

УДК 628.38.761

© М. Ю. Юдин, канд. техн. наук, доцент  
(ГУП «Ленгипроинжпроект»,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: Yudin@lgip.spb.ru

© А. П. Авсюкевич, канд. техн. наук, ст. преподаватель  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: ecoprom@ecoprom.ru

© М. М. Хямäläinen, канд. техн. наук, доцент  
(ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: hamalainen\_mmm@vodokanal.spb.ru

© С. И. Неслер, магистрант  
(Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: neslers@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-1-95-102

© M. Y. Yudin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(GUE «Lengiproinjproekt»,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: Yudin@lgip.spb.ru

© A. P. Avsyukevich, PhD in Sci. Tech., senior lecturer  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: ecoprom@ecoprom.ru

© M. M. Hamalainen, PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(«Vodokanal of Saint-Petersburg»,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: hamalainen\_mmm@vodokanal.spb.ru

© S. I. Nesler, undergraduate  
(Emperor Alexander I St. Petersburg  
State Transport University,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: neslers@yandex.ru

## КОРРОЗИОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПОДАЧИ ВОДЫ И ИХ УЧЕТ ПРИ КАЛИБРОВКЕ МОДЕЛЕЙ

### CORROSION DEPOSITS IN WATER SUPPLY SYSTEMS AND TAKING ACCOUNT OF THEM DURING MODEL CALIBRATION

Представлены результаты сравнения гидравлических расчетов различными методами с фактически-ми замерами потерь напора на действующем водоводе. Установлена эквивалентность сопоставляемых методик расчета потерь напора в эксплуатируемых металлических трубах. Для обеспечения приемлемой точности решающее значение имеет подбор расчетного диаметра и средней шероховатости. Проведены эксперименты по формированию слоя коррозионных отложений на поверхности незащищенной стальной трубы продолжительностью более одного года в слабопроточных условиях.

*Ключевые слова:* подача воды, моделирование, калибровка, биопленка, отложения в трубах.

The paper presents a comparison analysis of hydraulic calculations by various methods with actual measurements of pressure losses on an operating water main. There is identified equivalence of the compared methods for calculating pressure losses in operated metallic pipes. To ensure acceptable accuracy, it is crucial to select the calculated diameter and average roughness. During the period of over one year, there were carried out experiments on formation of corrosive deposits` layer on the surface of an unprotected steel pipe in low-flow conditions.

*Keywords:* water supply, modeling, calibration, biofilm, deposits in pipes.

#### Введение

Пропускная способность труб за время эксплуатации уменьшается на 15–33 %, а гидравлические сопротивления трубопро-

водов увеличиваются в 1,3–2,3 раза [1]. Изменение гидравлических сопротивлений металлических водопроводных сетей и водоводов с течением времени исследовано



в работах [2–5], систем теплоснабжения — в [6]. Аналогичные результаты получены и для системы водоснабжения Санкт-Петербурга [7], имеющей протяженность водопроводной сети более 7,6 тыс. км, из них примерно 56 % выполнено из чугунных и 20 % из стальных труб средним возрастом 45 лет.

Учет фактического сопротивления сети в процессе создания и эксплуатации модели системы подачи воды обеспечивается калибровкой. В последнее время в калибровке упор делается на математические методы и алгоритмы [8–10], хотя встречаются и работы, в которых математические методы дополняются физическими экспериментами [11]. В процессе моделирования сетей водоснабжения Санкт-Петербурга [7] в качестве параметра калибровки принято сопротивление трубопровода, рассчитываемое с учетом имеющихся многолетних железистых отложений. Фактическое сопротивление устанавливается натурными замерами расхода и потерь напора на участках с различным гидравлическим режимом — водоводов, уличных магистралей, квартальных сетей и слабопроточных участков. Удовлетворительная точность модели по результатам вычисления потерь напора достигается применением коэффициентов к расчетному диаметру, составляющих от 0,85 до 0,95, которые выбираются на основе эксплуатационных данных в зависимости от материала и возраста труб и гидравлического режима участков.

