

В. А. ОРЛОВ
С. П. ЗОТКИН
Д. В. ПОДОЛЯН
Е. С. ГОГИНА

ОПЕРАТИВНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СТАРЫХ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ДОСТИЖЕНИЕМ ЭФФЕКТА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ВЕЛИЧИН ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

RAPID RECOVERY OF OLD STEEL PIPING CAPACITY WITH ENERGY SAVING EFFECT BY REDUCING HYDRAULIC RESISTANCE VALUES

Рассматриваются вопросы проектирования ремонтных работ по реконструкции напорных стальных трубопроводов с применением технологии Swagelining путем протаскивания в старые трубопроводы предварительно сжатых полимерных труб. Представлены сведения по нормативной и технической документации и области применения передовой технологии, по условиям монтажа и эксплуатации, а также по сравнительной оценке энергопотребления после реконструкции ветхих участков трубопроводов полимерными трубами с возможностью минимизации энергозатрат при транспортировке воды в условиях неизотермического режима работы трубопровода при изменении гидравлических характеристик.

Ключевые слова: трубопроводы, гидравлические характеристики, бестрашпейные технологии, энергопотребление, автоматизированная программа

Введение

В настоящее время более 40 % стальных трубопроводных сетей систем водоснабжения требует оперативного ремонта по причине старения, сопровождающегося появлением различного рода дефектов (повреждений) в виде сквозных отверстий (свищей), коррозии внутренних стенок трубопроводов, расхождения сварных швов, утонения стенок и тем самым нарушения несущей способности [1].

Восстановление трубопроводов заключается в проведении комплекса технических мероприятий для улучшения функциональных свойств существующего трубопровода с полным или частичным использованием его конструкции независимо от исходного материала изготовления труб [2–4]. Повреждения трубопроводов приводят к утечкам воды и негативным явлениям повышения уровня грунтовых вод над трубопро-

The design of repair work for the reconstruction of pressure steel pipelines using Swagelining technology by pulling pre-compressed polymer pipes into old pipelines is considered. Information on regulatory and technical documentation and the field of application of advanced technology, on installation and operation conditions, as well as on the comparative assessment of energy consumption after reconstruction of dilapidated sections of pipelines with polymer pipes with the possibility of minimizing energy consumption during water transportation under conditions of non-thermal operation of the pipeline with changes in hydraulic characteristics is presented.

Keywords: pipelines, hydraulic characteristics, trenchless technologies, power consumption, automated program

водной сетью, что ведет к снижению пористости грунтового массива и суффозионным провалам.

Согласно нормативному сроку службы, стальные трубы должны эксплуатироваться в течение 20 лет, однако, по причине указанных повреждений, исчерпывая свой ресурс, они выходят из строя значительно раньше. Возникающие аварийные ситуации, связанные с выходом из строя ветхих, а также морально устаревших инженерных сетей в городах РФ, составляют 31 % от общего количества чрезвычайных ситуаций, уступая лишь пожарам и взрывам, на долю которых приходится 34 % [5].

Если говорить о трубопроводах хозяйственно-питьевого водоснабжения, то большой проблемой является ухудшение органолептических свойств воды, подводимой потребителям. Несмотря на выполнение нормативных требований к технологии обработки воды на станциях водоподготовки, из-за многочислен-

ных дефектов труб к потребителю поступает значительно уступающая по качественным показателям вода. Кроме того, в связи с проведением активных мероприятий по сокращению водопотребления в городах (экономии воды), в ранее запроектированных водопроводных сетях снижаются скорости течения, что вызывает ухудшение органолептических показателей воды, относящихся к санитарно-гигиеническим параметрам, характеризующим оптимальные условия жизнедеятельности человека.

Применяя бестраншейные технологии ремонта трубопроводов, в частности технологию ремонта путем предварительного термомеханического сжатия полимерных труб и протаскивания их в старые трубопроводы (*Swagelining*), достигаются эффекты ресурсо- и энергосбережения, а также сохраняются качественные показатели транспортируемой питьевой воды за счет увеличения скоростей течения воды.

