

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 628.462:625.768

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.70-79

Реконструкция водопроводных сетей с использованием технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм»

Владимир Александрович Орлов, Сергей Петрович Зоткин,
Дмитрий Владимирович Подолян

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются вопросы проведения ремонтных работ по реконструкции напорных водопроводных трубопроводов с использованием бестраншейных технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм», позволяющих обеспечить ресурсо- и энергосбережение при транспортировке воды. Приведены сведения по нормативной и технической документации, условиям и порядку монтажа защитных покрытий восстанавливаемого трубопровода, а также результаты расчетно-аналитических исследований по сравнительному анализу и оценке возможности снижения энергозатрат при транспортировке воды в период эксплуатации трубопровода после его реконструкции. Представлены технологии бестраншейной реконструкции «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» для оперативного восстановления напорных трубопроводных сетей, а также вопросы экономии электроэнергии при транспортировке воды по трубопроводам после работ по их реконструкции указанными технологиями.

Материалы и методы. Применили аналитический, а также расчетный методы, автоматизированный программный комплекс для определения экономии электроэнергии за счет реконструкции ветхих действующих напорных трубопроводов при использовании технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм».

Результаты. С помощью расчетов выявлено преимущество технологии «Арм-Пайп» по сравнению с «Пайп-Арм» в плане потенциальной экономии электроэнергии при транспортировке воды по напорным трубопроводам.

Выводы. Проведен комплексный анализ технического и энергетического потенциала реализации передовых бестраншейных технологий реконструкции ветхих трубопроводов «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трубопроводы, реконструкция, бестраншейные методы, энергосбережение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орлов В.А., Зоткин С.П., Подолян Д.В. Реконструкция водопроводных сетей с использованием технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 70–79. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.70-79

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Подолян, dim.p-2010@yandex.ru.

Reconstruction of water supply networks using “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” technologies

Vladimir A. Orlov, Sergey P. Zotkin, Dmitrii V. Podolian

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The issues of carrying out repair work on the reconstruction of pressure water pipelines using trenchless technologies “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm”, which allow to ensure resource conservation during water transportation, are considered. Information on regulatory and technical documentation, conditions and installation procedure for protective coatings of the pipeline being restored, as well as the results of computational and analytical studies on comparative analysis and assessment of the possibility of reducing energy consumption during water transportation during the operation of the pipeline after its reconstruction are presented. The technologies of trenchless reconstruction of “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” for the rapid restoration of pressure pipeline networks, as well as issues of saving electricity when transporting water through pipelines after work on their reconstruction with these technologies are presented.

Materials and methods. Analytical as well as computational methods by using an automated software package to determine energy savings due to the reconstruction of dilapidated existing pressure pipelines using “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” technologies were applied.

Results. Calculations have revealed the advantage of “Arm-Pipe” technology in comparison with “Pipe-Arm” in terms of potential energy savings when transporting water through pressure pipelines.

Conclusions. A comprehensive analysis of the technical and energy potential of the implementation of advanced trenchless technologies for the reconstruction of dilapidated “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” pipelines was carried out.

KEYWORDS: pipelines, reconstruction, trenchless methods, energy saving

FOR CITATION: Orlov V.A., Zotkin S.P., Podolian D.V. Reconstruction of water supply networks using “Arm-Pipe” and “Pipe-Arm” technologies. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):70-79. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.70-79

Corresponding author: Dmitrii V. Podolian, dim.p-2010@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Значительный износ эксплуатируемых длительное время трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов требует проведения оперативной реновации и модернизации инженерных сетей. К рекомендуемым методам эффективного восстановления ветхих трубопроводов относят бестраншейные технологии, которые дают возможность не только нейтрализовать негативные процессы электрохимической и биологической коррозии, но и обеспечить требуемый уровень несущей способности трубопроводных сетей и исключить утечки [1–3]. Также на повестке дня должны стоять актуальные вопросы надежности восстанавливаемого трубопровода [4].

Благодаря этому продлевается срок службы трубопроводного транспорта, а для напорных трубопроводов создаются дополнительные гарантии эффективного снижения энергозатрат на транспортировку жидкостей. Бестраншейные технологии восстановления трубопроводов позволяют минимизировать возникающие риски от ущербов (экологического, социального и материального), повышая при этом надежность работы инженерных сетей и содействуя регулированию ценового вопроса, возникающего в ходе их использования.

