющая натурный прототип, и со спиралевидным водосливом, предложенная авторами. **Методы.** В основу исследования положено моделирование в пакете конечно-элементного анализа *ANSYS CFX*. Для каждой конструкции выполнена серия из пяти опытов с различными скоростями входящего потока. **Результаты.** Разработаны и качественно оценены модели двух видов разделительных камер. Установлены и количественно оценены такие характеристики, как постоянство расхода, отводимого на очистку, и коэффициент расхода водослива. **Заключение.** В результате выполнения исследования сформирован и опробован принципиальный подход, позволяющий изучить гидравлические характеристики разделительных камер различных конструкций для их дальнейшего применения в системе канализации.

Ключевые слова: канализационная сеть, сточные воды, дождевая канализация, разделительная камера, компьютерное моделирование, *ANSYS CFX*.

Abstract

Introduction. Separation chambers are designed and built for separate and partially separate sewerage systems. Their main function is to separate the flow of relatively clean water during heavy rain. This allows the discharge of such water without treatment into water bodies or storage tanks. The approach reduces the load of wastewater treatment plants. To design separation chambers, we need to understand how their design features affect the process of flow separation. It is possible to study the hydraulic characteristics of separation chambers of any design with the help of computer simulation. Two designs of separation chambers were investigated: a circular spillway with a full-scale prototype and a spiral spillway proposed by the authors. **Methods.** The research was based on simulation in the *ANSYS CFX* finite element analysis software. For each design, a series of five experiments with different incoming flow rates was performed. **Results.** Models of two types of separation chambers were developed and qualitatively evaluated. The hydraulic characteristics were established and quantified: the uniformity of the flow discharged for treatment and the spillway discharge coefficient. **Conclusion.** As a result, a principled approach was formed and tested. Using this approach, it is possible to study the hydraulic characteristics of separation chambers of various designs for their further use in the sewerage system.

Keywords: sewer network, wastewater, rainwater drainage, separation chamber, computer simulation, *ANSYS CFX*.

Введение

Объем поверхностного стока зависит от многих факторов: уровня благоустройства территории, интенсивности и продолжительности осадков, частоты уборочных и поливочных работ [14]. Попадающий в систему ливневой канализации сток загрязнен взвешенными веществами, нефтепродуктами и химическими загрязнителями. В связи с этим он обязательно должен быть подвергнут очистке. Однако степень загрязнен-

ности дождевых вод по мере поступления в систему канализации меняется. Максимальное количество загрязнений поступает в ливневую сеть в начальный период выпадения осадков, затем уровень загрязненности снижается и в конечном счете большая часть поверхностного стока оказывается условно чистой [9]. Поэтому, чтобы не перегружать очистные сооружения, имеет смысл делить сток на условно чистый и загрязненный. Для этих целей на дождевой канализации устра-

ивают разделительные камеры, которые позволяют проводить такое отделение и направлять чистый сток непосредственно в естественные водоемы или накопительные резервуары, из которых воду в дальнейшем можно забирать на повторное использование [7, 13]. Обязательными для транспортировки на очистные сооружения остаются: наиболее загрязненная часть дождевого стока, все талые воды, поливочные воды, имеющие высокую степень загрязненности [5]. Отметим, что разделительные камеры проектируются и строятся для полураздельной и раздельной систем канализации [12], а также на коллекторах дождевой сети при прокладке их вблизи водоемов [3]. Также в полураздельной системе они могут устраиваться для обеспечения временного сброса бытовых, производственных и дождевых сточных вод в регулирующие резервуары для последующей подачи на очистные сооружения.

По принципу деления камеры подразделяют на три типа [11]:

- на основе водосливов различной конфигурации (прямолинейные, двусторонние, кольцевые, боковые, донные);
- на основе изменения дальности отлета струи (с разделительной стенкой);
- с применением механических устройств.

К настоящему моменту разработано много конструкций разделительных камер. Некоторые из них давно приняты как типовые и активно используются в практике, другие — более авторские [1, 4, 15]. Конструктивные особенности некоторых видов разделительных камер представлены на рис. 1.

