

УДК 656.696

Оценка эффективности эксплуатации инженерно-сетевой компоненты инфраструктуры железнодорожного транспорта

О. А. Продоус, А. В. Кабанов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Продоус О. А., Кабанов А. В. Оценка эффективности эксплуатации инженерно-сетевой компоненты инфраструктуры железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 492–498. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-492-498

Аннотация

Цель: Показать на конкретном примере практическое использование методики количественной оценки продолжительности периода остаточной эксплуатации изношенных металлических трубопроводов инженерно-сетевой компоненты транспортно-технологических сетей железнодорожного транспорта, сетей метрополитенов, городских сетей и сетей промышленного транспорта. **Методы исследований:** Для оценки технического состояния изношенных труб использованы расчетные зависимости для металлических труб с внутренними отложениями. **Результаты обсуждения:** Для конкретного примера приведена методика оценки и рассчитана продолжительность периода эксплуатации. Введено понятие коэффициента эффективности эксплуатации, являющегося важным аспектом для обеспечения надежности и безопасности трубопроводных систем различного назначения. **Заключение:** Предложено оценивать эффективность эксплуатации изношенных трубопроводов инженерно-сетевой компоненты инфраструктуры железнодорожного транспорта по величине коэффициента эффективности эксплуатации труб, зависящего от толщины слоя их внутренних отложений. **Выводы:** Обоснована необходимость разработки специальных таблиц для гидравлического расчета изношенных металлических сетей железнодорожной инфраструктуры, и предложено включить в действующие нормативы количественные нормативы.

Ключевые слова: Инженерно-сетевая компонента инфраструктуры железнодорожного транспорта, металлические сети водоснабжения, теплоснабжения и канализации, оценка эффективности эксплуатации.

Введение

Металлические трубопроводы инженерно-сетевой компоненты инфраструктуры железнодорожного транспорта в процессе их эксплуатации подвергаются образованию слоя внутренних отложений, изменяющегося во времени, как показано на рис. 1.

Все инженерные сети железнодорожного транспорта страны выполнены из соображений обеспечения безопасности их работы в основном из металлических труб. Отсутствие защитных покрытий на внутренней поверхности стальных

и чугунных труб приводит в процессе их эксплуатации к образованию слоя отложений (рис. 1).

Компонентами транспортно-технологических сетей железнодорожного транспорта являются:

- железнодорожные пути и комплекс путевого хозяйства со всей инфраструктурой;
- средства автоматики и телемеханики;
- комплекс сетей энергоснабжения и электрификации железных дорог;
- системы подачи и распределения воды между компонентами транспортно-технологических сетей железнодорожного транспорта;

