

Научная статья  
УДК 628.14+519.25

## ОЦЕНКА УМЕНЬШЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ ИЗ-ЗА ОТЛОЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА РАСХОДОМ ВОДЫ

В.А. Наумов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

\*E-mail: [van-old@mail.ru](mailto:van-old@mail.ru)

**Аннотация.** Метод оценки уменьшения фактического внутреннего диаметра металлического трубопровода по данным многолетних наблюдений за расходом воды предложен в статье. Аппроксимация границ снижения пропускной способности водопроводных труб из-за образования плотного осадка была найдена для групп вод с разной степенью коррозионного воздействия. Было принято допущение, что расход воды в новом трубопроводе и расход воды после  $t$  лет эксплуатации измерялись при одном и том же статическом напоре и гидравлических потерях. Оценка времени уменьшения фактического внутреннего диаметра трубопровода на 5% была выполнена при транспортировке вод разных групп.

**Ключевые слова:** водопроводные трубы; отложения; внутренний диаметр; метод оценки; аппроксимация границ.

**Для цитирования:** Наумов В.А. Оценка уменьшения внутреннего диаметра металлических труб из-за отложений по данным многолетних наблюдений за расходом воды // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т.10. № 1. С. 38–45.

Original article

## ASSESSMENT OF THE DECREASE IN THE INNER DIAMETER OF METAL PIPES DUE TO DEPOSITS BASED ON LONG-TERM OBSERVATIONS OF WATER FLOW

V.A. Naumov<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

\*E-mail: [van-old@mail.ru](mailto:van-old@mail.ru)

**Abstract.** The method for estimating the decrease in the actual internal diameter of a metal pipeline based on long-term observations of water flow is proposed in the article. The approximation of the boundaries of the decrease in the capacity of water pipes due to the formation of dense sediment was found for groups of waters with varying degrees of corrosion. It was assumed that the water flow in the new pipeline and the water flow after  $t$  years of operation were measured at the same static pressure and hydraulic losses. The estimation of the time of reduction of the actual internal diameter of the pipeline by 5% was performed during the transportation of waters of different groups.

**Keywords:** water pipes; deposits; inner diameter; estimation method; approximation of boundaries.

**For citation:** Naumov V.A. Assessment of the decrease in the inner diameter of metal pipes due to deposits based on long-term observations of water flow. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024. V. 10, No. 1, pp. 38–45.

## Введение

Проблема снижения пропускной способности водопроводных труб (СПС ВТ) из-за увеличения их шероховатости в процессе эксплуатации и зарастания (образования плотного осадка на стенках) столь же стара, как первые трубопроводные системы водоснабжения. Начало научному изучению этой проблемы СПС было положено А.Г. Камерштейном в середине прошлого века [1]. Было предложено разбить воды на 5 групп в зависимости от степени их коррозионного воздействия на трубы (табл. 1).

Таблица 1 – Группы вод по степени коррозионного воздействия [1]

Группа	Коррозионное воздействие	Характеристика природных вод
I	Слабое	Слабоминерализованные некоррозионные воды с малым содержанием органических веществ и растворенного железа
II	Умеренное	Слабоминерализованные некоррозионные воды, содержащие органические вещества и растворенное железо менее 3 г/м <sup>3</sup> .
III	Значительное	Коррозионные воды с содержанием железа больше 3 г/м <sup>3</sup> , хлоридов и сульфатов – меньше 100–150 г/м <sup>3</sup> .
IV	Сильное	Коррозионные воды с содержанием сульфатов и хлоридов больше 500–700 г/м <sup>3</sup> ; необработанные воды с большим содержанием органических веществ.
V	Очень сильное	Сильноминерализованные и коррозионные воды с плотным осадком более 2000 г/м <sup>3</sup> .

Интересный материал с обобщением эксплуатационных данных по СПС ВТ был представлен в [2]. Был рассчитан безразмерный показатель – СПС ВТ труб для разных групп вод:

$$q = (Q_0 - Q_t) / Q_0, \quad (1)$$

где  $Q_0$  – расход воды в новом трубопроводе, м<sup>3</sup>/с;  $Q_t$  – расход воды в трубопроводе после  $t$  лет эксплуатации, м<sup>3</sup>/с.