Расчет разделительных камер осуществляется исходя из величины предельного расхода $Q_{пр}$, который должен включать полный объем стоков, требующих обязательного отведения на очистку. В случаях, когда суммарные расходы, поступающие в сооружение, превышают предельную величину $Q_{пр}$, при проектировании полагается, что на очистку все равно будет направляться постоянный расход $Q_{оч}$, хотя на практике это не всегда выполняется. Фактически величина расхода, отводимого на очистку, для большинства конструкций разделительных камер изменяется в зависимости от общей производительности Q_p и принятого коэффициента деления K_{div} [2]. Возникающее непостоянство расходов, поступающих на

очистку, осложняет работу очистных станций и является основной проблемой при их проектировании и эксплуатации. Кроме представленных ранее параметров, важную роль при работе разделительных камер играют: расход сбрасываемых условно чистых вод $Q_{сбр}$, коэффициент расхода водослива m , высота гребня водослива $h_{гр}$ [6]. В связи с этим основной целью данной работы стала разработка подхода для исследования разделительных камер с различными конструкциями. Подход учитывает использование пакетов конечно-элементного анализа и позволяет получить гидравлические характеристики, необходимые для проектирования. В настоящем исследовании рассмотрены два случая, представляющих практический интерес:

- теоретическое определение постоянства отводимых расходов и коэффициента расхода для конструкции разделительной камеры с кольцевым водосливом, разработанной А. В. Кудрявцевым (рис. 1, в) [8];
- разработка и теоретическая оценка работоспособности камеры со спиралевидным водосливом (рис. 1, з).

Первый случай представляет интерес, так как данная конструкция камеры была практически реализована, но при этом как теоретическое, так и опытное определение коэффициента расхода водослива и постоянства отводимых на очистку расходов для нее имело определенные сложности. Второй случай — предложение новой конструкции камеры с целью стабилизации расхода, отводимого на очистку, и уточнение параметров ее работы. Основным инструментом для реализации поставленных задач стал пакет конечно-элементного анализа *ANSYS CFX*.

Методы и материалы

Моделирование в комплексе *ANSYS CFX* включает следующие основные стадии: конструирование геометрии объекта моделирования в разделе *Geometry*; генерацию расчетной сетки в разделе *Mesh*; установку начальных, граничных условий, а также прочих характеристик проведения расчета в разделе *Setup* и непосредственно сам расчет в разделе *Solution*.

В соответствии с задачами, поставленными в данном исследовании, было выполнено конструирование расчетных областей разделительных камер с кольцевым и со спиралевидным во-

