

ОБ АКТУАЛЬНОСТИ РАЗРАБОТКИ СПРАВОЧНЫХ ПОСОБИЙ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ИЗНОШЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

О. А. Продоус¹, Д. И. Шлычков², А. А. Шестаков², А. Г. Челоненко²

¹ Независимый эксперт по водоснабжению и канализации, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

THE RELEVANCE OF REVISING REFERENCE MANUALS ON HYDRAULIC CALCULATION OF WORN-OUT ENGINEERING NETWORKS OF URBAN INFRASTRUCTURE

Oleg A. Prodous¹, Dmitry I. Schlychkov², Aleksandr A. Shestakov², Andrey G. Chelonenko²

¹ Independent expert in Water Supply and Sewerage, St. Petersburg, Russia

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Аннотация. При проектировании и реконструкции инженерных сетей городской инфраструктуры проектные организации для гидравлического расчета трубопроводов используют набор классических формул, которые не учитывают изменения гидравлического потенциала в процессе эксплуатации, что приводит к значительным погрешностям. Этим обоснована необходимость разработки и уточнения справочных пособий по гидравлическому расчету изношенных металлических водопроводных, канализационных и тепловых сетей городской инфраструктуры. На конкретном примере графически продемонстрировано влияние толщины слоя внутренних отложений на точность гидравлического расчета труб, то есть на определение параметров их гидрав-

Abstract. When designing and reconstructing engineering networks of urban infrastructure, design organizations use a set of classical formulas for hydraulic calculation of pipelines. They don't take into account changes in hydraulic potential during operation, and it leads to significant errors. This justifies the need to develop and refine reference manuals for hydraulic calculation of worn-out metal water supply, sewerage and heating networks of urban infrastructure. A specific example graphically demonstrates the influence of the thickness of the layer of internal deposits on the accuracy of the hydraulic calculation of pipes, i.e. on the determination of the parameters of their hydraulic potential. Based on the proposed methods of hydraulic calculation of pipes, we proved the

лического потенциала. На основе предлагаемых методик гидравлического расчета труб доказана актуальность доработки специальных справочных пособий, учитывающих фактические изменения значений гидравлических характеристик металлических трубопроводов в процессе их эксплуатации, в частности, значение коэффициента гидравлической эффективности трубопровода.

Ключевые слова: водопроводы из стальных труб, гидравлический расчет, толщина слоя внутренних отложений, точность гидравлического расчета труб

Для цитирования: Об актуальности разработки справочных пособий по гидравлическому расчету изношенных инженерных сетей городской инфраструктуры / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков, А. А. Шестаков, А. Г. Челоненко. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-64-70. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 64–70.

For citation: Prodous, O. A., Schlychkov, D. I., Shestakov, A. A., & Chelonenko, A. G. (2023). The relevance of revising reference manuals on hydraulic calculation of worn-out engineering networks of urban infrastructure. Architecture, Construction, Transport, (4(106)), pp. 64-70. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-64-70.

Введение

Образование внутренних отложений на стенках металлических водопроводов связано с электромагнитными процессами, протекающими в природной воде. Слой внутренних отложений на рабочей поверхности труб не имеет законченной фиксированной структуры, так как она зависит от физико-химического состава питьевой воды и длительности эксплуатации трубопровода.

Износ водопроводной сети – состояние внутренней поверхности труб (из любого материала), характеризующее значениями фактических характеристик их гидравлического потенциала: $d_{\text{вн}}^{\phi}$, V_{ϕ} , i_{ϕ} [1, 2]. Гидравлический потенциал труб – оценочный эксплуатационный критерий, характеризующий совокупностью значений расхода q , л/с, давления РН, МПа, фактической скорости движения жидкости V_{ϕ} , м/с, и фактических потерь напора на преодоление сопротивлений по длине h_l^{ϕ} , м ($h_l^{\phi} = i_{\phi} \cdot l$, м, при $l = 1$ п. м $h_l^{\phi} = i_{\phi}$, м).