Для изучения механизма образования внутренних отложений, создающих повышенное гидравлическое сопротивление, были проведены опыты в период с сентября 2021 г. по октябрь 2022 г., имитирующие слабопроточный режим эксплуатации трубопровода. В работе [12] образование коррозионных отложений рассмотрено как биологический процесс, напрямую связанный со щелочностью воды. Величина рН и далее

рассматривалась как основной фактор [13]. Коррозионная способность невиской воды меняется в ходе ее обработки от очень высокой до чрезвычайно высокой. В результате доля коррозионных повреждений на городских сетях составляет 30–35 % от их общего количества. Биологической природе процесса формирования коррозионных отложений посвящены работы [14–17].

### Методы

Методы учета коррозионных отложений в водопроводных трубах [2, 4, 7, 18] при расчете потерь напора были сопоставлены с результатами натурных замеров. Натурные замеры расходов и напоров выполнялись на водоводе диаметром 900 мм, который строился отдельными участками в 1938–1951 гг. Шероховатость труб водовода неизвестна.

Расчет потерь напора по методу А. Д. Альтшуля [2] был выполнен подбором значения шероховатости исходя из минимизации отклонений расчетных значений от фактических. Минимальная средняя абсолютная погрешность относительно фактических значений составляет 0,133 м и достигается при толщине слоя отложений 0,015 м, такая же принимается и шероховатость поверхности трубы согласно данному методу расчета.

В таблицах [18] используется эмпирическая формула для расчета потерь напора Ф. А. Шевелева, в которой внутренний диаметр сокращается на удвоенную величину толщины слоя отложений, максимальное значение которой согласно таблицам [18] принимается 30 мм.

По методу, используемому для калибровки в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» [7], расчет потерь напора выполнен по формулам Дарси и Колбрука-Уайта при внутреннем диаметре, принятом 0,9 от исходного внутреннего диаметра водовода. Условная (расчетная) шероховатость принята 5 мм.

Метод П. Д. Хоружего [4] основан на статистических исследованиях фактического сопротивления трубопроводов. В данном



случае толщина отложений учитывается не напрямую, а через систему коэффициентов, учитывающих возраст, коррозионные свойства воды и гидравлический режим эксплуатации.

Для изучения механизма образования внутренних отложений были проведены опыты в период с сентября 2021 г. по октябрь 2022 г. Образец, представлявший собою обрезок новой сварной стальной трубы диаметром 15 мм (ГОСТ 33228-2015), помещался в бак с водой. Обмен воды в баке производился 1–3 раза в сутки. Исследования выполнялись на водопроводной воде, которая по качеству полностью соответствовала нормативным требованиям, но обладала высокой коррозионной активностью, свойственной очищенной невиской воде. Индекс насыщения воды карбонатом кальция находился в диапазоне от –3,04 до –3,45. На дне и стенках бака, в котором размещался образец, содержались рыхлые охристые отложения, представляющие собой смывы из водопроводных труб. Через 7–10 дней обрезок трубы извлекался для осмотра и фотографирования. Следуя рекомендациям [19], на завершающем этапе были проведены исследования с использованием электронного микроскопа. Применялся металлографический микроскоп «Альта-ми МЕТ 3С» с видимым увеличением от 50× до 2000×. Работы с применением микроскопа были выполнены инженерами А. Л. Белосусом и Д. А. Пашкевичем.

## **Результаты**

### **1. Сравнение фактических и расчетных потерь напора**

На рис. 1 представлены результаты сравнения фактических потерь напора на 1 км чугунного водовода с расчетными значениями по методам [2–6].

В рассмотренном примере расчета потерь напора и сравнения их с фактическими значениями все рассмотренные методы дают приемлемую с практической точки зрения погрешность определения потерь напора в

эксплуатируемых трубопроводах, которая рассматривается экспертами в диапазоне от 0,25 до 1,0 м. Результаты расчета по рассмотренным методикам можно существенно сблизить с фактическими значениями потерь напора, если воспользоваться более тщательным подбором шероховатости или толщины слоя отложений в трубах по методу наименьших квадратов. Так, метод, изложенный в таблицах [18], дает минимальную погрешность при толщине слоя отложений 0,044 м. Расчетные значения отличаются от фактических всего на 5 %, причем в большую сторону. При переиздании таблиц их целесообразно дополнять значениями для большей толщины отложений, например 40–45 мм применительно к трубам больших диаметров.