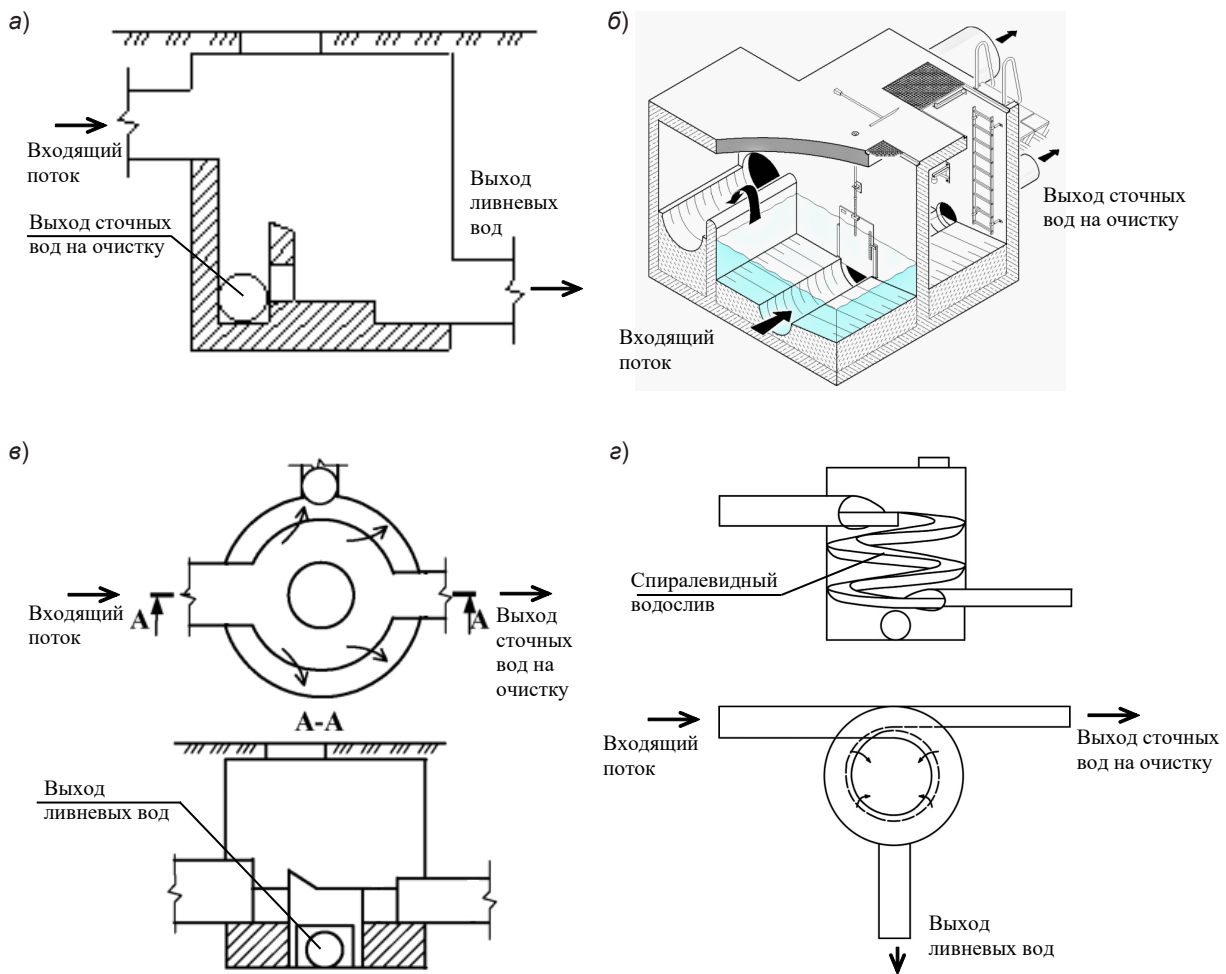


Рис. 1. Конструкции разделительных камер: а — с разделительной стенкой и отверстием; б — с регулирующим затвором; в — с кольцевым водосливом; г — со спиралевидным водосливом

досливом. Расчетные области представляют собой внутренние воздушные пространства данных сооружений, выполненные в виде твердотельных элементов. Далее для построенных геометрий генерировалась расчетная сетка. Отметим, что данный этап крайне важен для качественного моделирования гидродинамических процессов. Для формирования корректной пристеночной области в местах контакта жидкости с поверхностью водосливов использовалась функция дополнительного измельчения *Inflation*.

Затем были заданы начальные и граничные условия моделирования. Начальные условия определялись таким образом, чтобы в момент старта расчета в сооружении находился только воздух. Дальнейшее поступление воды в расчетную область определялось условием *Inlet* на подводящем трубопроводе, которое устанавлива-

ло скорость втекающего потока ($V_{вх}$, м/с). Места выхода разделенных потоков определялись приложением условия *Outlet* к соответствующим поверхностям. Условие *Outlet* устанавливало отсутствие избыточного давления $P_m = 0$ Па при выходе потоков из расчетной области, что позволяло обеспечить самотечное движение. Кроме того, для учета присутствия воздушной среды в сооружениях использовалось условие *Opening*, которым также устанавливалось отсутствие избыточного давления $P_m = 0$ Па. Расчет производился в условиях стационарного состояния (*Steady State*) до момента наступления установившегося движения. Общий вид полученных моделей разделительных камер и их граничных условий представлен на рис. 2.