При эксплуатации инженерных сетей городской инфраструктуры из металлических труб (се-

levance of revise the special reference manuals with taking into account actual changes in the values of hydraulic characteristics of metal pipelines in the process of their operation, in particular, the value of the coefficient of hydraulic efficiency of the pipeline.

Key words: water pipes made of steel and cast iron pipes, hydraulic calculation, thickness of the layer of internal deposits, accuracy of hydraulic calculation of pipes

тей водопровода, канализации, тепловых сетей) на их внутренней поверхности образуется слой отложений, изменяющий значение характеристик гидравлического потенциала труб: фактического внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}^{\phi}$, фактической скорости движения жидкости V_{ϕ} и фактических потерь напора по длине труб h_l , характеризующих их гидравлическим уклоном i_{ϕ} ($h_l = i_{\phi} \cdot l$, м, при $l = i_{\phi}$).

На рис. 1 приведены фрагменты стальных труб с внутренними отложениями в водопроводных, канализационных и тепловых сетях городской инфраструктуры.

Согласно [3], слой отложений δ_{ϕ} на внутренних стенках труб не является постоянной величиной и изменяется по толщине во времени, зависит от качества транспортируемой по трубам среды, скоростного режима эксплуатации и величины заряда частиц молекул воды. Это характерно как для напорных металлических труб, так и для напорных коллекторов [4–6].

Вопросы гидравлического расчета и способы предотвращения образования внутренних

a)



b)



c)



Рис. 1. Фрагменты внутренних отложений на водопроводных (а), канализационных (б), тепловых (с) сетях

Fig. 1. Fragments of internal deposits on water supply (a), sewerage (b), heating (c) networks

отложений на стенках водопроводных труб рассматривались профессором Ф. А. Шевелевым в 1953 г. [7], канд. техн. наук Б. Л. Рейзиным в 1979 г. [8] и другими учеными. Таблицы для гидравлического расчета металлических водопроводных труб, разработанные Ф. А. Шевелевым по резуль-

татам проведенных исследований, используются проектными организациями до сих пор. Анализ значений из справочных пособий Ф. А. Шевелева [9] показал, что в отдельных случаях эти значения имеют расхождение с фактическими показателями до 20 % [3].

Авторы статьи, опираясь на результаты анализа зависимости потери напора по длине [10], объясняют такое несоответствие тем, что Ф. А. Шевелев проводил исследования неновых стальных водопроводных труб с толщиной фактического слоя внутренних отложений $\delta_{\phi} = 1$ мм. Результаты гидравлических исследований были обобщены и распространены на весь сортимент труб.

Сравнительный анализ характеристик гидравлического потенциала изношенных металлических водопроводных труб [11] показал, что в своих исследованиях Ф. А. Шевелев не учитывал влияние изменяющейся во времени толщины слоя внутренних отложений δ_{ϕ} , оказывающей основное влияние на результат гидравлического расчета труб, то есть на значение фактических потерь напора h , на сопротивление по длине. В связи с этим в 2021 г. коллективом ученых из Санкт-Петербурга было разработано и выпущено первое издание Справочного пособия для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями [12]. Пособие составлено по уточненной авторами формуле Ф. А. Шевелева, учитывающей фактическое (измеренное) значение δ_{ϕ} , входящее в расчетную зависимость, имеющую вид:

$$i_{\phi} = 0.00107 \frac{V_{\phi}^2}{(d_{\phi}^{\phi})^{1.3}} = 0.00107 \frac{V_{\phi}^2}{[(d_n - 2S_p) - 2\delta_{\phi}]^{1.3}}, \text{ мм / м} \quad (1)$$

где V_{ϕ} – фактическая скорость движения воды в трубе с отложениями, м/с,

d_n – наружный диаметр трубы согласно ГОСТу, м;

S_p – толщина стенки трубы по ГОСТу, м;

δ_{ϕ} – фактическая толщина слоя внутренних отложений в трубе, м.

В справочном пособии [12] приведены таблицы с гидравлическими параметрами для всех выпускаемых диаметров металлических труб с толщиной слоя внутренних отложений до 30 мм включительно.

