

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗЕРВУАРНОГО ПАРКА НА ПЛОЩАДКЕ ВОДОПРОВОДНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Федоров С. В., Столбихин Ю. В., Новикова А. М.

## MODELLING A GROUP OF RESERVOIRS AT A WATER PURIFICATION PLANT SITE

Fedorov S. V., Stolbikhin Yu. V., Novikova A. M.

### Аннотация

**Введение:** в статье рассматривается методика создания комплексной гидравлической модели системы водоснабжения, включающей в себя резервуарный парк с трубопроводной обвязкой, насосную станцию второго подъема, напорные водоводы и городскую сеть. Модель создана в программе EPANET 2.0. Модель является временной, позволяет учесть неравномерность водопотребления и оценить изменение уровней воды в резервуарах, изменение напоров в узлах, распределение расходов на участках сети. В статье показаны основные этапы конструирования модели, и приведен метод учета переливных расходов в резервуарах.

**Цель:** построение гидравлической модели системы водоснабжения в программе EPANET 2.0, обеспечивающей определение уровней воды в резервуарах чистой воды с учетом изменяющегося водопотребления населенного пункта, и оценка их взаимного функционирования. **Результаты:** на основании модельных расчетов были подтверждены данные службы эксплуатации действующего объекта, разработаны рекомендации по оптимизации работы системы. **Практическая значимость:** выработанный подход позволяет решать подобные задачи по расчету систем водоснабжения в проектных и эксплуатационных организациях.

**Ключевые слова:** EPANET 2.0, гидравлическая модель, резервуар чистой воды, модель водопотребления, моделирование, водоснабжение.

### Введение

С развитием населенных пунктов возрастает их водопотребление, что требует реконструкции водопроводных очистных сооружений [1, 2]. При этом резервуарный парк может не заменяться, а дополняться новыми резервуарами при реконструкции. В результате, после нескольких реконструкций на площадке очистных сооружений может находиться уже целая группа разных по объему резервуаров [3], объединенных в систему. При этом их взаимная работа может сопровождаться переливами, «передавливанием» воды из одного резервуара в другой, а также застоями

### Abstract

The paper considers a method of creating an integrated hydraulic model of a water supply system, including a group of reservoirs with piping, a second lift pumping station, pressure water conduits and a city water supply network. The model was built in the EPANET 2.0 program. This temporary model allows considering water consumption irregularity and assessing changes of water levels in reservoirs, changes of pressure in assemblies, and flow distribution at network sections. Main stages of model designing are described, and a method of accounting for overflow in reservoirs is presented. The purpose of the research is to create a hydraulic model of a water supply system in the EPANET 2.0 program, which would allow measuring water levels in fresh water tanks (reservoirs), taking into account the changing water consumption in a settlement, and assess the mutual functioning of reservoirs. Based on model calculations, the data provided by the organization maintaining the facility in operation are confirmed, recommendations on optimization of system performance are made. The practical relevance of the research lies in the fact that the developed approach allows solving similar problems related to engineering of water supply systems at design companies and operating organizations.

**Keywords:** EPANET 2.0, hydraulic model, fresh water tank, water consumption model, modelling, water supply.

жидкости, когда насосная станция постоянно забирает воду из одного резервуара, а в другом не обеспечивается сменяемость. Именно с такой инженерной проблемой столкнулись авторы статьи.

На рис. 1 показан план площадки с расположением резервуаров чистой воды (РЧВ 1-7). По технологической схеме вода на площадку подается по двум напорным водоводам диаметром 600 мм от очистных сооружений. Избыточное давление данных водоводов составляет 40 м вод. ст. Гашение данного напора осуществляется с помощью дисковых затворов, установленных в т. 1. Далее по системе трубопроводов вода распределяется