Практически такие же результаты дает и метод [7], используемый в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Если подбирать расчетный диаметр с целью минимизации погрешности, то при поправочном коэффициенте 0,92 к исходному внутреннему диаметру водовода расчет приводит к завышению потерь напора на 3,3 % по отношению к фактическим значениям, что вполне приемлемо для моделирования систем подачи воды. Метод калибровки не вызывает необходимости изменения алгоритмов гидравлического расчета, применяемых в программах, используемых как отечественными, так и зарубежными специалистами.

Повышение точности метода [4] возможно только путем его адаптации к реальным условиям эксплуатации водоводов, но данный метод способен обеспечить наилучшее представление о фактическом состоянии трубопроводов в том или ином районе эксплуатации. Таким образом, все рассмотренные методики дают приемлемую точность расчетных показаний потерь напора к фактическим потерям, однако требуются дальнейшие исследования фактической толщи-

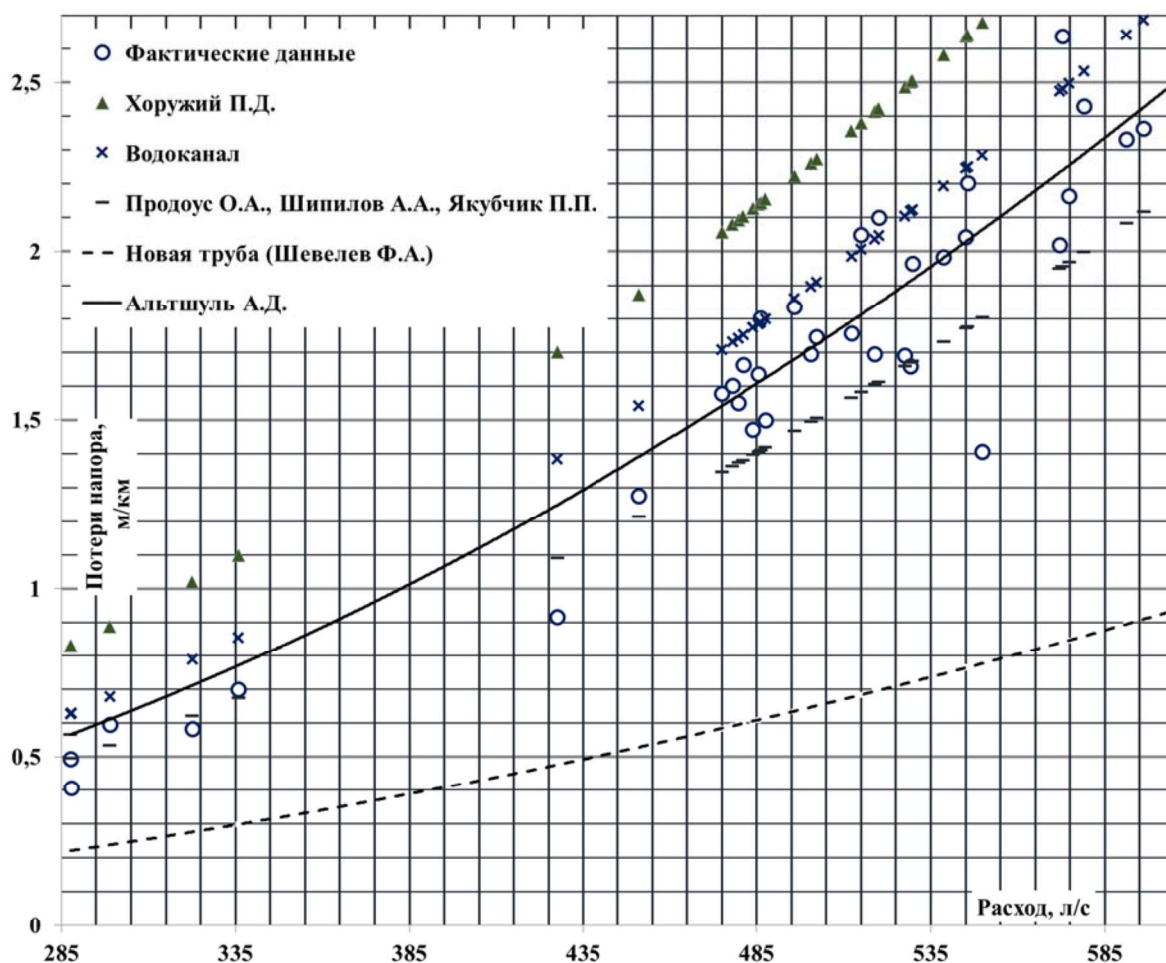


Рис. 1. Сравнение фактических и расчетных потерь напора с учетом внутренних отложений по различным методикам [2–6] на 1 км чугунного водовода диаметром 900 мм. Годы прокладки различных участков водовода — 1938–1951

ны отложений при различных условиях их формирования.

## 2. Эксперименты по формированию слоя коррозионных отложений

Выборочные результаты представлены на рис. 2–4. Отложения на внешней и внутренней поверхности трубы возникли примерно за две недели и представляли собой небольшие отдельные бугорки желто-коричневого цвета высотой до 0,5 мм. Слой внутренних отложений развивался от торцов к середине трубы. Через 70–80 дней отложения сформировали сплошную бугристую поверхность толщиной слоя 2–3 мм. Поверхность на ощупь была скользкой.