Для каждой конструкции разделительной камеры была проведена серия из пяти опытов, об-

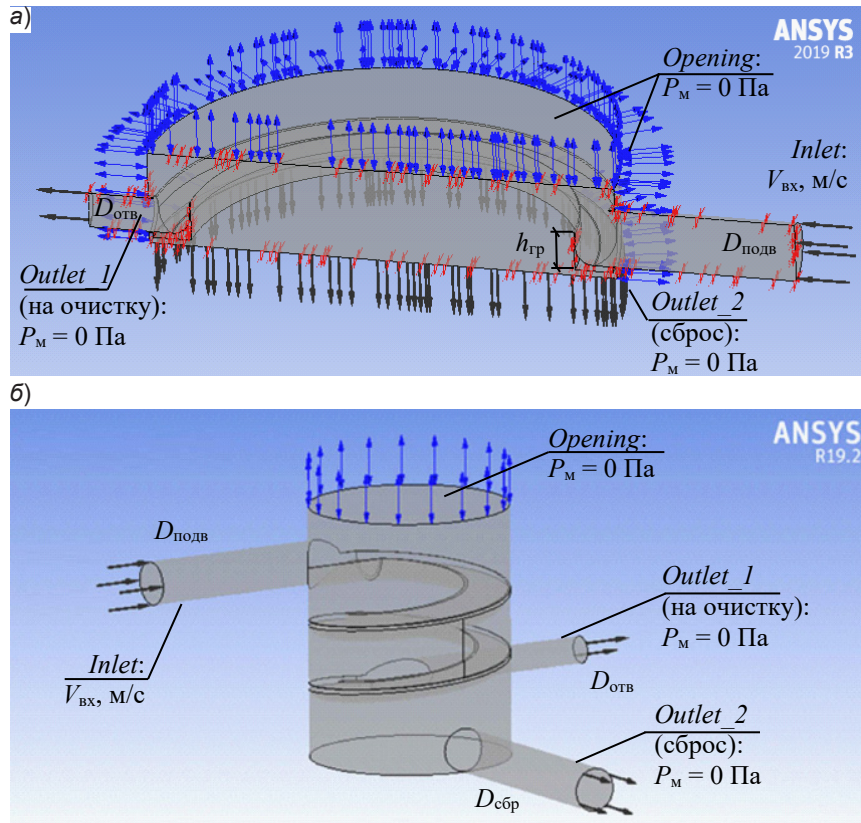


Рис. 2. Расчетная область, начальные и граничные условия модели разделительной камеры: а — с кольцевым водосливом; б — со спиралевидным водосливом

щие сведения о которых представлены в таблице. Выбор скоростей входящего потока был основан на данных научной литературы, посвященной изучению гидравлических характеристик разделительных камер [2, 16], и показал необходимость проведения исследований при расходах, значительно превышающих предельный.

Основными конструктивными характеристиками для каждой камеры были определены:

диаметр подводящего трубопровода $D_{\text{подв}}$; диаметр трубопровода, отводящего сточные воды на очистку, $D_{\text{отв}}$; диаметр трубопровода, отводящего условно чистые воды для сброса в водоем и на повторное использование, $D_{\text{сбр}}$ (для камеры со спиралевидным водосливом); высота гребня водослива $h_{\text{гр}}$ (для камеры с кольцевым водосливом). Численные значения упомянутых показателей также представлены в таблице.

Условия проведения опытов

№ п/п	Конструкция разделительной камеры	№ опыта	$V_{\text{вх}}$, м/с	$D_{\text{подв}}$, м	$D_{\text{отв}}$, м	$h_{\text{гр}} / D_{\text{сбр}}$, м	$Q_{\text{пр}}$, л/с
1	С кольцевым водосливом	1.1	0,3	0,5	0,3	0,298	51,3
		1.2	1,0				
		1.3	1,5				
		1.4	2,0				
		1.5	2,5				
2	Со спиралевидным водосливом	2.1	0,2	0,4	0,2	0,400	55,4
		2.2	0,6				
		2.3	1,0				
		2.4	1,6				
		2.5	2,2				

Результаты исследования и обсуждение

Выведение результатов моделирования в *ANSYS CFX* осуществляется в разделе *Results*. Данное приложение позволяет отображать результаты графически в форме цветовых полей, а также фиксировать интересующие характеристики в заданных сечениях. На рис. 3, а представлен пример отображения гидродинамической картины сооружения, показывающий соотношение объемных долей водной и воздушной сред в пространстве камеры при наступлении установившегося движения. Красным цветом обозначены области, полностью заполненные жидкой фазой, синим — газообразной. Прочие цвета являются переходными зонами, где в различных пропорциях присутствуют обе фазы.