между резервуарами. Затем из резервуаров вода поступает в насосную станцию по трубопроводам диаметром 800 мм, откуда подается по двум водоводам диаметром 800 мм и одному водоводу 600 мм в городскую сеть (рис. 1). Указанные выше резервуары строились на площадке в разные периоды времени согласно их нумерации. В силу топографической особенности площадки резервуары находятся на разных высотах. В результате (по данным службы эксплуатации площадки) наблюдается ярко выраженная неравномерность работы емкостей, которая выражается в «перекосе» уровней воды в резервуарах (т. е. часть резервуаров быстро опорожняется, в то время как в других происходит аккумуляция расходов воды). Также одной из проблем было превышение напора в узлах учета ВУ-1, ВУ-2, от которых начинается городская сеть, более 60 м, что недопустимо по требованию СП31.13330 [4].

Кроме того, в часы минимального водопотребления отмечались переливы в резервуарах, и иногда — излив воды на рельеф.

#### Методы и материалы

Для решения данной проблемы было предложено создать гидравлическую модель площадки, включающую подводящие сети, резервуары, насосную станцию, напорные водоводы и сеть города (представленная в виде магистральных линий, образующих основные кольца). В целях получения исходных данных для моделирования и последующей реконструкции была произведена работа по обследованию сооружений системы, включавшая в себя спуск в резервуары, посещение насосной станции и спуск в камеру переключения (рис. 2).

В результате обследования резервуаров уточнялись отметки дна и верха сооружений, а также отводящих и подводящих трубопроводов. Ин-