Современное городское строительство невозможно представить без задействования подземного пространства города. Размещение всех транспортирующих трасс подземных инженерных систем ограничено жилой застройкой и транспортными путями. Особо остро поднимается вопрос доступности коммуникаций при проведении ремонтных работ. К сегодняшнему моменту порядка 50 % сетей нуждается в замене или восстановлении, что только усиливает актуальность решения данного вопроса и необходимость в поиске новых методов прокладки и реконструкции [6]. К примеру, одним из возможных методов восстановления стальных трубопроводов является использование труб из альтернативных материалов с улучшенными гидравлическими характеристиками [7].

Непринятие оперативных мер повышения эффективности, работоспособности и реновации подземных водопроводов усугубляет ситуацию многочисленными негативными последствиями для населения и окружающей природной среды. Водопроводные сети должны обеспечивать гарантированный физический барьер от загрязнений подаваемой воды и поддерживать в ней требуемые санитарно-гигиенические показатели [8, 9].

Применение традиционных траншейных способов реконструкции может оказаться проблематичным в условиях современной городской застройки и интенсивности движения, принести большие неудобства и финансовые затраты.

Методы и материалы

В качестве материала исследований рассматривается одна из многочисленных технологий

реновации ветхих трубопроводов с помощью полимерных труб, которые подвергаются термомеханическому сжатию с последующим распрямлением в реконструируемом трубопроводе после их протяжки в ветхий существующий (*Swagelining*).

Методом исследований является анализ сметного расчета стоимости реконструкции и автоматизированный расчет потребления электроэнергии при транспортировке воды с разными температурными условиями окружающей среды.

Метод *Swagelining* применяется для бестраншейного ремонта всех типов трубопроводных сетей: напорных, самотечных, подземных, наземных. Метод применим для реконструкции трубопроводов диаметром от 100 до 1200 мм при длине ремонтируемого участка до 1000 м.

Технология позволяет быстро осуществлять установку полимерной трубы большего диаметра в старые трубопроводы меньшего диаметра за счет ее предварительного термомеханического сжатия. Таким образом, при санации изношенных трубопроводов внутри них формируется новая труба, плотно прижатая к внутренней поверхности основной трубы и превосходящая последнюю по целому ряду характеристик. При этом трубопровод приобретает двухслойную конструкцию и является самостоятельной конструкцией. Плотный пригон новой полимерной трубы к стенкам старого трубопровода создает условия весьма незначительного уменьшения его диаметра с одновременным уменьшением коэффициента гидравлического трения, т. е. обеспечение эффекта энергосбережения при транспортировке воды.

Санированные методом *Swagelining* трубы успешно прошли испытания на быструю локализацию трещин в ходе эксплуатации (ряд тестов проводился более 5000 ч) на разлом и температурные испытания с надпилотом при температуре 80 °С.

Методом *Swagelining* в Москве реконструировано 3,5 км водопроводных сетей.

К преимуществам метода *Swagelining* также можно отнести возможность обеспечить такой внутренний диаметр восстановленной трубопроводной системы за счет варьирования значением *SDR* (отношение диаметра к толщине стенки), чтобы скорости течения воды соответствовали расчетным для систем питьевого водоснабжения (т. е. порядка 1 м/с). Данное мероприятие приводит к сохранению органолептических характеристик воды.

Технология включает в себя процесс сжатия трубопровода, предварительно нагретого до температуры 70–80 °С (рис. 1). При этом коническая матрица обеспечивает сужение тру-

бопровода для его беспрепятственного протягивания внутри существующего. На следующем этапе новая труба с уменьшенным диаметром протягивается в старую трубу при помощи троса и лебедки, установленной в следующем по ходу движения трубы колодце. Протягивание производится до того момента, пока трубопровод не займет требуемое положение.

Обратный процесс деформации полимерной трубы в ветхом трубопроводе происходит автоматически за счет эффекта «памяти». Труба расширяется до тех пор, пока ее внешний диаметр не достигнет размера внутреннего диаметра старого трубопровода и не образует с его стенкой плотного соединения. При этом отпадает необходимость применения цементного раствора или специальных отвердителей.

На рис. 2 представлен результат восстановления старого трубопровода с образованием двухтрубной конструкции.