Превышение величины $Q_{пр}$ и перелив избыточной жидкости для камеры с кольцевым водосливом наблюдались во всех опытах, кроме 1.1 с $V_{вх} = 0,3$ м/с. Модельные расчеты для данной конструкции камеры показали, что в опытах 1.2–1.5 сброс жидкости происходил неравномерно по длине гребня. Основная масса воды переливалась через гребень внутреннего кольца водослива в местах, где наблюдалось поднятие уровня жидкости за счет удара о стенку кольцевого лотка. Далее сброс жидкости осуществлялся через наружный гребень. Выведение результатов в форме линий тока (рис. 3, б) позволило наглядно отразить постепенное увеличение глубины потока вдоль кольца от подводящего коллектора в сторону отводящего. Цвет линий тока также позволяет оценить скорость движения жидкости. Полученная картина истечения жидкости через гребни кольцевого водослива при моделировании в полной мере соответствовала ожидаемым результатам и принятым граничным условиям. Более того, реализованный процесс перелива жидкости совпадает с описанием результатов визуальных наблюдений движения потока на экспериментальных моделях разделительных камер с кольцевым водосливом. На основании этого данная модель была признана адекватной для получения численных значений расходов.

Превышение величины $Q_{пр}$ и перелив избыточной жидкости для камеры со спиралевидным водосливом также наблюдались во всех опытах, кроме 2.1 со скоростью входящего потока $V_{вх} = 0,2$ м/с. Из-за большого уклона спиралевид-

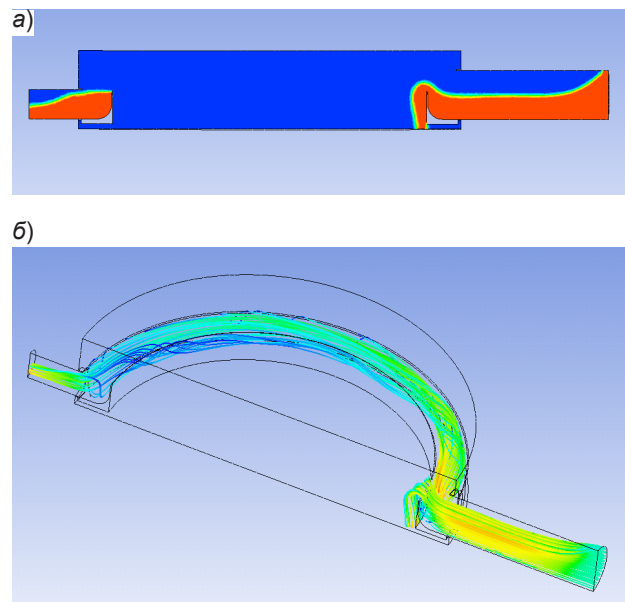


Рис. 3. Графическое отображение результатов моделирования опыта 1.2 камеры с кольцевым водосливом: а — гидродинамическая картина; б — линии тока жидкости

ного водослива наблюдалось дополнительное ускорение потока жидкости при протекании по нему. В связи с этим увеличивалась пропускная способность камеры, а также наблюдалось постепенное снижение уровня жидкости по длине. В целом результаты моделирования конструкции со спиралевидным водосливом также соответствовали ожидаемым.

Численная фиксация результатов моделирования проводилась в контрольных сечениях, соответствовавших граничным условиям: Q_p — на границе *Inlet*, $Q_{оч}$ — на границе *Outlet_1*, $Q_{сбр}$ — на границе *Outlet_2*. Результаты по расходам в контрольных сечениях для обеих моделей представлены на рис. 4.

На основании анализа и обработки результатов по расходам для рассматриваемых конструкций разделительных камер были получены графики изменения расходов, отводимых на очистку (рис. 5). Выявление данных зависимостей является одной из основных задач при изучении гидравлических характеристик разделительных камер.