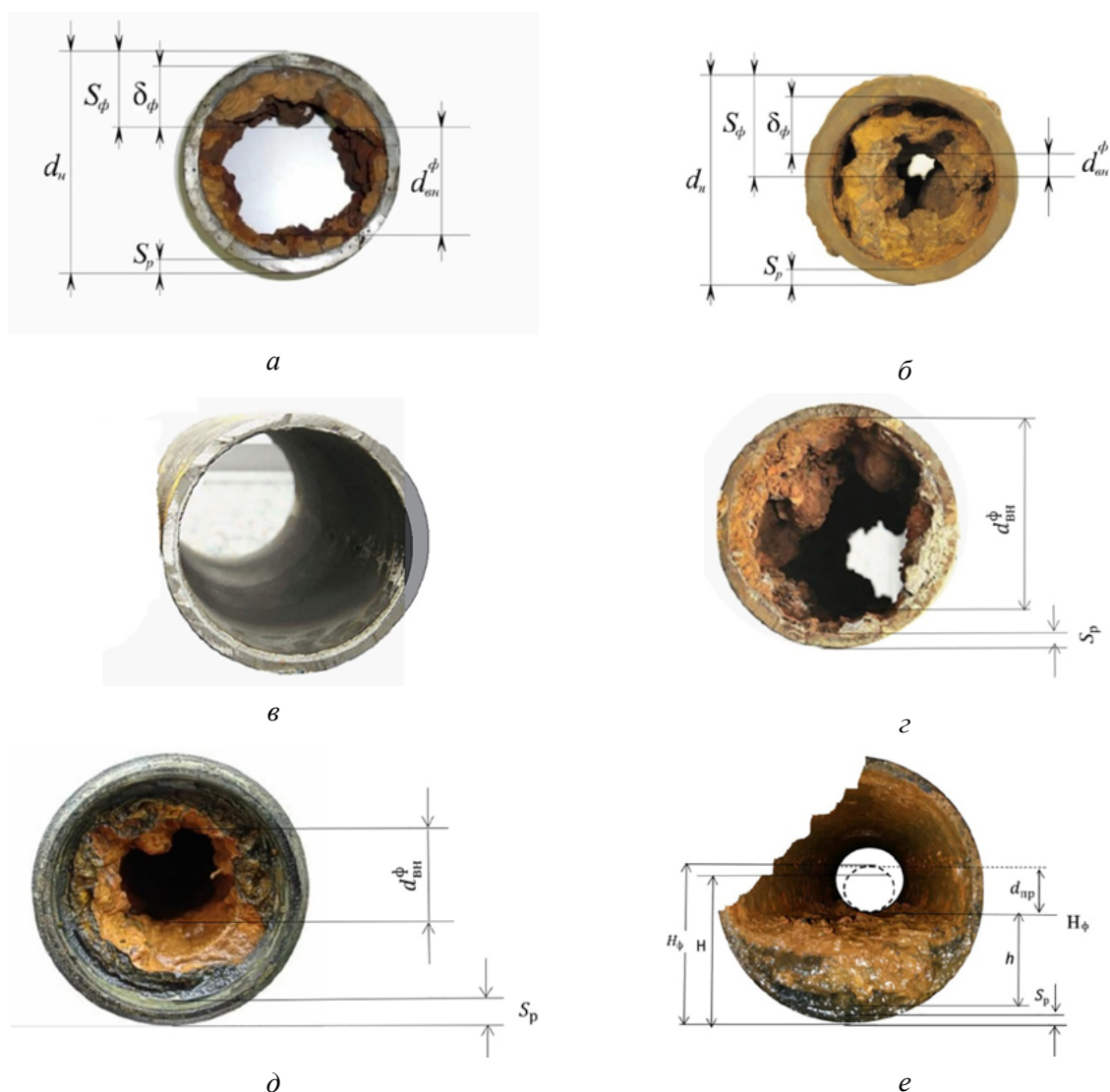


Рис. 1. Состояние инженерных сетей инфраструктуры железнодорожного транспорта:
 а — сети, выполненные из стали; б — сети, выполненные из серого чугуна; в — новые трубы
 тепловой сети; г — изношенные трубы теплоснабжения; д — напорные сети канализации;
 е — самотечные сети канализации

— системы водоотведения сточных и дождевых вод от компонентов транспортно-технологических сетей.

Метод расчета износа инженерных сетей

Все металлические (и из других видов материалов) трубопроводы инженерной инфраструктуры железнодорожного транспорта подвергаются при их проектировании и в процессе эксплуатации **гидравлическим расчетам**, в основе которых

заложено установление фактической толщины слоя отложений на внутренней поверхности трубопроводов с помощью портативных толщиномеров и последующее определение фактических гидравлических характеристик.

То есть характеристики всех видов металлических сетей железнодорожной инфраструктуры подвергаются **инженерному прогнозу** фактических значений характеристик гидравлического потенциала трубопроводов (труб) с использо-

ванием искусственного интеллекта. Такой подход распространяется также на все городские коммунальные сети, сети теплоснабжения, сети промышленных объектов железнодорожного транспорта, металлические сети метрополитенов и сети промышленного транспорта [1–4].

Целью использования искусственного интеллекта при оценке текущего состояния изношенных транспортно-технологических сетей железнодорожного транспорта является количественная оценка текущего состояния инженерных сетей для разработки возможности **продления периода** их безаварийной, длительной и эффективной эксплуатации, с учетом опыта применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте [5–9].