Осмотр на 97-й день опыта показал отслаивание отложений от внутренней поверхности, по всей видимости, связанное с падением температуры воды ниже 10 °С и отмиранием биопленки (рис. 3, а).

Отслаивавшиеся отложения были твердыми на ощупь. Через 1–2 недели продолжения опыта слой отложений стал быстро восстанавливаться. В 2022 г. формирование отложений происходило менее интенсивно. В октябре 2022 г. при сезонном снижении температуры воды пленка отслаивалась, но фрагменты отслоения были существенно меньше, чем в октябре 2021 г. К концу месяца сплошные бугристые отложения достигли



толщины 3–4 мм при высоте отдельных выступов в 5 мм (рис. 3, б и 3, в).

Параллельно стальному изучалось обрастание отложениями металлопластикового образца. На его поверхности также формировалась пленка желтоватой слизи, однако интенсивность процесса была существенно ниже и в продолжение эксперимента пленка не превратилась в слой отложений, как произошло на стальной поверхности (рис. 4, а и 4, б).

В источнике [17] представлено подробное описание процесса формирования биопленки на поверхностях в среде чистой воды и ее последующее развитие в процессе жизнедеятельности биоценоза бактерий, когда одни

виды преобразуют питательные субстраты в форму, пригодную для усвоения другими видами бактерий. Указывается, что биопленка может формироваться на любой поверхности, но на металлической поверхности происходит процесс микробиологически обусловленной коррозии (МОК). Под участком биопленки на поверхности металла возникает анаэробная зона, служащая анодом. На участках, свободных от биопленки, на поверхности металла формируется катод. Под влиянием разности потенциалов происходит перенос  $Fe(OH)^{+2}$ , который в зоне аэробных бактерий окисляется до нерастворимой гидроокиси и формирует коррозионные от-