Сопоставление графиков изменения расходов, полученных на основе результатов моделирования, с теоретическими данными позволяет сделать вывод о том, что исследуемые конструкции

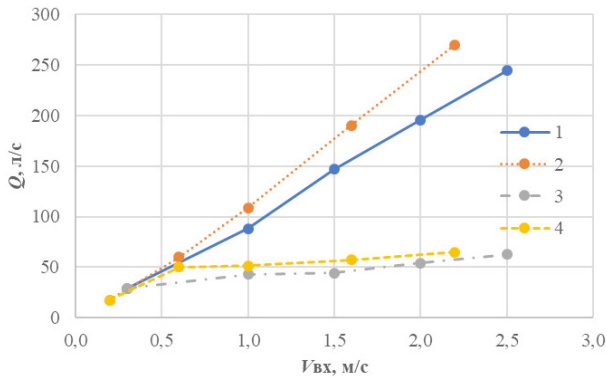


Рис. 4. Зависимость расходов в контрольных сечениях от скорости входящего потока $V_{вх}$: 1 — Q_p для камеры с кольцевым водосливом; 2 — Q_p для камеры со спиралевидным водосливом; 3 — $Q_{оч}$ для камеры с кольцевым водосливом; 4 — $Q_{оч}$ для камеры со спиралевидным водосливом

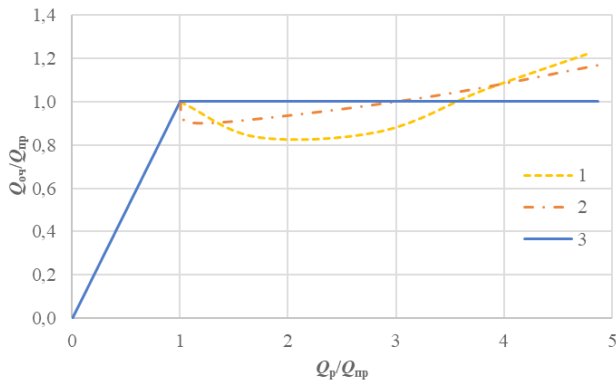


Рис. 5. Изменение расходов, отводимых на очистку, в разделительных камерах разных типов: 1 — камера с кольцевым водосливом; 2 — камера со спиралевидным водосливом; 3 — теоретическая прямая

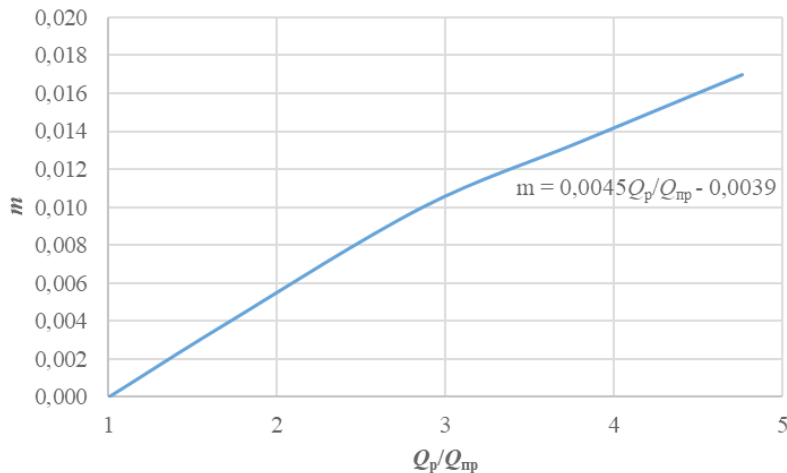


Рис. 6. Изменение коэффициента расхода водослива для разделительной камеры с кольцевым водосливом

являются весьма эффективными. Для камеры с кольцевым водосливом средняя величина отклонения от теоретической прямой составляет 13,3 % с максимальным значением 17,97 %. Новая конструкция со спиралевидным делителем показала еще более оптимистичные результаты: среднее отклонение 8,53 % при максимальном значении 14,5 %. Отметим, что максимальные отклонения для обеих конструкций разделительных камер наблюдаются при наибольшей тестируемой величине пропускаемого расхода. Данное явление свидетельствует о неустойчивости процесса деления при высокой нагрузке на сооружение. Подобная ситуация наблюдается и для других конфигураций разделительных камер [6].