Так как при гидравлическом расчете металлических инженерных сетей по формуле Ф. А. Шевелева не учитывается фактический слой отложений, что ведет к погрешностям, авторы считают необходимым уточнить характеристики гидравлического потенциала труб и при расчете учитывать значение гидравлического коэффициента эффективности эксплуатации трубопровода $K_{эф}$, зависящего от фактической толщины слоя внутренних отложений δ_ϕ . По величине этого коэффициента можно будет объективно судить о необходимости дальнейшего использования металлических труб, имеющих $K_{эф} \leq 0.8$. Это позволит сократить срок разработки проектов реконструкции трубопроводов из стали и серого чугуна.

Объект и методы исследования

На конкретном примере сравним значения характеристик гидравлического потенциала труб. Проанализируем значения гидравлических характеристик водопроводных электросварных труб по ГОСТ 10704-91¹ диаметром $d_n = 325$ мм ($S_p = 7.0$ мм) по справочным пособиям [9] и [12]. Построим для сравнения графики зависимости $i_\phi = f(\delta_\phi)$ и рассчитаем процент расхождения характеристик гидравлического потенциала для сравниваемых труб. Расход $q = 120$ л/с (0.120 м³/с). Толщина слоя отложений в трубах – 17 мм (0.017 м).

В таблице 1 приведены гидравлические характеристики труб при толщине отложений 17 мм.

Результаты и обсуждение

По справочному пособию [12] определяют значения фактического внутреннего диаметра труб $d_{вн}^\phi$, фактической скорости V_ϕ и фактического гидравлического уклона i_ϕ . Результаты значений гидравлических характеристик труб для заданных условий задачи представлены в таблице 2.

Таблица 1

Table 1

Сравнение значений гидравлических характеристик труб по разным расчетным зависимостям при толщине слоя отложений 17 мм
Comparison of values of hydraulic characteristics of pipes according to different calculation dependences at 17 mm thickness of deposit layer

Значения характеристик гидравлического потенциала электросварных водопроводных труб диаметром $d_n = 325$ мм		
по справочному пособию [9] (Ш)		
$d_{вн}^{\phi(Ш)} *$, м	$V_\phi^{(Ш)} *$, м / с	$1000 i_\phi^{Ш}$, мм / м
0.309	1.58	12.2
по справочному пособию [12] (П)		
$d_{вн}^{\phi(П)} *$, м	$V_\phi^{(П)} *$, м / с	$1000 i_\phi^{П}$, мм / м
0.277	1.96	20.61

$$*d_{вн}^\phi = (d_n - 2S_p) - 2\delta_\phi, \quad (2)$$

$$V_\phi = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot (d_{вн}^\phi)^2}, \quad (3)$$

$$i_\phi = 0.00107 \frac{V_\phi^2}{\pi \cdot (d_{вн}^\phi)^{1.3}}. \quad (4)$$

Для приведенного примера большое расхождение значений характеристик труб (таблица 1) может быть подтверждено графиком зависимости $i_\phi = f(\delta_\phi)$ (рис. 2), построенным по данным таблицы 2 для разной толщины слоя отложений δ_ϕ .

Графики зависимости $i_\phi = f(\delta_\phi)$ подтверждают необходимость обязательного учета при гидравлическом расчете фактической толщины слоя внутренних отложений в металлических трубопроводах инженерных сетей.

Анализ значений характеристик труб, приведенных в таблице 2, показывает их существенное расхождение, что объясняется неучетом величины

¹ ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент = Electrically welded steel line-weld tubes. Range : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 15.11.91 № 1743 : взамен ГОСТ 10704-76 : дата введения 1993-01-01 / разработан и внесен Министерством металлургии СССР. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001409> (дата обращения: 02.09.2023).