В табл. 2 представлены результаты оцифровки границ между показателем СПС ВТ (1) для разных групп вод [2]. Показатель СПС ВТ группы вод I находится между границами 1 и 2, II – 2 и 3, III – 3 и 4, IV – 4 и 5, V – за границей 5.

Таблица 2 – Снижение пропускной способности водопроводных труб [2, с.43]

Эксплуатационный период, лет	Границы между показателем СПС ВТ разных групп вод				
	1	2	3	4	5
5	0,043	0,083	0,151	0,225	0,339
10	0,062	0,126	0,209	0,295	0,407
15	0,082	0,160	0,252	0,346	0,452
20	0,102	0,189	0,290	0,386	0,489
25	0,115	0,213	0,326	0,419	0,519
30	0,126	0,234	0,353	0,448	0,546
35	0,134	0,253	0,379	0,475	0,574
40	0,143	0,276	0,406	0,503	0,596

В [2] и многих последующих научных статьях, учебных пособиях (например, [3, 4]) акцентируется внимание на увеличении абсолютной шероховатости труб  $\Delta$  из-за коррозионного воздействия вод. Используется формула

$$\Delta_t = \Delta_0 + \alpha \cdot t, \quad (3)$$

где  $\Delta_0$  – абсолютная шероховатость новых труб, мм;  $\Delta_t$  – абсолютная шероховатость труб после  $t$  лет эксплуатации, мм;  $\alpha$  – коэффициент роста шероховатости, мм/год. Величина коэффициента  $\alpha$  сильно зависит от группы вод. Так для группы I рекомендуется  $\alpha=0,005-0,055$  мм/год; для группы V –  $\alpha>0,6$  мм/год.

Линейная функция (3) может служить только очень грубой оценкой увеличения шероховатости труб. При этом на уменьшение проходного сечения трубопровода внимание, практически, не обращалось. Хотя, очевидно, что наблюдаемые результаты СПС ВТ являются следствием обоих факторов: снижения площади проходного сечения трубы и увеличения гидравлического сопротивления из-за роста шероховатости.

Опубликовано много результатов исследования механизма образования отложений в водопроводных трубах (см. [5, 6] и библи. в них). Так в [6] указано, что осадок со временем накапливается в распределительных системах и может привести к загрязнению воды. Первичное происхождение этих частиц в большинстве сетей не изучено. Контролируемое повторное отложение и промывка отложений было проведено на 10 участках в системе распределения питьевой воды и повторено через 6 месяцев для наблюдения за повторным отложением. Утверждается, что наблюдаемые различные модели отложения осадка связаны с происхождением частиц. Большая часть отложений из труб, повторно взвешенных во время первой промывки, состояла из железа, что, скорее всего, произошло в результате коррозии инфраструктуры распределительной системы. Этот осадок, по-видимому, играет роль в защите микробных клеток от вторичной дезинфекции. В [6] был идентифицирован источник частиц, который может дать альтернативное объяснение присутствию отложений железа в системах, в которых отсутствуют железные трубопроводы.

Комплекс исследований, выполненных под руководством профессора О.А. Продоуса [7-11], показал, что главной причиной снижения пропускной способности водопроводных труб является увеличение фактической толщины стенки  $S_\phi$  из-за образования на ней плотного осадка (рис. 2).

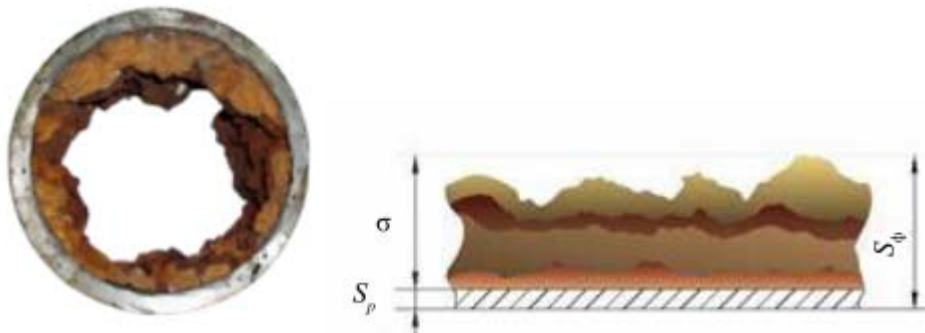


Рисунок 2 – Внутренние отложения на стенках стальных труб [9]