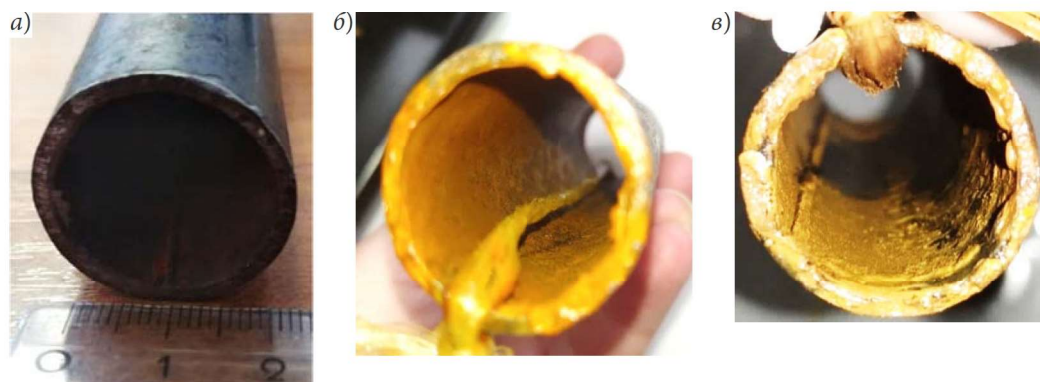


Рис. 2. Стальная труба: а — начало эксперимента; б — через 17 дней; в — через 77 дней

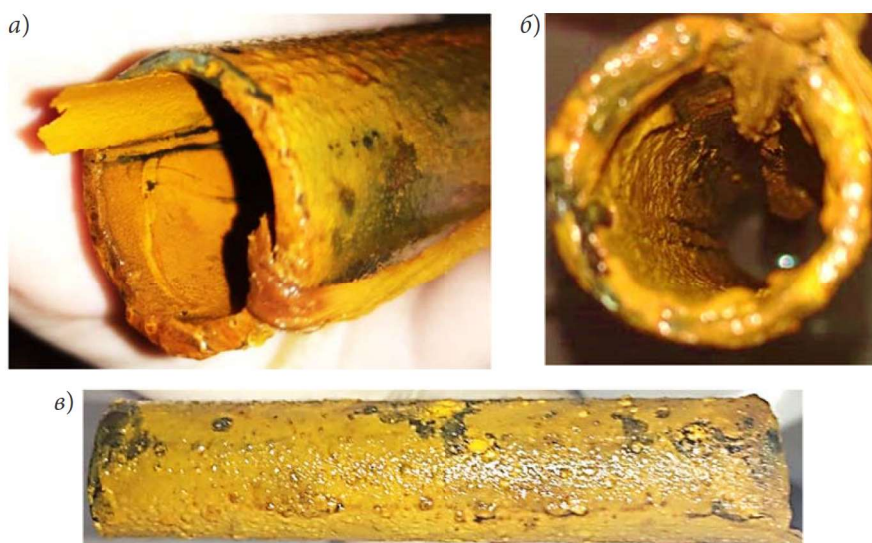


Рис. 3. Отложения на внутренней и внешней поверхности труб: а — через 97 дней; б — через 374 дня; в — через 332 дня



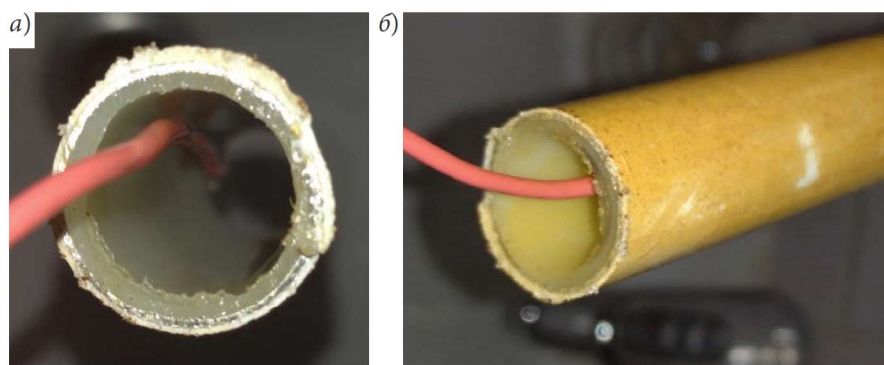


Рис. 4. Металлопластиковая труба: а — начало эксперимента; б — через 67 дней

ложения на стенке трубы. В состав биопленки входят следующие бактерии: *Gallionella*, которая является типичным представителем одноклеточных железобактерий, более чем на 90 % состоящая из окисного железа; *Leptothrix*, нитчатый микроорганизм, окисляющий закисное железо и образующий гидроокись железа, которая откладывается на поверхности клеток; *Sphaerotilus natans* — бактерия, которая обладает свойством дышать, используя кислород, и способна осаживать железо в своей защитной оболочке; *Crenothrix* — бактерии конической формы, прикрепляющиеся к материалу узким концом и вызывающие отложение железа у своего основания. Такой механизм формирования коррозионных отложений, вероятно,



Рис. 5. Съемка образца коррозионных отложений под микроскопом с увеличением в 1000 раз

имеет место на начальном этапе, вплоть до образования сплошной пленки отложений.