Еще одной задачей исследования было определение коэффициента расхода водослива для разделительной камеры первого типа. Данный параметр рассчитывался по формуле (1) [10]. Сбрасываемый без очистки расход определялся по уравнению (2). Результаты расчета представлены на рис. 6.

$$Q_{сбр} = m\sqrt{2gH}^{3/2}l, \quad (1)$$

где

$$Q_{сбр} = Q_p - Q_{оч}. \quad (2)$$

На рис. 6 видно, что коэффициент расхода водослива увеличивается при возрастании значения отношения расчетного расхода к предельному при прочих равных параметрах конструкции. Данная зависимость описывается линейной фун-

кцией, уравнение которой также представлено на графике.

Заключение

В результате проведения исследования:

- 1) сформирован и опробован принципиальный подход, позволяющий изучить гидравлические характеристики разделительных камер различных конструкций для их дальнейшего применения в системе канализации;
- 2) разработана новая конструкция разделительной камеры со спиралевидным водосливом;
- 3) установлены и оценены зависимости расходов, отводимых на отчистку, для камер с кольцевым и со спиралевидным водосливом при различных скоростях входящего потока;
- 4) определен коэффициент расхода для разделительной камеры с кольцевым водосливом.

Литература

1. Алексеев, М. И., Кудрявцев, А. В. и Масаева, Т. Р. (1982). Ливнеспуск. Патент № SU983212A1.
2. Алексеев, М. И. и Курганов, А. М. (2000). Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий: учебное пособие. М.: АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 352 с.
3. Верещагина, Л. М. и Швецов, В. Н. (2016). Разъяснение отдельных положений Рекомендаций по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий и площадок предприятий. Водоснабжение и санитарная техника, № 1, сс. 50–58.
4. Гогоберидзе, М. И., Нижарадзе, Э. И. и Джалаганиа, Г. М. (1989). Регулирующий резервуар-ливнеспуск. Патент № SU1454932A1.
5. Дикаревский, В. С., Курганов, А. М., Нечаев, А. П. и Алексеев, М. И. (1990). Отведение и очистка поверхностных сточных вод: учебное пособие для вузов. Л.: Стройиздат, 224 с.
6. Кармазинов, Ф. В. (ред.) (2002). Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга. 2-е изд. СПб.: Новый журнал, 683 с.
7. Козак, Б., Яворска, М., Лагуд, Г. и Кузьмина, Т. Н. (2014). Управление дождевыми и тальными водами. В: III Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція “Сучасні технології в промисловому виробництві”. Суми: Сумський державний університет, сс. 42–43.
8. Кудрявцев, А. В. (1982). Разделительные камеры для полураздельной системы канализации. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Л.: Ленинградский инженерно-строительный институт.
9. Курганов, А. М. (1984). Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения: справочное пособие. М.: Стройиздат, 111 с.
10. Курганов, А. М. и Фёдоров, Н. Ф. (1973). Справочник по гидравлическим расчётам систем водоснабжения и канализации. Л.: Стройиздат, 408 с.
11. Репин, Б. Н. (ред.) (1995). Водоснабжение и водоотведение. Наружные сети и сооружения. М.: Высшая школа, 431 с.

12. Яковлев, С. В., Карелин, Я. А., Ласков, Ю. М. и Калищун, В. И. (1996). Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов. М.: Стройиздат, 591 с.

13. Abbas, A., Carnacina, I., Ruddock, F., Alkhaddar, R., Rothwell, G. and Andoh R. (2019). An innovative method for installing a separate sewer system in narrow streets. *Journal of Water Management Modeling*, Vol. 27, C467. DOI: 10.14796/JWMM.C467.

14. Cembrano, G., Quevedo, J., Salamero, M., Puig, V., Figueras, J. and Martí, J. (2004). Optimal control of urban drainage systems. A case study. *Control Engineering Practice*, Vol. 12, Issue 1, pp. 1–9. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00280-0.

15. Coppes, B. A. (2002). The challenges of stormwater management. *Water Engineering & Management*, November 2002, pp. 18–23.

16. Marsalek, J., He, C. (2013). Hydraulic optimization of a combined sewer overflow (CSO) storage facility using numerical and physical modeling. *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol. 8, Issue 1, pp. 76–87. DOI: 10.1139/S08-050.