В целях расчета потребления электроэнергии $\Delta Э$ при использовании труб из полиэтилена в период реализации технологии *Swagelining* при транспортировке воды, в том числе в зависимости от температурных условий, использовалась формула

$$\Delta Э = 0,81 \cdot Q^3 \cdot l \cdot \lambda \cdot 24 \cdot 365 / (d^5 \cdot \eta_p),$$

где $\Delta Э$ – величина потребленной электроэнергии, кВт·ч/год; Q – расход подаваемой трубопроводом воды, м³/с; l – длина участка трубопровода, м; η_p – коэффициент полезного действия насосной установки; 24 – количество часов работы насоса в сутки, ч; 365 – количество дней в году; λ – коэффициент гидравлического трения; d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Данная формула заложена в алгоритм автоматизированной программы расчета потребления электроэнергии при транспортировке

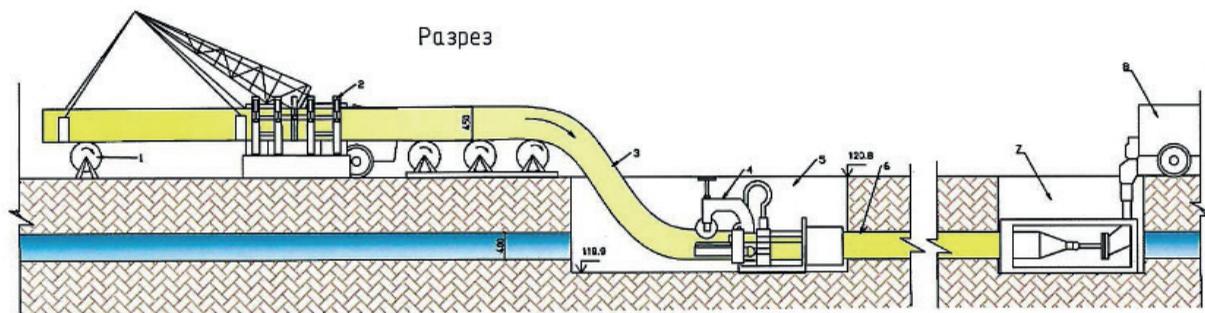


Рис. 1. Схема восстановления трубопровода по методу *Swagelining*:

1 – барабан; 2 – аппарат для сварки полиэтиленовых труб; 3 – исходная полимерная труба, подвергающаяся термомеханическому сжатию; 4 – устройство для протягивания полимерного трубопровода с топкой и конической матрицей (сужающим устройством); 5 – стартовый котлован; 6 – труба, подвергаемая восстановлению; 7 – финишный колодец; 8 – тянущая машина (лебедка)

Fig. 1. Swagelining Pipeline Recovery Diagram:

1 – drum; 2 – apparatus for welding polyethylene pipes; 3 – shows an initial polymer tube subjected to thermomechanical compression; 4 – shows a device for pulling a polymer pipeline with a combustion chamber and a conical matrix (constricting device); 5 – starting pit; 6 – shows the pipe to be restored; 7 – finishing well; 8 – pulling machine (winch)



Рис. 2. Результат восстановления трубопровода

Fig. 2. Pipeline Recovery Result

воды по трубопроводам в зависимости от температурных условий транспортируемой воды и окружающей среды [10].

Результаты исследования

Для определения степени деформации трубопроводов (изменения диаметра и толщины стенки полимерной трубы после операций ее термомеханического сжатия и распрямления), при использовании технологии *Swagelining*, применялась специальная автоматизированная программа [11].

Исходными параметрами, используемыми при автоматизированных расчетах в обеих программах, являются следующие:

- внутренний диаметр ветхого стального трубопровода 500 мм;
- протяженность трубопровода 600 м;
- внутренний диаметр полиэтиленовых труб 560 и 630 мм (*SDR 21*);
- средняя температура стенки трубопровода (грунта вокруг трубы) 16 °С;
- средняя температура воды в источнике водоснабжения 16 °С (летний период) и 8 °С (зимний период);
- расход транспортируемой воды 0,14 м³/с;
- внутренние диаметры восстановленного трубопровода после проведения реновации стального трубопровода полиэтиленовой тру-

бой исходными диаметрами 560 и 630 мм соответственно 446,04 и 438,51 мм;

- коэффициент полезного действия насосной установки 0,9.