Обозначения на рис. 2:  $\sigma$  – толщина слоя внутренних отложений, м;  $S_p$  – толщина стенки трубы, м. Фактический диаметр проходного сечения трубы  $d_\phi$  рассчитывается по формуле

$$d_\phi = D - 2 S_p - 2 \sigma, \quad (4)$$

где  $D$  – наружный диаметр трубы.

Был уточнен числовой коэффициент в известной формуле гидравлического уклона  $i_g$  Ф.А. Шевелева для стальных и чугунных труб. При достаточно большой фактической скорости течения ( $V_\phi \geq 1,2$  м/с) формула имеет вид [9, с. 117]:

$$i_{g\phi} = 0,007 \cdot (V_\phi)^2 / (d_\phi)^{1,3}. \quad (5)$$

Для оценки СПС ВТ необходимо знать, как растет толщина отложений (фактическая толщина стенки трубы) со временем. Публикаций с таким материалом совсем немного. Причем большая часть лабораторных наблюдений ограничивается малым периодом

наблюдений, как в [5, 6]. В [8] приведен пример водопровода из стальных электросварных труб с наружным диаметром 219 мм, расход воды  $Q = 50$  л/с. После 20 лет эксплуатации толщина слоя внутренних отложений составила  $\sigma=25$  мм. Средний прирост слоя отложений – 1,25 мм/год. Однако, сведений о группе вод по степени коррозионного воздействия не приводится.

Цель данной статьи – оценить уменьшение фактического внутреннего диаметра металлического трубопровода при многолетней эксплуатации по данным [2] СПС ВТ для групп вод с разной степенью коррозионного воздействия.

### Аппроксимация границ СПС ВТ

На рис. 2 точками нанесены экспериментальные данные [2] из табл. 2 (границы групп вод обозначены арабскими цифрами, сами группы – римскими, как в табл. 1). Границы на рис. 2 хорошо аппроксимируются показательной функцией:

$$q_i \equiv f_i(t) = \beta_i \cdot t^{m_i}, \quad (6)$$

где  $i$  – номер границы на рис. 2;  $\beta_i$ ,  $m_i$  – эмпирические коэффициенты, которые были определены методом наименьших квадратов по экспериментальным данным (табл. 3).

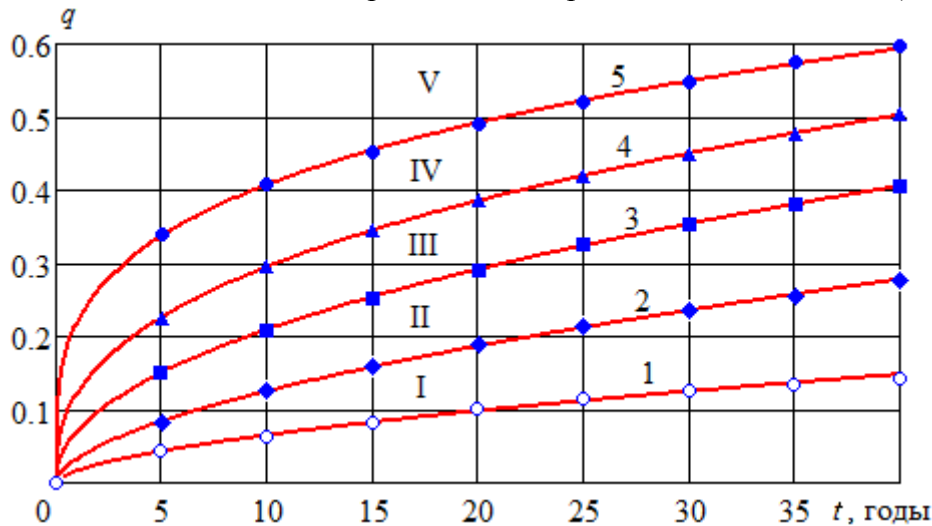


Рисунок 2 – Снижение пропускной способности водопроводных труб. Точки – экспериментальные данные из [2], линии – расчет по формуле (6)