Эффективность эксплуатации изношенных инженерных сетей, выполненных из металлических труб, предлагается оценивать с использованием безразмерного коэффициента эффективности их работы $K_{эф}$, определяемого по формуле [10, 11]:

$$K_{эф} = \frac{N_{дв}^p}{N_{дв}^ф} = \frac{i_p (d_{вн}^p)^2 V_p}{i_ф (d_{вн}^ф)^2 V_ф}, \quad (1)$$

где $N_{дв}^{p(ф)}$ — значение расчетного (р) и фактического (ф) энергопотребления насосного агрегата, установленного в новом (р) и изношенном (ф) трубопроводе, кВт/ч;

$d_{вн}^{p(ф)}$ — определяемая по формуле (2), кВт/ч:

$$N_{дв}^{p(ф)} = 10^6 \cdot i_{p(ф)} (d_{вн}^{p(ф)}) V_{p(ф)} \frac{0,00808}{\eta}, \quad (2)$$

где $i_{p(ф)}$ — расчетный (р), фактический (ф) гидравлический уклон труб;

$d_{вн}^{p(ф)}$ — расчетный (р), фактический (ф) внутренние диаметры новых и изношенных труб соответственно, м;

$V_{p(ф)}$ — расчетная скорость движения потока в новой трубе (р), фактическая скорость движения потока в изношенной трубе, м/с;

η — коэффициент полезного действия насосного оборудования, для выполнения расчетов принимают значение $\eta = 0,7$ [12].

$d_{вн}^{p(ф)}$, $V_{p(ф)}$, $i_{p(ф)}$ — численные значения характеристик новых (р) и изношенных (ф) труб, м, м/с, мм/м.

Степень гидравлического износа трубопроводных систем может оцениваться с использованием коэффициента эффективности эксплуатации $K_{эф}$. Чем больше значение $K_{эф}$, тем меньше фактическая толщина слоя внутренних отложений в трубах, и наоборот, $\delta_{ф}(h_{ф})$, рис. 1.

Для наглядной демонстрации этого для стальной водопроводной сети на рис. 2 и 3 для конкретного примера приведен вид зависимостей:

$$i_{p(ф)} = f(\delta_{ф}) \text{ и } N_{дв}^{p(ф)} = f(\delta_{ф}).$$

Существуют несколько диапазонов значений изменения коэффициента эффективности эксплуатации стальных и чугунных трубопроводов:

I диапазон

$0,95 \geq K_{эф} \geq 1$ — наиболее эффективное функционирование трубопровода при минимальных значениях величин фактического гидравлического уклона $i_{ф}$, что указывает на возможность продолжения дальнейшего использования.

II диапазон

$0,90 \geq K_{эф} \geq 0,95$ — энергозатратное функционирование трубопровода с повышенными значениями фактического гидравлического уклона $i_{ф}$, что приводит к увеличению потребления энергии насосным оборудованием $N_{дв}^ф$, продолжение дальнейшей эксплуатации становится достаточно затратным и приводит к необходимости принятия технических решений в части разработки проекта реконструкции трубопровода.