Использование электронной микроскопии является эффективным средством изучения коррозионных отложений в водопроводных сетях [19]. На сделанных 14.10.2022 г. фотографиях отчетливо просматриваются белые нитчатые структуры, типичные для бактерий *Leptothrix* и бурые сгустки окиси железа  $Fe_2O_3$ . На рис. 5 приведена фотография пробы материала коррозионных отложений с разрешением 1000×.

#### Выводы

Таким образом, микробиологически обусловленная коррозия при эксплуатации металлических трубопроводов в системах водоснабжения приводит к формированию коррозионных отложений.

Процессы развиваются в воде, прошедшей качественную реагентную очистку, если она не подвергалась дополнительной антикоррозионной обработке.

При ограниченном обмене воды, свойственном для внутриквартальных сетей, тупиковых и зарезервированных участков системы водоснабжения, формирование отложений происходит особенно интенсивно в первый год эксплуатации. Сезонное снижение температуры воды приводит к отмиранию микроорганизмов и выносу твердых фрагментов отложений.

Коррозионные отложения в рассмотренном примере способны увеличивать потери



напора в стальных трубах в 1,5–2,7 раз, что должно учитываться при калибровке сетей и гидравлических расчетах. Наиболее эффективными представляются те методы калибровки, которые основаны на натуральных замерах гидравлического сопротивления с последующей обработкой результатов и их классификацией по условиям эксплуатации. Исследования в направлении механизмов формирования коррозионных отложений в водопроводных трубах планируется продолжить в направлении учета химического состава воды.

### Библиографический список

1. Дикаревский В. С., Краснянский И. И. Напорные водоводы железнодорожного водоснабжения. М.: Транспорт, 1978. 360 с.
2. Альтшуль А. Д. Гидравлические потери на трение в водоводах электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1985. 104 с.
3. Продоус О. А. Зависимость продолжительности использования металлических трубопроводов систем водоснабжения от толщины слоя отложений на внутренней поверхности труб // Сборник докладов XV Междунар. науч.-техн. конф. «Яковлевские чтения» 2020. М.: МИСИ–МГСУ, 2020. С. 113–117.
4. Хоружий П. Д. Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений. Львов: Вища школа: Изд-во Львов. ун-та, 1983. 152 с.
5. Петросов В. А. Изменение гидравлических сопротивлений магистральных водоводов с течением времени (на опыте Харьк. водопровода): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04; Харьк. ин-т инж. ж.-д. транспорта им. С. М. Кирова. Харьков, 1971. 19 с.
6. Гужулев Э. П. [и др.]. Водоподготовка и водно-химические режимы в теплоэнергетике. Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2005. 383 с.
7. Юдин М. Ю., Смирнова С. В., Мельник Е. А., Хмяляйнен М. М. Гидравлическая модель в системе управления водопроводной сетью Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 3. С. 20–23.
8. Щербаков В. И. Анализ, техническая диагностика и реновация систем подачи и распределения воды на основе принципов энергетического эквивалентирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.04; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. Нижний Новгород, 2002. 43 с.
9. Громов Г. Н. Использование генетических алгоритмов для калибровки гидравлических моделей

систем водоснабжения // VII Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (APCSCE 2018): сб. докл. Новосибирск, 2018. С. 48.

10. Kapelan Z. Calibration of Water Distribution System Hydraulic Models. University of Exeter: School of engineering and computer science. 2002.

11. Селиванов А. С. Использование результатов решения обратных задач потокораспределения для изучения изменения пропускной способности металлических труб вследствие внутренней коррозии // Вестник Поморского университета. 2006. № 4. С. 156–164.