Таблица 3 – Значения коэффициентов в формуле (6)

Номер границы	$\beta$	$m$	$R^2$
1	0,0164	0,595	0,97
2	0,0332	0,575	0,97
3	0,0699	0,476	0,98
4	0,1221	0,383	0,97
5	0,2183	0,270	0,98

По табл. 3 скорректированный индекс детерминации  $R^2$  весьма высок, что говорит о хорошем согласии результатов расчета СПС ВТ с экспериментальными данными. С усилением степени коррозионного воздействия вод (от 1 к 5) значение коэффициента  $\beta$  растет,  $m$  – падает.

### Оценка уменьшения внутреннего диаметра

В первом приближении, примем допущение: в формуле (1) расход воды в новом трубопроводе  $Q_0$  и расход воды  $Q_t$  после  $t$  лет эксплуатации измерялись при одном и том же статическом напоре и гидравлических потерях. Тогда гидравлический уклон в этих трубопроводах должен быть одинаков  $i_{g0} = i_{gt}$ . Откуда по формуле (5) следует

$$(V_0)^2/(d_0)^{1,3} = (V_t)^2/(d_t)^{1,3}. \quad (7)$$

Из (7) получим связь отношения скоростей и фактических диаметров:

$$V_t/V_0 = (d_t/d_0)^{0,65}. \quad (8)$$

Преобразуем формулу (1) с учетом (6):

$$Q_t/Q_0 = 1 - f_i(t). \quad (9)$$

Выразим отношение расходов через отношение скоростей и диаметров:

$$Q_t/Q_0 = V_t/V_0 (d_t/d_0)^2. \quad (10)$$

Заменим в (10) отношение скоростей отношением диаметров (8):

$$Q_t/Q_0 = (d_t/d_0)^{2,65}. \quad (11)$$

Приравнявая правые части (9) и (11) получим формулу для оценки уменьшения фактического внутреннего диаметра трубопровода со временем на  $i$ -той границе групп вод:

$$\delta_i \equiv (d_t / d_0)_i = (1 - \beta_i \cdot t^{m_i})^{0,377}. \quad (12)$$

На рис. 3 показаны результаты расчета по формуле (12).

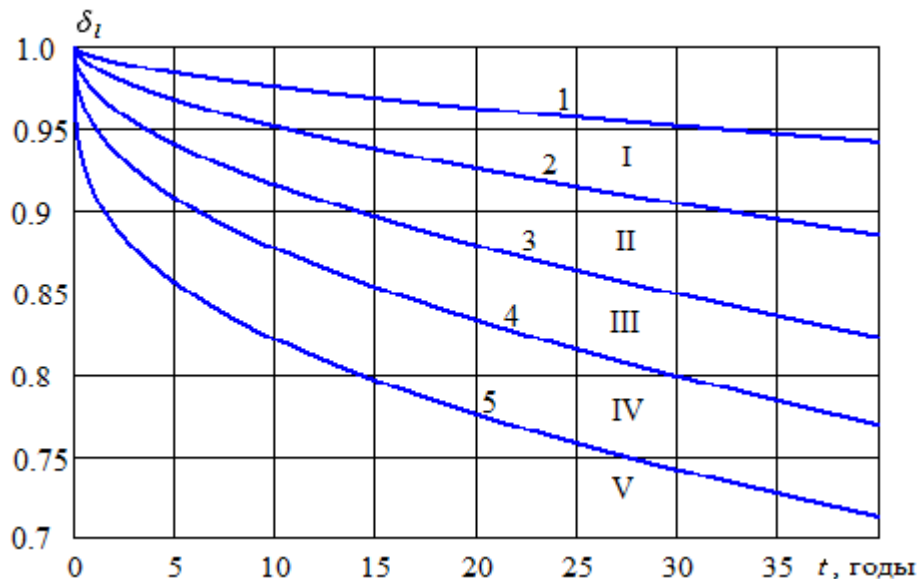


Рисунок 3 – Уменьшение внутреннего диаметра стального трубопровода со временем.