References

1. Alekseyev, M. I., Kudryavtsev, A. V. and Masayeva, T. R. (1982). *Spillway for downpours*. Patent No. SU983212A1.
2. Alekseyev, M. I. and Kurganov, A. M. (2000). *Organization of surface (rain and snowmelt) runoff removal from urbanized areas: study guide*. Moscow: ASV Publishing House; Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 352 p.
3. Vereshchagina, L. M. and Shvetsov, V. N. (2016). Explanation of separate provisions of the Recommendations for designing the systems of the surface runoff from residential areas and industrial sites collection, disposal and treatment. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 1, pp. 50–58.
4. Gogoberidze, M. I., Nizharadze, E. I., and Dzhagalaniya, G. M. (1989). *Regulating reservoir-cum-rainfall drain*. Patent No. SU1454932A1.
5. Dikarevsky, V. S., Kurganov, A. M., Nechayev, A. P. and Alekseyev, M. I. (1990). *Drainage and treatment of surface wastewater: study guide for higher educational institutions*. Leningrad: Stroyizdat, 224 p.
6. Karmazinov, F. V. (ed.) (2002). *Discharge and treatment of waste waters in St. Petersburg. 2nd edition*. Saint Petersburg: Novy Zhurnal, 683 p.
7. Kozak, B., Jaworska, M., Lagod, G. and Kuzmina, T. N. (2014). Rainwater and meltwater management. In: *Third All-Ukrainian Inter-University Scientific and Technical Conference “Modern Technologies in Industrial Production”*. Sumy: Sumy State University, pp. 42–43.
8. Kudryavtsev, A. V. (1982). *Separation chambers for partially separate sewerage systems. PhD Thesis in Engineering*. Leningrad: Leningrad Civil Engineering and Construction Institute.
9. Kurganov, A. M. (1984). *Tables with parameters of the maximum rainfall intensity for determining the flow rates in wastewater disposal systems: reference book*. Moscow: Stroyizdat, 111 p.
10. Kurganov, A. M. and Fyodorov, N. F. (1973). *Reference book on hydraulic design of water supply and sewerage systems*. Leningrad: Stroyizdat, 408 p.
11. Repin, B. N. (ed.) (1995). *Water supply and sanitation. Outdoor networks and structures*. Moscow: Vysshaya Shkola, 431 p.
12. Yakovlev, S. V., Karelin, Ya. A., Laskov, Yu. M. and Kalitsun, V. I. (1996). *Wastewater disposal and treatment*.

Textbook for higher educational institutions. Moscow: Stroyizdat, 591 p.

13. Abbas, A., Carnacina, I., Ruddock, F., Alkhaddar, R., Rothwell, G. and Andoh R. (2019). An innovative method for installing a separate sewer system in narrow streets. *Journal of Water Management Modeling*, Vol. 27, C467. DOI: 10.14796/JWMM.C467.

14. Cembrano, G., Quevedo, J., Salamero, M., Puig, V., Figueras, J. and Martí, J. (2004). Optimal control of urban drainage systems. A case study. *Control Engineering Practice*, Vol. 12, Issue 1, pp. 1–9. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00280-0.

15. Coppes, B. A. (2002). The challenges of stormwater management. *Water Engineering & Management*, November 2002, pp. 18–23.

16. Marsalek, J., He, C. (2013). Hydraulic optimization of a combined sewer overflow (CSO) storage facility using numerical and physical modeling. *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol. 8, Issue 1, pp. 76–87. DOI: 10.1139/S08-050.

Авторы

Телятникова Анна Максимовна, аспирант

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kononova.a.m@lan.spbgasu.ru

Федоров Святослав Викторович, канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru

Кудрявцев Анатолий Валентинович, канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: argo14@mail.ru

Authors

Anna Maksimovna Telyatnikova, post-graduate student
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

E-mail: kononova.a.m@lan.spbgasu.ru

Svyatoslav Viktorovich Fedorov, PhD in Engineering, Associate Professor

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

E-mail: svyatoslavfedorov@mail.ru

Anatoly Valentinovich Kudryavtsev, PhD in Engineering, Associate Professor

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

E-mail: argo14@mail.ru