Таблица 2
Table 2

Изменение значений характеристик труб при разных значениях δ_ϕ
Variation of values of pipe characteristics at different values of δ_ϕ

Толщина слоя отложений δ_ϕ , мм	Сравнение результатов расчета характеристик труб по разным справочным пособиям					
	$d_{\text{вн}}^{\phi(\text{Ш})}$, м	$V_\phi^{(\text{Ш})}$, м/с	$i_\phi^{(\text{Ш})}$, мм/м	$d_{\text{вн}}^{\phi(\text{П})}$, м	$V_\phi^{(\text{П})}$, м/с	$i_\phi^{(\text{П})}$, мм/м
0	0.311	1.58	0.01399	0.311	1.58	0.01399
5	0.309	1.69	0.01407	0.301	1.69	0.01456
10	0.309	0.81	0.01614	0.291	1.81	0.01745
15	0.309	1.94	0.01854	0.281	1.94	0.02097
20	0.309	2.08	0.02131	0.271	2.08	0.02527

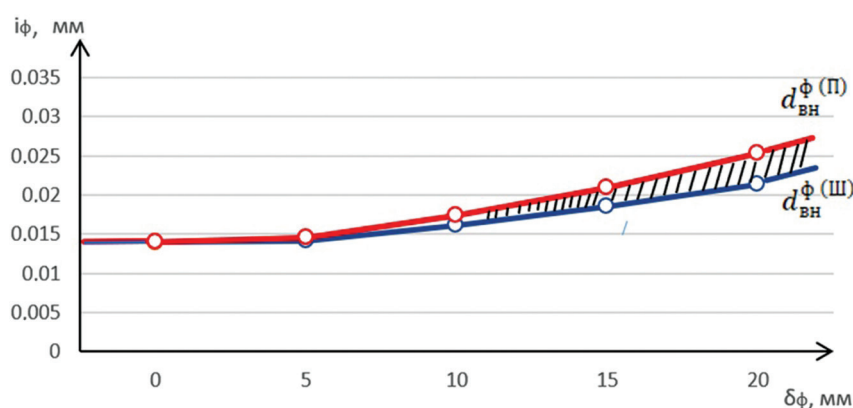


Рис. 2. График зависимости $i_\phi = f(\delta_\phi)$ для трубы $d_n = 325$ мм
Fig. 2. Dependence diagram $i_\phi = f(\delta_\phi)$ for pipe $d_n = 325$ mm

значения $\delta_\phi > 1.0$ мм при расчете по формуле (3).

Таким образом, можно утверждать, что гидравлический расчет напорных сетей водоснабжения, канализации и тепловых сетей из металлических труб должен производиться по формулам, учитывающим изменение величины их фактического внутреннего диаметра, который изменяется в процессе эксплуатации за счет образования слоя внутренних отложений в трубах (рис. 1) [13, 14].

Изменение фактического внутреннего диаметра труб $d_{\text{вн}}^\phi$ приводит к увеличению фактической скорости движения жидкости V_ϕ и, как следствие, увеличению потерь напора на сопротивление по длине h_l (повышению энергопотребления насосного оборудования) [15–17].

Выводы

Использование для гидравлического расчета неновых металлических водопроводных

труб формулы профессора Ф. А. Шевелева (формулы (3)) приводит к погрешностям. Для рассмотренной в данном исследовании задачи они составили 3.5–18.6 % в зависимости от скорости движения жидкости. Поэтому авторами рекомендовано:

- провести специальные НИР, целью которых будет разработка методики гидравлической оценки эффективности эксплуатации инженерных сетей городской инфраструктуры для принятия обоснованного решения о выводе из эксплуатации конкретного участка сети;
- доработать существующие справочные пособия для проектных и эксплуатирующих организаций по гидравлическому расчету металлических водопроводных, канализационных и тепловых сетей с внутренними отложениями с возможностью прогнозирования остаточного периода их эксплуатации.