Обозначение групп вод и их границ, как на рис. 2

В [9, 10] утверждается, что уменьшение фактического диаметра трубопровода не должно превышать 5%. Иначе происходит заметное снижение эффективности его работы. Чтобы оценить время такого уменьшения  $t_i$ , нужно решить уравнение

$$(1 - \beta_i \cdot t_i^{m_i})^{0,377} = 0,95. \quad (13)$$

Из уравнения (13) получим значения для соответствующих границ областей:

$t_1=31,2$  года;  $t_2=10,3$  года;  $t_3=3,5$  года;  $t_4=1,1$  года;  $t_5=1,6$  мес.

Диапазон получается довольно широкий. Кроме того, необходимо помнить о низкой точности исходных данных [2]. Так область I находится между первой и второй границей, время снижения фактического диаметра трубопровода на 5% для первой группы вод будет больше 10, но меньше 30 лет.

### Заключение

Таким образом, предложен метод оценки уменьшения фактического внутреннего диаметра металлического трубопровода по данным СПС ВТ при многолетней эксплуатации для групп вод с разной степенью коррозионного воздействия. В первом приближении, было принято допущение: расход воды в новом трубопроводе и расход воды после  $t$  лет эксплуатации измерялись при одном и том же статическом напоре и гидравлических потерях. Расчет показал, что уменьшение фактического внутреннего диаметра трубопровода на 5% при транспортировке вод первой группы происходит от 10 до 30 лет, второй – от трех до 10 лет, третьей – от года до трех лет, четвертой – меньше года, пятой – полтора месяца и менее. Найденные значения эмпирических констант могут быть уточнены с привлечением дополнительных экспериментальных данных. Метод расчета может быть усовершенствован с учетом характеристик используемых насосов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Камерштейн А.Г. Мероприятия по сохранению пропускной способности водопроводных труб. Москва: Стройиздат, 1950. 140 с.
2. Гидравлические потери на трение в водоводах электростанций / А.Д. Альтшуль, Ю.А. Войтинская, В.В. Казеннов, Э.Н. Полякова. Москва: Энергоиздат, 1985. 104с.
3. Великанов Н.Л., Корягин С.И., Наумов В.А. Уменьшение отложений в водопроводных и канализационных сетях // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2015. № 2 (32). С. 20-23.
4. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией : учебное пособие / С. М. Аракелян, Д. Н. Бухаров, С. И. Абрахин, А. О. Кучерик. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. 99 с.
5. Муравьев А.В., Мозговой Н.В., Дроздов И.Г. Механизм образования отложений // Физико-технические проблемы энергетики, экологии и ресурсосбережения: сборник научных трудов. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2006. Вып. 9. С. 44-49.
6. Mussared A., Fabris R., Vreeburg J.H.G., Jelbart J.E., Drikas M. The origin and risks associated with loose deposits in a drinking water distribution system // Water Supply. 2019. Vol.19, pp.291-302.
7. Продоус О.А. Гидравлическое прогнозирование продолжительности использования металлических трубопроводов водоснабжения и водоотведения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2020. № 11 (155). С. 28–32.
8. Техническое регулирование значений гидравлических параметров неновых металлических труб для продления периода их использования / О.А. Продоус, Л.Д. Терехов, П.П. Якубчик, А.С. Черных // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18. Вып. 3. С. 421–427.



9. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Систематизация гидравлического расчета металлических сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями на стенках труб // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. № 3. С. 115-124.
10. Продоус О.А., Якубчик П.П., Смолин Е.С. Сравнительный анализ зарубежной и отечественной расчетных зависимостей для гидравлического расчета металлических водопроводных труб с внутренними отложениями // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 1 С. 56-60.
11. Продоус О.А., Шлычков Д.И., Якубчик П.П. Причины и последствия изменения значений гидравлических характеристик металлических сетей водоснабжения и водоотведения в процессе их эксплуатации // Градостроительство и архитектура. 2023. Т.13, №3(52). С. 42-49.