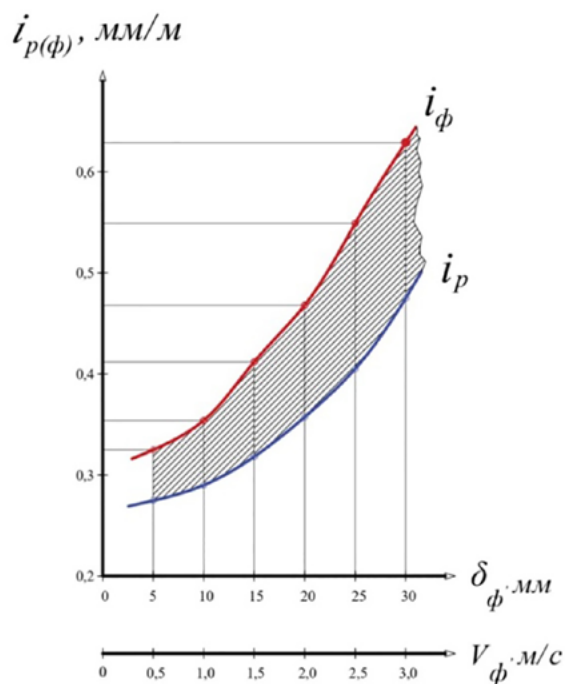


Рис. 2. Графики зависимости

$$i_{p(\phi)} = f(\delta_{\phi})$$

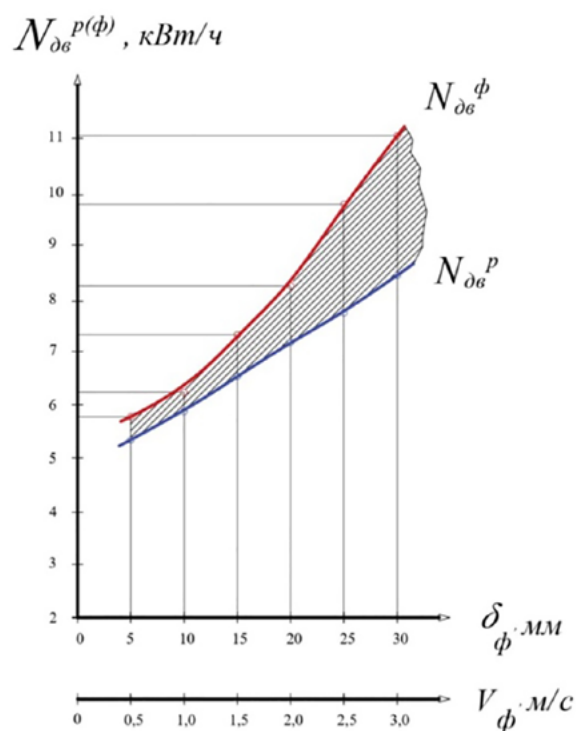


Рис. 3. Графики зависимости

$$N_{дв}^{p(\phi)} = f(\delta_{\phi})$$

III диапазон

$K_{эф} \leq 0,90$ — наблюдаются повышенные значения фактического гидравлического уклона i_{ϕ} , поэтому функционирование трубопровода становится нецелесообразным. В такой ситуации требуется проведение реконструкции или полной замены на новый.

IV диапазон

$K_{эф} \leq 0,80$ — состояние трубопровода, свидетельствующее о недопустимости его дальнейшего использования, необходимо принимать решение о выводе его из эксплуатации.

В табл. 1 представлены сведения, по которым возможно прогнозировать продолжительность остаточного периода эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения, выполненных из стали или серого чугуна без внутренних защитных покрытий, в зависимости от установленных диапазонов значений коэффициента эффективности эксплуатации $K_{эф}$.

Таким образом, внутренняя поверхность металлического трубопровода со слоем отложений δ_{ϕ} , изменяющимся во времени и зависящем от показателей качества питьевой воды, характеризует работу насосного оборудования и влияет на расходование электрической энергии.

Результаты

Приведем пример, подтверждающий это заключение.

Расчетная пропускная способность участка водопроводной сети с диаметром условного прохода 325 мм, выполненного из стальных электросварных труб, без защитных покрытий, составляет $q = 120$ л/с, срок эксплуатации составляет 10 лет, и при этом слой отложений на внутренней поверхности равен $\delta_{\phi} = 6,0$ мм.