Сводная выходная информация по автоматизированному расчету параметров в летний и зимний периоды представлена в табл. 1 и 2.

Сопоставление значений потребления электроэнергии в табл. 1 и 2 по пунктам 8, т. е. с учетом температур воды и стенки трубопровода и без их учета, наблюдается расхождение, что свидетельствует о влиянии температуры воды на потребление электроэнергии: с увеличением температуры в источнике водоснабжения потребление электроэнергии уменьшается. Например, для зимнего периода разница в потреблении электроэнергии составляет:

- для диаметра 446,04 мм
10224,114 - 10217,143 = 6,971 кВт·ч в год;
- для диаметра 438,51 мм
11115,787 - 11089,143 = 26,644 кВт·ч в год.

Кроме того, необходимо отметить, что даже при незначительном уменьшении диаметра полиэтиленовой трубы (с 446,04 до 438,51 мм) происходит рост энергозатрат. Например, для зимних условий на 26,644 – 6,971 = 19,673 кВт·ч в год, или на 26,16 %.

Отсюда следует вывод, что при проектировании и возможном управлении процессом транспортировки воды возникает необ-

Таблица 1
Table 1

Сводная выходная информация по результатам гидравлического и энергетического расчета двухтрубной конструкции в летний и зимний периоды при внутреннем диаметре трубопровода 446,04 мм
Summary Output for Hydraulic and Power Calculations of Double Pipe Structure in Summer and Winter with Internal Pipeline Diameter 446.04 mm

№ п/п	Расчетный показатель	Величина показателя	
		Летний период	Зимний период
1	Скорость течения воды в трубопроводе, м/с	0,896	0,896
2	Коэффициент динамической вязкости, отнесенный к потоку жидкости, Па·с	0,001131151	0.001406528
3	Коэффициент динамической вязкости, отнесенный к температуре стенки трубы, Па·с	0,001131151	0,001131151
4	Соотношение динамических вязкостей	1,0	1,243
5	Коэффициент кинематической вязкости жидкости, м ² /с	0.000001096	0,000001380
6	Число Рейнольдса	364758,11	289680,3
7	Расчетный коэффициент гидравлического трения	0,013853	0,013885
8	Потребление электроэнергии через коэффициент гидравлического трения, кВт·ч в год	10217,143	10224,114

Таблица 2
Table 2

Сводная выходная информация по результатам гидравлического
и энергетического расчета двухтрубной конструкции в летний и зимний периоды
при внутреннем диаметре трубопровода 438,51 мм
Summary Output for Hydraulic and Power Calculations
of Double Pipe Structure in Summer and Winter with Pipeline ID 438.51 mm

№ п/п	Расчетный показатель	Величина показателя	
		Летний период	Зимний период
1	Скорость течения воды в трубопроводе, м/с	0,927	0,927
2	Коэффициент динамической вязкости, отнесенный к потоку жидкости, Па·с	0,001131151	0.001406528
3	Коэффициент динамической вязкости, отнесенный к температуре стенки трубы, Па·с	0,001131151	0,001131151
4	Соотношение динамических вязкостей	1,0	1,243
5	Коэффициент кинематической вязкости жидкости, м ² /с	0,000001096	0,00000138
6	Число Рейнольдса	371021,66	294654,63
7	Расчетный коэффициент гидравлического трения	0,013897	0,013929
8	Потребление электроэнергии через коэффициент гидравлического трения, кВт·ч в год	11089,143	11115,787

ходимость учета температурных факторов для получения наиболее вероятных значений потребления электроэнергии, т. е. в проекты строительства трубопроводных сетей необходимо закладывать данные по температурным параметрам стенки трубопровода и транспортируемой воды и проводить расчеты потребления электроэнергии. Этому содействует моделирование, которое позволяет выявить оптимальные параметры управления процессом транспортировки воды на базе поиска минимальных значений потребления электроэнергии. Используя возможности автоматизированной программы, могут проводиться расчеты затрат электроэнергии в широком диапазоне температур стенки трубы (соответствующего материала и диаметра) и транспортируемой воды как для северных, так и южных регионов при различных значениях расходов воды и величин коэффициента полезного действия насосных установок.