## REFERENCES

1. Kamershtejn A.G. *Meropriyatiya po sohraneniyu propusknoy sposobnosti vodoprovodnyh trub* [Measures to preserve the capacity of water pipes]. Moscow: Stroyizdat, 1950. 140 p.
2. *Gidravlicheskie poteri na trenie v vodovodah elektrostancij* [Hydraulic friction losses in power plant ducts]. A.D. Al'tshul', Yu.A. Vojtinskaya, V.V. Kazennov, E.N. Polyakova Moscow: Energoizdat, 1985. 104 p.
3. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A. Umen'shenie otlozhenij v vodoprovodnyh i kanalizacionnyh setyah [Reduction of deposits in water supply and sewerage networks]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2015. No. 2 (32), pp. 20-23.
4. *Metody vychislitel'noj gidrodinamiki v raschetah dvizheniya zhidkosti v sistemah so slozhnoj topologiej: uchebnoe posobie* [Methods of computational fluid dynamics in calculations of fluid motion in systems with complex topology: textbook]. S.M. Arakelyan, D.N. Buharov, S.I. Abrahin, A.O. Kucherik. Vladimir: VIGU Publ., 2015. 99 p.
5. Murav'ev A.V., Mozgovoj N.V., Drozdov I.G. Mekhanizm obrazovaniya otlozhenij [The mechanism of sediment formation]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy energetiki, ekologii i resursosberezheniya: sbornik nauchnyh trudov*. Voronezh: VGTU Publ., 2006. Vol. 9, pp. 44-49.
6. Mussared A., Fabris R., Vreeburg J.H.G., Jelbart J.E., Drikas M. The origin and risks associated with loose deposits in a drinking water distribution system. *Water Supply*. 2019. Vol. 19, pp.291-302.
7. Prodous O. A. *Gidravlichesкое прогнозирование продолжительности использования металлических трубопроводов водоснабжения и водоотведения* [Hydraulic forecasting of the duration of use of metal pipelines for water supply and sanitation]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2020. No. 11 (155), pp. 28–32.
8. *Tekhnicheskoe regulirovanii znachenij gidravlicheskih parametrov nenovyh metallicheskih trub dlya prodleniya perioda ih ispol'zovaniya* [Technical regulation of the values of hydraulic parameters of non-ferrous metal pipes to extend the period of their use]. O.A. Prodous, L.D. Terekhov, P.P. Yakubchik, A.S. Chernyh. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2021. Vol. 18, No. 3, pp. 421–427.
9. Prodous O.A., Shlychikov D.I. *Sistematizaciya gidravlichesкого расчета metallicheskih setej vodosnabzheniya i vodoотvedeniya s vnutrennimi otlozheniyami na stenkah trub* [Systematization of hydraulic calculation of metal water supply and sanitation networks with internal deposits on pipe walls]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2022. Vol. 12, No. 3, pp. 115-124.
10. Prodous O.A., Yakubchik P.P., Smolin E.S. *Sravnitel'nyj analiz zarubezhnoj i otechestvennoj raschetnyh zavisimostej dlya gidravlichesкого расчета metallicheskih vodoprovodnyh trub s vnutrennimi otlozheniyami* [Comparative analysis of foreign and domestic



calculation dependencies for hydraulic calculation of metal water pipes with internal deposits]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2023. No. 1, pp. 56-60.

11. Prodous O.A., Shlychkov D.I., Yakubchik P.P. *Prichiny i posledstviya izmeneniya znachenij gidravlicheskih harakteristik metallicheskih setej vodosnabzheniya i vodootvedeniya v processe ih ekspluatacii* [Causes and consequences of changes in the values of hydraulic characteristics of metal water supply and sanitation networks during their operation]. *Gradostroitel'stvo i arhitektura*. 2023. Vol.13, No.3(52), pp. 42-49.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Наумов Владимир Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: [van-old@mail.ru](mailto:van-old@mail.ru))

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Naumov Vladimir Arkad'evich – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: [van-old@mail.ru](mailto:van-old@mail.ru))

Статья поступила в редакцию 20.01.2024; одобрена после рецензирования 05.02.2024, принята к публикации 12.02.2024.

The article was submitted 20.01.2024; approved after reviewing 05.02.2024; accepted for publication 12.02.2024.