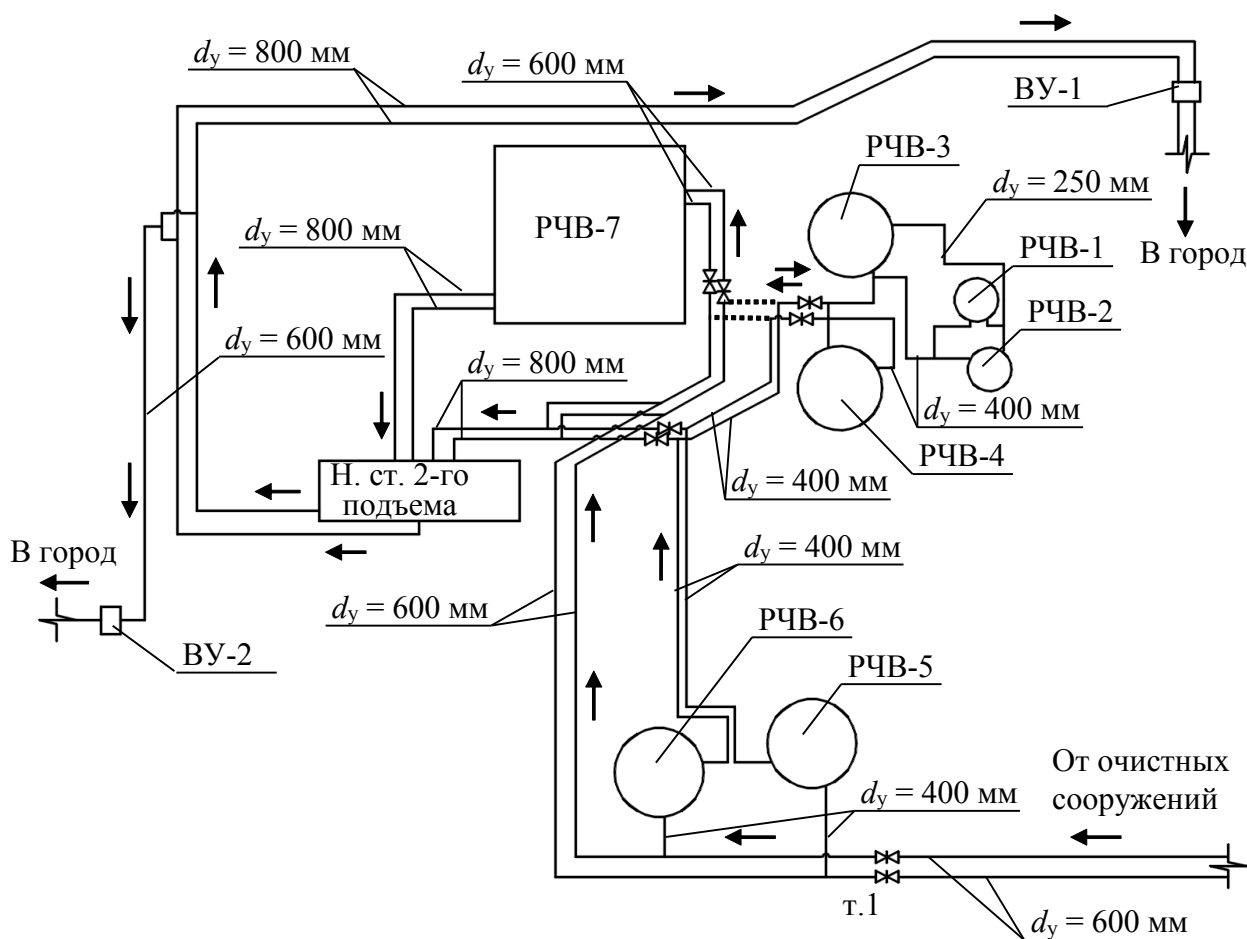


Рис. 1. Схема расположения резервуаров, водоводов и насосной станции



Рис. 2. Фотографии с обследования резервуаров

формация, полученная из обследования, представлена в табл. 1. По насосной станции были получены следующие данные: характеристики насосных агрегатов (насосы Д-2000-100-2 [5],  $H-Q$  характеристика которых была получена для подрезанного диаметра рабочего колеса по формулам пересчета, представленным в [6]), марки запорно-регулирующей и предохранительной арматуры, план трубопроводной обвязки, отметка пола машинного зала. В камере переключения уточнялись отметки положения водоводов.

Гидравлическая модель разрабатывалась в программе EPANET 2.0 [7, 8]. На сегодняшний день существует множество научных трудов, посвященных созданию гидравлических моделей в данной программе [9–12]. Очень часто инженерные задачи требуют какое-либо специфическое условие, которое напрямую, стандартным инструментарием программы не решить. Поэтому авторы исследований прибегают к использованию нестандартных сочетаний элементов для моделирования специфических для какой-либо системы процессов. Одним из направлений является выявление действительного расхода в узлах

кольцевой сети при недостаточном напоре, которое приводится в статьях [13–15].

Общий вид модели представлен на рис. 3. Узлы, трубопроводы, насосы задавались стандартными инструментами программы. Для комплексной оценки работы системы рассматривалась нестационарная задача, поэтому модель была выполнена временной, с учетом неравномерности часового водопотребления города. Время расчета составляло 30 дней. Неравномерность водопотребления задавалась путем задания коэффициентов неравномерности для каждого часа [16], которые представляют собой соотношение часового расхода к среднему. Данные коэффициенты прописывались в инструменте программы «временная модель». Кроме этого, в каждом узле городской сети выставлялся средний расход, и указывалась ссылка на номер «временной модели».

В программе была также смоделирована обвязка насосной станции с установкой четырех насосных агрегатов. Характеристика насосов Д-2000-100-2 перенесена из каталога в программу. На существующем напорном коллекторе насосной станции предусмотрены редукционные клапаны, понижающие давление до 60 м вод. ст.

Таблица 1

Отметки трубопроводов и уровней воды в резервуарах

Параметр	РЧВ-1	РЧВ-2	РЧВ-3	РЧВ-4	РЧВ-5	РЧВ-6	РЧВ-7
Отметка максимального уровня воды в резервуаре, м	18.48	18.48	18.43	18.47	18.99	18.70	13.5
Отметка подводящего трубопровода, м	14.00	14.00	15.18	16.24	18.89	18.88	12.3
Отметка отводящего трубопровода, м	14.00	14.00	15.05	15.02	15.09	15.24	7.68
Отметка дна резервуара, м	13.70	13.70	14.74	14.74	14.74	14.68	8.80

Работа этих клапанов также была учтена в модели клапанами типа «PRV».