Определить характеристики гидравлического потенциала данного участка водопроводной сети

Таблица 1. Диапазоны изменения значений $K_{эф}$

Прогнозируемый период остаточной эксплуатации сети, T , лет	Диапазоны изменения значений $K_{эф}$		
	$0,90 \leq K_{эф} \leq 1,0$	$0,80 \leq K_{эф} \leq 0,90$	$K_{эф} < 0,80$
	не более пяти лет	один год	недопустимость эксплуатации

Таблица 2. Характеристики сравниваемых труб

Значения характеристик гидравлического потенциала стальных электросварных труб						Величина $K_{\text{ф}}$ по формуле (1)
Новых по ГОСТ 10704—91			Изношенных, $\delta_{\text{ф}} = 6,0$ мм			
$d_{\text{вн}}^{\text{п}}$, м	$V_{\text{п}}$, м/с	$i_{\text{п}}$, мм/м	$d_{\text{вн}}^{\text{ф}}$, м	$V_{\text{ф}}$, м/с	$i_{\text{ф}}$, мм/м	
0,311	1,58	0,01219	0,299	1,71	0,01504	0,81

для количественного прогнозирования периода остаточной продолжительности эксплуатации данного трубопровода.

Результаты расчетов значений характеристик гидравлического потенциала новых и изношенных труб, согласно условиям задачи, представлены в табл. 2.

Так как $K_{эф} = 0,81$, то в дальнейшем, согласно данным табл. 1, можно короткое время (не более одного года) продолжать эксплуатацию трубопровода $d_{н} = 0,325$ мм с толщиной слоя отложений $\delta_{ф} = 6,0$ мм, учитывая, что ежегодный прирост толщины слоя $\delta_{ф} = 0,3$ мм [12].

Выводы

Приведенные в статье данные по оценке эффективности эксплуатации изношенных металлических трубопроводов инженерной инфраструктуры железнодорожного транспорта позволяют сделать следующие выводы. Существующим структурам Минстроя РФ следует включить в требования действующих сводов правил количественные значения $K_{эф}$ коэффициента эффективности эксплуатации трубопроводов с различным диапазоном диаметров и значениями толщины фактического слоя отложений на внутренней поверхности $\delta_{ф}$ с целью определения периода остаточной эксплуатации и планирования объемов финансирования разных конкретных проектов.

Список источников

1. Капман Р. Очерки по математической теории систем / Р. Капман, П. Фалб, М. Арбиб. — М.: Мир, 1971.
2. Кини Р. Л. Принятие решения при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. — М.: Радио и связь, 1984.
3. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. — 488 с.
4. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. — М.: Мир, 1973. — 344 с.
5. Месарович М. Общая теория систем. Математические основы / М. Месарович, И. Такахара. — М.: Мир, 1978.
6. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. — М.: Мир, 1973. — 344 с.
7. Мильнер Б. З. Системный подход к организации управления / Б. З. Мильнер, Л. И. Евенко, В. С. Раппопорт. — М.: Экономика, 1983. — 224 с.
8. Михалевич В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. — М.: Наука, 1982. — 286 с.
9. Микони С. В. Теория и практика рационального выбора / С. В. Микони. — М.: Маршрут, 2004.
10. Патент на изобретение № 2807163 Российская Федерация. Способ определения остаточного срока службы трубопроводов канализационных и тепловых сетей / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков. — 2023.

11. Патент на изобретение № 2822440 Российская Федерация. Способ оценки технического состояния трубопровода / О. А. Продоус, Д. И. Шлычков, А. А. Шестаков. — 2024.

12. Продоус О. А. Особенности гидравлического расчета водопроводов из металлических, полимерных и металлополимерных труб. Терминологический словарь по наружным сетям водоснабжения и канализации. Научное издание / О. А. Продоус, П. П. Якубчик, Д. И. Шлычков. — СПб.; М.: Перо, 2023. — 288 с.