Библиографический список

1. Продоус, О. А. Особенности гидравлического расчета водопроводов из металлических, полимерных и металлополимерных труб. Терминологический словарь по наружным сетям водоснабжения и канализации / О. А. Продоус, П. П. Якубчик, Д. И. Шлычков. – Москва : Издательство «Перо», 2023. – 288 с. – Текст : непосредственный.
2. Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков, П. П. Якубчик, С. В. Пархоменко. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 6. – С. 738–746.
3. Продоус, О. А. Гидравлический расчет сетей водоотведения с внутренними отложениями / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2022. – 120 с. – Текст : непосредственный.
4. Predicting sedimentation in urban sewer conduits / Y. H. Song, R. Yun, E. H. Lee, J. H. Lee. – DOI 10.3390/w10040462. – Текст : электронный // Water. – 2018. – 10(4):462.
5. Lange, R. L. Sedimentation dynamics in combined sewer systems / R. L. Lange, M. Wichern. – DOI 10.2166/wst.2013.278. – Текст : электронный // Water Sci Technol. – 2013. – 68(4):756-62.
6. Banasiak, R. Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments / R. Banasiak. – DOI 10.2166/wst.2008.287. – Текст : электронный // Water Sci Technol. – 2008. – 57(11):1743-8.
7. Шевелев, Ф. А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. – Москва : Госстройиздат, 1953. – 207 с. – Текст : непосредственный.
8. Рейзин, Б. Л. Коррозия и защита коммунальных водопроводов. – Москва : Стройиздат, 1979. – 308 с. – Текст : непосредственный.
9. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. – Москва : Издательский дом «Бастет», 2020. – 428 с.
10. Фоминых, А. В. Зависимость коэффициента потерь на трение по длине трубы в гидравлических системах АПК / А. В. Фоминых, А. В. Тельминов, Н. А. Ковшова. – Текст : непосредственный // Вестник Курганской ГСХА. – 2018. – № 3(27). – С. 79–82.
11. Новиков, С. В. Перспективы применения стальных труб с полимерным покрытием в системах ЖКХ / С. В. Новиков. – Текст : непосредственный // Территория Нефтегаз. – 2007. – № 11. – С. 28–31.
12. Продоус, О. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями : Справочное пособие / О. А. Продоус, А. А. Шипилов, П. П. Якубчик. – Москва : Издательство «Перо», 2021. – 238 с. – Текст : непосредственный.
13. Schwermer, C. U. Calculating expected effects of treatment effectivity and river flow rates on the contribution of WWTP effluent to the ARG load of a receiving river / C. U. Schwermer, W. Uhl. – DOI 10.1016/j.jenvman.2021.112445. – Текст : непосредственный // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 288. – P. 112445.
14. Braga, A. S. A novel monitoring scheme to detect iron oxide particle deposits on the internal surface of PVC drinking water pipes / A. S. Braga, Y. Filion. – DOI 10.1039/D1EW00614B. – Текст : непосредственный // Environmental Science: Water Research & Technology. – 2021. – Vol. 7. – No. 11. – P. 2116–2128.
15. Орлов, В. А. Восстановление ветхих трубопроводов предварительно сжатыми полимерными трубами / В. А. Орлов, К. Е. Хренов, И. О. Богомолова. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2014. – № 2. – С. 105–113.
16. Харькин, В. А. Разработка системного подхода и оптимизация эксплуатации безнапорных водоотводящих сетей : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Харькин Владислав Альбертович. – Москва, 2003. – 197 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Prodous, O. A., Yakubchik, P. P., & Shlychkov, D. I. (2023). Osobennosti gidravlicheskogo rascheta vodoprovodov iz metallicheskih, polimernykh i metallopolimernykh trub. Terminologicheskii slovar' po naruzhnym setyam vodosnabzheniya i kanalizatsii. Moscow, "Pero" Publ., 288 p. (In Russian).
2. Prodous, O. A., Shlychkov, D. I., Jakubchik, P. P., & Parkhomenko, S. V. (2022). Influence of the thickness of the layer of internal deposits in pipelines of water supply and discharge systems on their remaining service life. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture], 17(6), pp. 738-746. (In Russian). DOI 10.22227/1997-0935.2022.6.738-746.
3. Prodous, O. A., & Shlychkov, D. I. (2022). Gidravlicheskiy raschet setey vodootvedeniya s vnutrennimi otlozheniyami. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 120 p. (In Russian).