Определенная сложность заключалась в моделировании работы резервуара. В ходе его эксплуатации в нем постоянно изменяется уровень воды за счет неравномерности подачи насосной станции. При достижении максимального уровня осуществляется сброс излишков воды по переливному трубопроводу. Эти процессы были смоделированы в EPANET 2.0 с помощью двух функциональных элементов программы: водонапорная башня и источник, которые между собой связываются переливным трубопроводом. В данном случае водонапорная башня играет роль резервуара для накопления воды и его опорожнения. А система «источник – трубопровод» выполняет роль канализационной сети, которая принимает избыток воды. Важно отметить, что переливной трубопровод функционирует по определенной схеме. Он открывается для тока воды только в момент достижения максимального уровня воды в водонапорной башне. Если уровень находится на отметке ниже максимального, то этот трубопровод закрыт. При переливе вода не имеет избыточного давления, и с этой целью отметка в приемном источнике задавалась равной максимальному уровню воды в водонапорной башне. Поэтому, чтобы избежать обратного тока воды из источника в водонапорную башню в режиме с опорожнением резервуара, нами и предусматривалась возможность отключения трубы. Реализация этого режима работы переливной трубы осуществлялась с помощью скрипта, который прописывался во вкладке «Управление» программы EPANET 2.0.

#### Результаты и обсуждение

В качестве результатов моделирования были получены схемы распределения расходов воды

в трубопроводной обвязке очистных сооружений и городской сети (рис. 3), свободные напоры в узлах потребления воды и во всех узлах стыковки трубопроводов на площадке очистных сооружений, графики изменения уровней воды в резервуарах РЧВ 1-7, графики расходов воды в переливных трубах (рис. 4). Все полученные графики отражали изменение исследуемых характеристик в течение 30-дневного срока. Далее подробно рассмотрим каждый результат модельного расчета.

На основании полученной картины распределения расходов было выявлено, что в часы максимального водопотребления большая часть расхода воды, приходящего на площадку, направляется в обход резервуаров (РЧВ-5, -6) по двум водоводам диаметром 600 мм напрямую к насосной станции и РЧВ-7 (см. рис. 1). В то же время в трубопроводной обвязке резервуаров 1–4 наблюдалась слабая циркуляция потоков воды, что свидетельствует о малом водообмене и невыполнении требования нормативной документации о необходимости полного водообмена в течение 48 часов [4]. По результатам расчета свободных напоров в узлах учета ВУ-1 и ВУ-2 было получено значение напора более 60 м, что подтвердило реально наблюдаемую ситуацию на практике (рис. 4, б). В диктующей точке водопроводной сети было получено значение напора 47–52 м в течение всего рассматриваемого срока, что соответствует условиям эксплуатации данной городской сети.

Моделирование уровней воды в резервуарах осуществлялось при условии отсутствия воды в них в начальный момент времени. Поэтому на графике (рис. 4, а), видно, что в течение первых 15 дней происходит постепенное заполнение резервуаров водой с момента начала эксплуатации. При этом присутствуют колебания уровня, свя-