Дата поступления: 22.04.2025

Решение о публикации: 29.05.2025

Контактная информация:

ПРОДОУС Олег Александрович —

канд. техн. наук, доц. кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика»

КАБАНОВ Александр Васильевич —

канд. техн. наук, доц., декан факультета «Экономика и менеджмент»

Assessment of the Engineering Network Maintenance Efficiency of Railway Transport Infrastructure

O. A. Prodous, A. V. Kabanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Prodous O. A., Kabanov A. V. Assessment of the Engineering Network Maintenance Efficiency of Railway Transport Infrastructure. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 492–498. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-492-498

Summary

Purpose: To demonstrate the practical application of a quantitative methodology for estimating the duration of the residual operation period of worn-out metal pipelines as part of a railway transport engineering infrastructure, metro networks, urban networks and industrial transport networks. **Methods:** The technical condition of worn-out pipes was assessed by applying calculation dependencies for metal pipes with internal sediments. **Results:** The estimation methodology has been presented, with the duration of the operation period being calculated. The concept of operation efficiency coefficient is introduced as a major component in ensuring the reliability and safety of pipeline systems for various purposes. **Conclusion:** The estimation of the operation efficiency of worn-out pipelines of railway infrastructure engineering networks is proposed to be conducted applying the coefficient value of the pipe operation efficiency, depending on the thickness of their internal sediment layer. The necessity to develop specialized tables for hydraulic calculation of worn-out metal-pipe networks of railway infrastructure has been substantiated, and it has been proposed to include quantitative standards in the current regulations.

Keywords: Engineering networks of the railway infrastructure, metal networks of water supply, heat supply and sewerage, assessment of maintenance efficiency.

References

1. Kapman R., Falb P., Arbib M. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem* [Essays on the Mathematical Theory of Systems]. Moscow: Mir Publ., 1971. (In Russian)

2. Kini R. L., Rayfa Kh. *Prinyatie resheniya pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya* [Multicriteria Decision Making: Preferences and Substitutions]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1984. (In Russian)

3. Moiseev N. N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical Problems of Systems Analysis]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1981, 488 p. (In Russian)
4. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* [Theory of Hierarchical Multilevel Systems]. Moscow: Mir Publ., 1973, 344 p. (In Russian)
5. Mesarovich M., Takakhara I. *Obshchaya teoriya sistem. Matematicheskie osnovy* [General Theory of Systems. Mathematical foundations]. Moscow: Mir Publ., 1978. (In Russian)
6. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* [Theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow: Mir Publ., 1973, 344 p. (In Russian)
7. Mil'ner B. Z., Evenko L. I., Rappoport V. S. *Sistemnyy podkhod k organizatsii upravleniya* [Systems approach to management organization]. Moscow: Ekonomika Publ., 1983, 224 p. (In Russian)
8. Mikhalevich V. S., Volkovich V. L. *Vychislitel'nye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem* [Computational methods for studying and designing complex systems]. Moscow: Nauka Publ., 1982, 286 p. (In Russian)
9. Mikoni C. V. *Teoriya i praktika ratsional'nogo vybora* [Theory and practice of rational choice]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. (In Russian)
10. Prodous O. A., Shlychkov D. I. *Sposob opredeleniya ostatochnogo sroka sluzhby truboprovodov kanalizatsionnykh i teplovykh setey* [Method for determining the residual service life of sewer and heating network pipelines]. Patent RF, no. 2807163, 2023. (In Russian)
11. Prodous O. A., Shlychkov D. I., Shestakov A. A. *Sposob otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya truboprovoda* [Method for assessing the technical condition of a pipeline]. Patent RF, no. 2822440, 2024. (In Russian)
12. Prodous O. A., Yakubchik P. P., Shlychkov D. I. *Osobennosti gidravlicheskogo rascheta vodoprovodov iz metallicheskih, polimernykh i metallopolimernykh trub. Terminologicheskii slovar' po naruzhnym setyam vodosnabzheniya i kanalizatsii. Nauchnoe izdanie* [Features of hydraulic calculation of water pipelines made of metal, polymer and metal-polymer pipes. Terminological dictionary of external water supply and sewerage networks. Scientific publication]. St. Petersburg; Moscow: Pero Publ., 2023, 288 p. (In Russian)

Received: April 22, 2025

Accepted: May 29, 2025

Author's information:

Oleg A. PRODOUS — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Water Supply, Sewage and Hydraulics

Alexander V. KABANOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the “Economics and Management” Faculty