12. Разумов А. С. Биологические обрастания в системе питьевого и технического водоснабжения и меры борьбы с ними. М., 1953. 56 с.

13. Болеев А. А., Потоловский Р. В., Акимов О. Ю. Изучение влияния величины рН и солесодержания воды на скорость коррозии трубопроводов // Научный потенциал регионов на службу модернизации: межвуз. сб. науч. ст.; под общ. ред. В. А. Гутмана, А. Л. Хаченьяна. Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ». С. 103–105.

14. Ford T., Mitchell R. The ecology of microbial corrosion // Advances in Microbial Ecol. 1990, Vol. 11. Pp. 231–262.

15. Lee W., Lewandowski Z., Nielsen P.H., Hamilton W.A. Role of sulfate-reducing bacteria in corrosion of mild steel: A review // Biofouling. 1995, Vol. 8. Pp. 165–194.

16. Coetser S.E., Cloete T.E. Biofouling and Biocorrosion in Industrial Water Systems // Critical Reviews in Microbiology. 2005, Vol. 31. Pp. 213–232.

17. World leading html5 digital publishing platform. Edstrom. Biofilm. Key to understanding and controlling bacterial growth in Automated Drinking Water Systems / Edstrom. URL: <https://fliphtml5.com/zzsm/reil> (дата обращения: 17.11.2021).

18. Продоус О. А., Шипилов А. А., Альтшуль А. Д., Якубчик П. П. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями. СПб.; М.: Перо, 2021. 238 с.

19. Чухин В. А., Андрианов А. П. Изучение коррозионных отложений в водопроводных сетях с использованием электронной микроскопии // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2015. Вып. 4(40). Ст. 7. URL: <http://www.vestnik.vgasu.ru/> (дата обращения: 17.10.2022).

### References

1. Dikarevskij V. S., Krasnyanskij I. I. *Napornye vodovody zheleznodorozhnogo vodosnabzheniya* [Pressure water conduits of railway water supply]. Moscow, Transport Publ., 1978, 360 p.
2. Al'tshul' A. D. *Gidravlicheskie poteri na trenie v vodovodah elektrostancij* [Hydraulic friction losses



in the water conduits of power stations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 104 p.

3. Prodous O. A. *Zavisimost' prodolzhitel'nosti ispol'zovaniya metallicheskih truboprovodov sistem vodosnabzheniya ot tolshchiny sloya otlozhenij na vnutrennej poverhnosti trub* [Dependence of duration of using metal pipelines of water supply systems on the thickness of deposit layer on inner surface of pipes]. *Sbornik dokladov XV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Yakovlevskie chteniya» 2020* [Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference "Yakovlev Readings" 2020]. Moscow, MISI-MGSU Publ., 2020, pp. 113–117..

4. Horuzhij P. D. *Raschet gidravlicheskogo vzaimodejstviya vodoprovodnyh sooruzhenij* [Calculation of hydraulic interaction of waterworks facilities]. Lvov, Vishcha shkola Publ., 1983, 152 p.

5. Petrosov V. A. *Izmenenie gidravlicheskikh soprotivlenij magistral'nyh vodovodov s techeniem vremeni (na opyte Har'k. vodoprovoda). Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Variation of hydraulic resistances of main water pipelines with time (on the experience of Kharkov water pipeline). Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Khar'kovskij in-t inzh. zh.-d. transporta im. S. M. Kirova. Har'kov Publ., 1971, 19 p.

6. Guzhulev E. P., et al. *Vodopodgotovka i vodno-himicheskie rezhimy v teploenergetike* [Water-treatment and water-chemical regimes in thermal power engineering]. Omsk, Omskiy gos. tekhn. un-t Publ., 2005, 383 p.

7. Yudin M. Yu., Smirnova S. V., Mel'nik E. A., Hyamyalyajnen M. M. *Gidravlicheskaya model' v sisteme upravleniya vodoprovodnoj set'yu Sankt-Peterburga* [Hydraulic model in control system of Saint-Petersburg water supply network]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water supply and sanitary engineering*, 2012, no. 3, pp. 20–23.