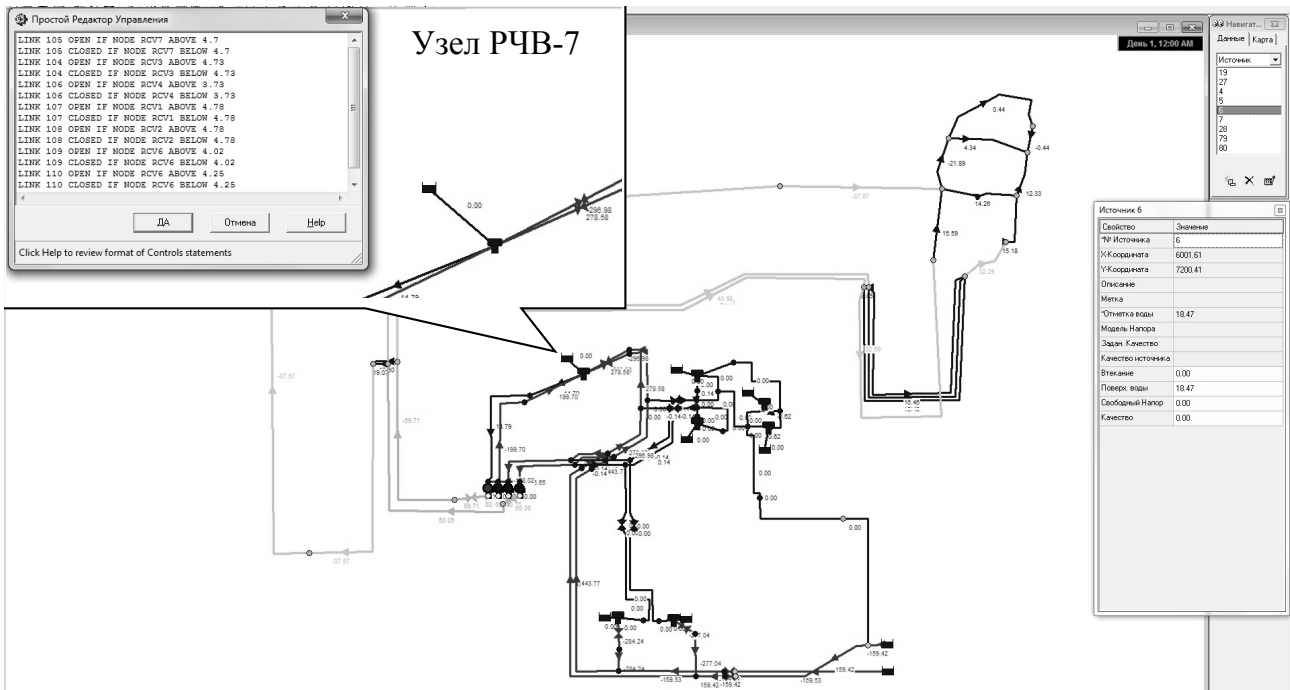


Рис. 3. Гидравлическая модель площадки и городской водопроводной сети

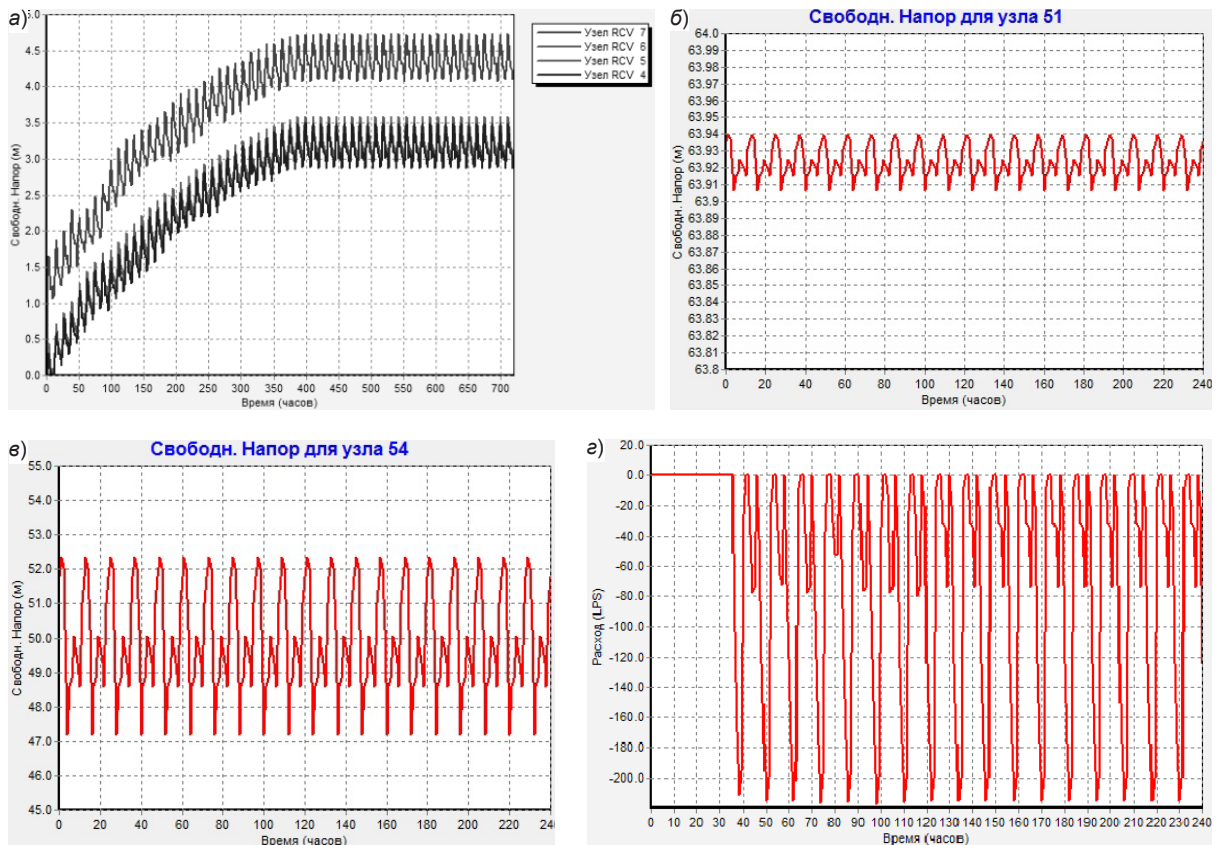


Рис. 4. а — изменение уровней воды в РЧВ 4-7 в течение 30 суток (отсчитаны от дна резервуаров); б — изменение напора в трубопроводе в узле учета ВУ-1 (статистика за 10 дней); в — изменение напора в диктующей точке водопроводной сети; г — расход воды в переливном трубопроводе в РЧВ-7 при поступлении на площадку максимального расхода

занные с неравномерностью потребления воды городом. После 15-го дня уровни воды в резервуарах достигают своего предельного значения, после чего диапазон изменения уровней с течением времени более не изменяется.

Анализ переливов показал, что при поступлении среднего расхода на площадку переливы во всех резервуарах отсутствовали. Но в случае поступления максимального расхода наблюдались переливы, наибольший из которых — в резервуаре РЧВ-7, величиной до 210 л/с.

Полученные результаты свидетельствуют об общей разбалансированности системы, наличии застойных зон, несоблюдении допустимых напоров в городской сети.