Заключение

1. На основе анализа изучения литературных источников и практики проектирования ремонтно-восстановительных работ на трубопроводной сети показано, что текущее состояние трубопроводных сетей водоснабжения и водоотведения в странах мира является неудовлетворительным: наблюдается тенденция

динамичного износа трубопроводов с превышением нормативного срока службы трубопроводов, что свидетельствует о необходимости их оперативной замены.

2. Отмечена перспективность бестраншейных методов реконструкции трубопроводов, в результате применения которых можно существенно сократить время и стоимость работ, обеспечить ресурсо- и энергоэффективность восстанавливаемых трубопроводных систем, а также снизить риск нанесения вреда окружающей природной среде.

3. На основании проведенного анализа констатированы преимущества методов бестраншейной реконструкции и рекомендовано широкое использование метода *Swagelining*, что позволяет одновременно добиться двойного эффекта: ресурсосбережения, так как после ремонта будут ликвидированы утечки воды (эксфильтрация и инфильтрация); энергосбережения, т. е. снижения затрат на электроэнергию при транспортировке воды, в том числе с учетом различных температур окружающей среды.

4. На конкретных примерах с использованием автоматизированных программ представлены гидравлические и энергетические расчеты двухтрубной конструкции определенного диаметра в разные сезоны года, которые показали на возможность экономии энергоресурсов в зависимости от температурных условий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аникин Ю.В., Царев Н.С., Ушакова Л.И., Насчетникова О.Б. Технология бестраншейной прокладки и ремонта трубопроводов водоснабжения и водоотведения. Екатеринбург: изд-во Уральского университета, 2022. 84 с.

2. СП 273.1325800.2016. Водоснабжение и водоотведение. правила проектирования и производства работ при восстановлении трубопроводов гибкими полимерными рукавами. 2017. 71 с.

3. Александров В.И., Гвоздев О.Б., Карелин А.Э., Морозов А.А. Оценка влияния шероховатости внутренней поверхности гидротранспортных трубопроводов на величину удельных потерь напора // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 3 (130). С. 34–40.

4. Продоус О.А., Якубчик П.П. Гидравлический расчет трубопроводов из полимерных материалов с учетом параметров шероховатости внутренней поверхности труб // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 11. С. 55–60.

5. Орлов В.А. Бестраншейные технологии строительства и восстановления трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 228 с.

6. Юдина А.Ф., Кобелев Е.А. Инновационные технологии бестраншейной прокладки новых и ремонта старых инженерных сетей // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3(62). С. 101–108.

7. Продоус О.А. Прогнозирование потерь напора в трубопроводах из разных полимерных материалов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 8. С. 60–64.

8. Храменков С.В. Время управлять водой. М.: ЗАО Московские учебники и картолитография, 2008. 280 с.

9. Примин О.Г. Утечки воды. М.: изд-во МГСУ, 2022. 167 с.

10. Орлов В.А., Зоткин С.П., Иншаклова М.А. Расчет потребления электроэнергии при транспортировке воды по напорным трубопроводам. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613107 от 02.03.2021.

11. Орлов В.А., Зоткин С.П., Зоткина И.А., Хренов К.Е. Расчет параметров работы трубопроводов, восстанавливаемых предварительно сжатыми полимерными трубами. Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2014612753 от 06.03.2014.

2. SP 273.1325800.2016. Water supply and sanitation. Rules for Design and Execution of Work when Restoring Pipelines with Flexible Polymer Hoses. Moscow, 2017. 71 p. (In Russian)

3. Alexandrov V.I., Gvozdev O.B., Karelin A.E., Morozov A.A. Assessment of the influence of the roughness of the internal surface of hydraulic transport pipelines on the value of specific head losses. *Gornoe oborudovanie i jelectromehaniika* [Mining equipment and electromechanics], 2017, no. 3, pp. 34–40. (in Russian)

4. Prodous O.A., Yakubchik P.P. Hydraulic calculation of pipelines made of polymeric materials taking into account the roughness parameters of the inner surface of pipes. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika* [Water Supply and Sanitary Equipment], 2020, no. 11, pp. 55–60. (in Russian)

5. Orlov V.A. *Bestranshejnye tehnologii stroitel'stva i vosstanovlenija truboprovodov sistem vodosnabzhenija i vodootvedenija* [Transtranshey technologies for construction and restoration of pipelines of water supply and sewerage systems]. Moscow, Voologda, Infra-Inzeneria, 2023. 228 p.