4. Song, Y. H., Yun, R., Lee, E. H., & Lee, J. H. (2018). Predicting sedimentation in urban sewer conduits. *Water*, 10(4):462. (In English). DOI 10.3390/w10040462.
5. Lange, R. L., & Wichern, M. (2013). Sedimentation dynamics in combined sewer systems. *Water Sci Technol*, 68(4):756-62. (In English). DOI 10.2166/wst.2013.278.
6. Banasiak, R. (2008). Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments. *Water Sci Technol*, 57(11):1743-8. (In English). DOI 10.2166/wst.2008.287.
7. Shevelev, F. A. (1953). Issledovanie osnovnykh gidravlicheskiy zakonov turbulentnogo dvizheniya v trubakh. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 207 p. (In Russian).
8. Reyzin, B. L. (1979). Korroziya i zashchita kommunal'nykh vodoprovodov. Moscow, Stroyizdat Publ., 308 p. (In Russian).
9. Shevelev, F. A., & Shevelev, A. F. (2020). Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub. Spravochnoe posobie. Moscow, Izdatel'skiy dom "Bastet", 428 p. (In Russian).
10. Fominykh, A. V., Telminov, A. V., & Kovshova, N. A. (2018). The dependence of the coefficient of friction losses along the length of the pipe in hydraulic systems of the agro-industrial complex. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*, (3(27)), pp. 79-82. (In Russian).
11. Novikov, S. V. (2007). Perspektivy primeneniya stal'nykh trub s polimernym pokrytiem v sistemakh ZhKKh. *Territoriya Neftegaz*, (11), pp. 28-31. (In Russian).
12. Prodous, O. A., Shipilov, A. A., Yakubchik, P. P. (2021). Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub iz stali i serogo chuguna s vnutrennimi otlozheniyami. Spravochnoe posobie. Moscow, Izdatel'stvo "Pero", 238 p. (In Russian).
13. Schwermer, C. U., & Uhl, W. (2021). Calculating expected effects of treatment effectivity and river flow rates on the contribution of WWTP effluent to the ARG load of a receiving river. *Journal of Environmental Management*, (288), P. 112445. (In English). DOI 10.1016/j.jenvman.2021.112445.
14. Braga, A. S., & Filion, Y. (2021). A novel monitoring scheme to detect iron oxide particle deposits on the internal surface of PVC drinking water pipes. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 7(11), pp. 2116-2128. (In English). DOI 10.1039/D1EW00614B.
15. Orlov, V. A., Chrenov, K. E., & Bogomolova, I. O. (2014). The restoration of the dilapidated pipelines using compressed plastic pipes. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, (2), pp. 105-113. (In Russian).
16. Khar'kin, V. A. (2003). Razrabotka sistemnogo podkhoda i optimizatsiya ekspluatatsii beznapornykh vodootvodyashchikh setey. Diss. dokt. tekhn. nauk. Moscow, 197 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Продоус Олег Александрович, д-р техн. наук, профессор, независимый эксперт по водоснабжению и канализации, e-mail: pro@enco.su. ORCID 0000-0003-0389-3695

Шлычков Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: SHlyichkovDI@mgsu.ru. ORCID 0000-0003-0210-2695

Шестаков Александр Анатольевич, аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: 891032801715321555@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4474-7411

Челоненко Андрей Геннадьевич, магистр кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: andreicelonenco@mail.ru. ORCID 0000-0003-3349-8442

Information about the authors

Oleg A. Prodous, D. Sc. in Engineering, Professor, Independent Expert in Water Supply and Sewerage, e-mail: pro@enco.su. ORCID 0000-0003-0389-3695

Dmitry I. Shlychov, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Water Supply and Water Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering, e-mail: SHlyichkovDI@mgsu.ru. ORCID 0000-0003-0210-2695

Alexander A. Shestakov, Postgraduate at the Department of Water Supply and Water Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering, e-mail: 891032801715321555@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4474-7411

Andrey G. Chelonenko, Graduate Student at the Department of Water Supply and Water Disposal, National Research Moscow State University of Civil Engineering, e-mail: andreicelonenco@mail.ru. ORCID 0000-0003-3349-8442

*Получена 09 ноября 2023 г., одобрена 07 декабря 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 09 November 2023, Approved 07 December 2023, Accepted for publication 15 December 2023*