### Заключение

На основании проведенного моделирования были выявлены основные проблемы эксплуатации, и предложен ряд технических решений для улучшения работы резервуаров и установления требуемых напоров в городской сети (не более 60 м) [4]. Технические решения заключаются в отключении участков водоводов от РЧВ-6 до перемычки на насосную станцию, устройстве двух перемычек от обвязки РЧВ-3,4 до водоводов (показано пунктиром на рис. 1), и с использованием запорной арматуры на трубопроводах исключается подвод воды к насосной станции в обход РЧВ-7. Таким образом, организуется движение воды по «каскадному» принципу: от более высоко расположенных резервуаров к наиболее низкому. Изначально вода проходит через резервуары 5 и 6, и, пополняя резервуары 1–4, спускается к резервуару 7, откуда далее по двум водоводам диаметром 800 мм направляется в здание насосной станции. Используя разработанную модель, эти решения были проверены и подтверждена их рациональность.

Необходимо отметить, что в статье рассмотрен метод создания гидравлической модели системы водоснабжения с учетом работы резервуаров и насосной станции. Полученный опыт говорит о том, что создание таких комплексных моделей позволяет максимально приближенно оценить гидравлический режим работы сооружений с учетом неравномерности водопотребления, оценить возможные недостатки и предложить пути их устранения на этапе проектирования и эксплуатации.