6. Yudina A.F., Kobleev E.A. Innovative technologies of trenchless laying of new and repair of old engineering networks. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2017, no. 3(62), pp. 101–108. (in Russian)

7. Prodous O.A. Prediction of head losses in pipelines made of different polymeric materials. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika* [Water Supply and Sanitary Equipment], 2018, no. 8, pp. 60–64. (in Russian)

8. Khramenkov S.V. *Vremja upravljat' vodoj* [Time to manage water]. Moscow, CJSC Moscow Textbooks and Cartolithography, 2008. 280 p.

9. Primin O.G. *Utechki vody* [Water leaks]. Moscow, MGSU, 2022. 167 p.

10. Orlov V.A., Zotkin S.P., Inshakova M.A. Calculation of electricity consumption during water transportation through pressure pipelines. Certificate of state registration of the computer program. 2021. N. 2021613107.

11. Orlov V.A., Zotkin S.P., Zotkina I.A., Khrenov K.E. Calculation of pipeline operation parameters restored by pre-compressed polymer pipes. Certificate of state registration of the computer program. 2014. N. 2014612753.

REFERENCES

1. Anikin Y.V., Tsarev N.S., Ushakova L.I., Naschetnikova O.B. *Tehnologija bestranshejnoj prokladki i remonta truboprovodov vodosnabzhenija i vodootvedenija* [Technology of trenchless laying and repair of water supply and drainage pipelines]. Ekaterinburg, Ural University Publishing House, 2022. 84 p.

Об авторах:

ОРЛОВ Владимир Александрович

доктор технических наук, профессор
кафедры водоснабжения и водоотведения
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26
E-mail: orlov950@yandex.ru

ЗОТКИН Сергей Петрович

кандидат технических наук, доцент, профессор
кафедры информатики и прикладной математики
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26
E-mail: zotkinsp@mgsu.ru

ПОДОЛЯН Дмитрий Владимирович

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет
129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26
E-mail: dim.p-2010@yandex.ru

ГОГИНА Елена Сергеевна

кандидат технических наук, доцент,
главный научный сотрудник
Научно-исследовательский институт строительной
физики РААСН
127238, Россия, г. Москва, Локомотивный проезд, 21,
тел. (495) 482-40-76
E-mail: niisf@niisf.ru

ORLOV Vladimir Al.

Doctor of Engineering Science, Professor
of the Water Supply and Wastewater Chair
National Research Moscow State University of Civil
Engineering
129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye hw., 26
E-mail: orlov950@yandex.ru

ZOTKIN Sergey P.

PhD in of Engineering Sciences, Associate Professor,
Professor of the Computer Science and Applied
Mathematics Chair
National Research Moscow State University of Civil
Engineering
129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye hw., 26
E-mail: zotkinsp@mgsu.ru

PODOLYAN Dmitry V.

Postgraduate Student of the Water Supply and
Wastewater Chair
National Research Moscow State University
of Civil Engineering
129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye hw., 26
E-mail: dim.p-2010@yandex.ru

GOGINA Elena S.

PhD in of Engineering Sciences, Associate Professor,
Chief researcher
Research Institute of Construction Physics RAASN
127238, Russia, Moscow, Lokomotivny proezd, 21,
tel. (495) 482-40-76
E-mail: niisf@niisf.ru

Для цитирования: Орлов В.А., Зоткин С.П., Подольян Д.В., Гогина Е.С. Оперативное восстановление пропускной способности старых стальных трубопроводов с достижением эффекта энергосбережения за счет снижения величин гидравлических сопротивлений // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 1. С. 12–18. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.02.

For citation: Orlov V.A., Zotkin S.P., Podolyan D.V., Gogina E.S. Rapid recovery of old steel piping capacity with energy saving effect by reducing hydraulic resistance values. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 1, pp. 12–18. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.02.