8. Shcherbakov V. I. *Analiz, tekhnicheskaya diagnostika i renovaciya sistem podachi i raspredeleniya vody na osnove principov energeticheskogo ekvivalentirovaniya. Avtoreferat diss. dokt. tekhn. nauk* [Analysis, technical diagnostics and renovation of water supply and distribution systems based on the principles of energy equivalence. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. Nizhnij Novgorod, Nizhegor. gos. arhitektur.-stroit. un-t. Publ., 2002, 43 p.

9. Gromov G. N. *Ispol'zovanie geneticheskikh algoritmov dlya kalibrovki gidravlicheskikh modelej sistem vodosnabzheniya* [Using of genetic algorithms for calibration of hydraulic models of water supply systems]. *Trudy VII Mezhdunarodnogo simpoziuma «Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstrukcij i sooruzhenij» (APCSCE 2018), sbornik dokladov* [Proceedings of the VII International Symposium "Actual problems of computer modeling of structures and constructions" (APCSCE 2018), collection of reports]. Novosibirsk, 2018, 48 p.

10. Kapelan Z. *Calibration of Water Distribution System Hydraulic Models*. Proceedings of School of engineering and computer science, University of Exeter, 2002.

11. Selivanov A. S. *Ispol'zovanie rezul'tatov resheniya obratnykh zadach potokoraspredeleniya dlya izucheniya izmeneniya propusknnoj sposobnosti metallicheskih trub vsledstvie vnutrennej korrozii* [Using the results of inverse problems of flow distribution to study changes in the carrying capacity of metal pipes due to internal corrosion]. *Vestnik Pomorskogo universiteta – Bulletin of Pomorsky University*, 2006, no. 4, pp. 156–164.

12. Razumov A. S. *Biologicheskie obrastaniya v sisteme pit'evogo i tekhnicheskogo vodosnabzheniya i mery bor'by s nimi* [Biological fouling in the system of drinking and technical water supply and measures to combat it]. Moscow, 1953, 56 p.

13. Boleev A. A., Potolovskij R. V., Akimov O. Yu. *Izuchenie vliyaniya velichiny rN i solesoderzhaniya vody na skorost' korrozii truboprovodov* [Study of the effect of pH value and salt content of water on the rate of corrosion of pipelines]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnykh statej «Nauchnyj potencial regionov na sluzhbu modernizacii»* [In: Interuniversity collection of scientific papers "Regional scientific potential in the service of modernization"]. Ed. by Gutman V. A., Hachen'yan A. L. Astrahan', GAOU AO VPO AISI Publ., pp. 103–105.

14. Ford T., Mitchell R. The ecology of microbial corrosion. *Advances in Microbial Ecol.*, 1990, vol. 11, pp. 231–262.

15. Lee W., Lewandowski Z., Nielsen P. H., Hamilton W. A. Role of sulfate-reducing bacteria in corrosion of mild steel. Review. *Biofouling*, 1995, vol. 8, pp. 165–194.

16. Coetser S. E., Cloete T. E. Biofouling and biocorrosion in industrial water systems. *Critical Reviews in Microbiology*, 2005, vol. 31, pp. 213–232.

17. *World leading html5 digital publishing platform. Edstrom. Biofilm. Key to understanding and controlling bacterial growth in Automated Drinking Water Systems*. Edstrom. Available at: <https://fliphtml5.com/zzsm/reil> (accessed: 17.11.2021).

18. Prodous O. A., Shipilov A. A., Al'tshul' A. D., Yakubchik P. P. *Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnyh trub iz stali i serogo chuguna s vnutrennimi otlozheniyami* [Tables for hydraulic calculation of water pipes made of steel and grey cast iron with internal deposits]. St. Petersburg - Moscow, Pero Publ., 2021, 238 p.

19. Chuhin V. A., Andrianov A. P. *Izuchenie korroziionnykh otlozhenij v vodoprovodnyh setyah s ispol'zovaniem elektronnoj mikroskopii* [Study of corrosion deposits in water supply networks using electron microscopy]. *Internet-Vestnik VolgGASU – VolgGASU Internet-Bulletin*, 2015, iss. 4(40), art. 7. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/> (accessed: 17.10.2022).