### Литература

1. Родин Н. В., Трошкова Е. А., Григорук А. Н. и Бычков Д. А. (2014). Реконструкция скорых фильтров на водопроводных очистных сооружениях г. Тюмени. Водоснабжение и санитарная техника, № 6, сс. 25–31.
2. Щербаков В. И., Дроздов Е. В. и Помогаева В. В. (2013). Проблемы систем водоснабжения малых городов и сельских поселений. Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: «Высокие технологии. Экология», № 1, сс. 38–42.
3. Данилова Е. В. (2011). Водоканалу г. Чистополя — 100 лет. Водоснабжение и санитарная техника, № 11, сс. 59–63.
4. Минрегион России (2011). СП 31.13330.2012. Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. М.: Минрегион России, 123 с.
5. Римос (2018). Насосы двухстороннего входа Д 2000-100-2. [online] Доступно по ссылке: <http://www.rimos.ru/catalog/pump/12739> [Дата обращения 18.11.2018].
6. Васильев В. М., Федоров С. В. и Кудрявцев А. В. (2017). Насосы и насосные станции: учебное пособие. Ч. 1. СПб.: СПбГАСУ, 131 с.
7. Rossman L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 200 p.
8. EPA (2018). *EPANET. Application for modeling drinking water distribution systems*. [online] Доступно по ссылке: <https://www.epa.gov/water-research/epanet> [Дата обращения 18.11.2018].
9. Xu, Y., Zhang, X-Y. (2012). *Research on pressure optimization effect of high level water tank by drinking water network hydraulic models*. Procedia Engineering, 31, pp. 958–966. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1127>
10. Mohapatra, S., Sargaonkar, A., Labhasetwar, P. K. (2014). *Distribution network assessment using EPANET for intermittent and continuous water supply*. Water Resources Management, vol. 28, issue 11, pp. 3745–3759. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0707-y>
11. Kovalenko, Y., Alvarez, R., Gorev, N., Kodzheshirova I., Prokhorov, E. (2012). Zero flow problem in the EPANET solver. In: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA 2012, pp. 168–178.
12. Burger, G., Sitzenfrei, R., Kleidorfer, M., Rauch, W. (2016). Quest for a new solver for EPANET 2. Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 142, issue 3, pp. 04015065 1-11. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000596
13. Gorev, N. B., Kodzheshirova, I. F. (2013). Noniterative implementation of pressure-dependent demands using the hydraulic analysis engine of EPANET 2. Water Resources Management, vol. 27, issue 10, pp. 3623–3630. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0369-1>
14. Abdy Sayyed, M. A. H., Gupta, R., Tanyimboh, T. T. (2014). Modelling pressure deficient water distribution networks in EPANET. Procedia Engineering, vol. 89, pp. 626–631. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.487>
15. Jinesh Babu, K. S., Mohan, S. (2012). Extended period simulation for pressure-deficient water distribution network. Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 26, issue 4, pp. 498–505. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000160
16. Игнатчик, В. С., Саркисов, С. В. и Обвинцев В. А. (2017). Исследование коэффициентов часовой неравномер-

ности водопотребления. Вода и экология: проблемы и решения, № 2, сс. 27–39.

#### References

- Rodin N. V., Troshkova E. A., Grigoruk A. N., Bychkov D. A. (2014). Rekonstruktsiya skorykh filtrov na vodoprovodnykh ochistnykh sooruzheniyakh g. Tyumeni [Reconstruction of rapid sand filters at the Velizhany water treatment facilities of Tumen]. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 6, pp. 25–31. (in Russian).
- Shcherbakov V. I., Drozdov E. V., Pomogaeva V. V. (2013). Problemy sistem vodosnabzheniya malyykh gorodov i selskikh poseleniy [Problems of systems of water supply small cities and rural settlements]. *The Scientific Newsletter of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. High-tech Solutions. Ecology*, No. 1, pp. 38–42 (in Russian).
- Danilova E. V. (2011). Vodokanal g. Chistopolya — 100 let [The 100th Anniversary of Tchistopol Vodokanal]. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 11, pp. 59–63 (in Russian).
- Ministry of Regional Development of the Russian Federation (2011). *SP 31.13330.2012. Svod pravil. Vodosnabzheniye. Naruzhniye seti i sooruzheniya [Regulations SP 31.13330.2012. Water supply. Pipelines and potable water treatment plants]*. Moscow: Ministry of the Regional Development of the Russian Federation, 123 p. (in Russian).
- Rimos (2018). *Nasosy dvukhstoronnego vkhoda D 2000-100-2 [D 2000-100-2 double entry pumps]*. Available at: <http://www.rimos.ru/catalog/pump/12739> (in Russian).
- Vasilyev V. M., Fyodorov S. V., Kudryavtsev A. V. (2017). *Nasosy i nasosniye stantsii: uchebnoye posobiye. Ch. 1 [Pumps and pumping stations: textbook. Part 1]*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 131 p. (in Russian).
- Rossman L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 200 p.
- EPA (2018). *EPANET. Application for modeling drinking water distribution systems*. Available at: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- Xu, Y., Zhang, X-Y. (2012). *Research on pressure optimization effect of high level water tank by drinking water network hydraulic models*. *Procedia Engineering*, 31, pp. 958–966. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1127>
- Mohapatra, S., Sargaonkar, A., Labhasetwar, P. K. (2014). *Distribution network assessment using EPANET for intermittent and continuous water supply*. *Water Resources Management*, vol. 28, issue 11, pp. 3745–3759. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0707-y>
- Kovalenko, Y., Alvarez, R., Gorev, N., Kodzhespirova, I., Prokhorov, E. (2012). *Zero flow problem in the EPANET solver*. In: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA 2012, pp. 168–178.
- Burger, G., Sitzenfrei, R., Kleidorfer, M., Rauch, W. (2016). *Quest for a new solver for EPANET 2*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 142, issue 3, pp. 04015065 1-11. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000596
- Gorev, N. B., Kodzhespirova, I. F. (2013). *Noniterative implementation of pressure-dependent demands using the hydraulic analysis engine of EPANET 2*. *Water Resources Management*, vol. 27, issue 10, pp. 3623–3630. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0369-1>
- Abdy Sayyed, M. A. H., Gupta, R., Tanyimboh, T. T. (2014). *Modelling pressure deficient water distribution networks in EPANET*. *Procedia Engineering*, vol. 89, pp. 626–631. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.487>
- Jinesh Babu, K. S., Mohan, S. (2012). *Extended period simulation for pressure-deficient water distribution network*. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 26, issue 4, pp. 498–505. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000160
- Ignatchik, V. S., Sarkisov, S. V., Obvintsev, V. A. (2017). *Issledovaniye koeffitsientov chasovoy neravnomernosti vodopotrebleniya [Research of water consumption hour inequality coefficients]*. *Water and Ecology: Problems and Solutions*, No. 2, pp. 27–39 (in Russian).

#### Авторы

**Федоров Святослав Викторович**, канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [svyatoslavfedorov@mail.ru](mailto:svyatoslavfedorov@mail.ru)

**Столбихин Юрий Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [stolbikhin@bk.ru](mailto:stolbikhin@bk.ru)

#### Новикова Антонина Михайловна

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [antonina.amin2016@yandex.ru](mailto:antonina.amin2016@yandex.ru)

#### Authors

**Fedorov Sviatoslav Viktorovich**, Ph. D. in Engineering, Associate Professor

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [Svyatoslavfedorov@mail.ru](mailto:Svyatoslavfedorov@mail.ru)

**Stolbikhin Iurii Vyacheslavovich**, Ph. D. in Engineering, Associate Professor

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [Stolbikhin@bk.ru](mailto:Stolbikhin@bk.ru)

#### Novikova Antonina Mikhailovna

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [Antonina.amin2016@yandex.ru](mailto:Antonina.amin2016@yandex.ru)