Методы бестраншейного ремонта включают различного рода операции, на внутреннюю поверхность ветхих трубопроводных сетей наносятся защитные покрытия, которые классифицируют как набрызговые (напыляемые), сплошные в виде труб или полимерных рукавов, навивочные (намоточные) и местные (бандажи и т.д.) [5, 6]. В задачи проводимых исследований входил комплекс мероприятий по ознакомлению с некоторыми перспективными типами внутренних защитных покрытий, позволяющих оперативно и экономично восстанавливать напорные трубопроводы.

В качестве материала исследований представлена одна из разновидностей набрызгиваемых (напыляемых) технологий реновации, получившая наименование соответственно «Пайп-Арм» и «Арм-Пайп».

Сущность технологии реновации водопропускных труб «Пайп-Арм» заключается в восстановлении

их несущей способности путем бетонирования по несъемной полимерной опалубке и состоит из трех взаимосвязанных технических решений: монтажа в трубу арматурного каркаса усиления; установки в тело трубы полимерного защитного рукава; омоноличивания конструкции, т.е. наполнения высокомарочной смесью пространства между телом трубы и полимерным рукавом [7–9]. Арматурный каркас состоит из металлической продольной арматуры с поперечной навивкой из композитной стеклопластиковой арматуры, не подвергаемой коррозии. Каркас изготавливается на месте производства работ и закрепляется на внутренней стенке санируемой трубы.

Технология санации водопропускных труб «Арм-Пайп» заключается в формировании новой трубы из кварц-цементной смеси, армированной специальным композитным материалом, с использованием старого трубопровода в качестве футляра [10–12]. Этот метод позволяет создавать новый трубопровод в старом с требуемыми эксплуатационными характеристиками, включая использование его в сейсмических районах¹.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методом исследований является анализ технологических операций при реализации технологий реновации «Пайп-Арм» и «Арм-Пайп», а также расчет экономии энергозатрат на транспортировку воды до и после ремонтных работ по двум альтернативным методам при восстановлении трубопровода соответствующего диаметра и протяженности [13, 14].

Инновационная технология «Пайп-Арм», разработанная специально для ремонта и восстановления водопропускных труб, обладает рядом преимуществ, к которым следует отнести: устранение дефектов трубопроводных систем, предотвращение развития новых дефектов, предваряя разрушение их конструкций, продление срока службы трубопроводов до 50 лет и более, снижение эксплуатационных затрат, а также сметной стоимости и сроков проведения ремонтных работ, обеспечение экологической

¹ Рекламный листок ООО «УК «Инновационные Технологии». 2016.

безопасности в разных природных и климатических условиях [15–18].

В качестве основы материала защитного покрытия при реализации технологии «Пайп-Арм» ГК «ТЕХПОЛИМЕР» представляет полимерный рукав, изготовленный из полиэтилена высокой плотности согласно ТУ 22.29.29-019-56910145–2019. Одна сторона рукава имеет гладкую поверхность с низким коэффициентом шероховатости, другая оборудована специальными анкерными элементами, предназначенными для закрепления в монолитном слое бетона (рис. 1). Пространство между полимерным рукавом и трубой заполняется специальной высокомарочной, безусадочной и самоуплотняющейся смесью, изготовленной на основе минерального вяжущего. Эта смесь обеспечивает равномерное заполнение всех пустот, надежно связывая арматурный каркас и анкерные элементы полимерного рукава. Получаемая в результате реновации новая конструкция обладает высокой несущей способностью, низким гидравлическим сопротивлением и устойчивостью к негативным воздействиям окружающей среды. При этом максимально полезное сечение водопропускной трубы сохраняется, так как низкий коэффициент шероховатости полимерного рукава компенсирует незначительное сужение отверстия, что обеспечивает высокую пропускную способность восстановленного трубопровода.

Крепление мембраны к бетонной поверхности трубы осуществляется с помощью анкерных элементов в количестве 1230 штук на 1 м² ее поверхности.

Альтернативным методом восстановления трубопроводов по отношению к «Пайп-Арм» служит технология «Арм-Пайп», которая позволяет локализовать такие виды повреждений, как коррозионные обрастания, абразивный износ, дефекты в стыках труб и их смещения, обеспечивая при этом полное восстановление несущей способности трубопроводов разного назначения в диапазонах диаметров от 800 до 2600 мм (рис. 2).

Процесс реконструкции трубопровода методом «Арм-Пайп» состоит из нескольких этапов. Сначала проводятся подготовительные работы, включающие раскопку стартовой и конечной траншей, а также подготовку трубопровода. Затем определяются технологические захваты в зависимости от необходимой длины шланга для подачи смеси и мощности растворонасоса. Далее наносится специальная полимерная обрешетка, которая препятствует возможным разрушительным усилиям извне, в том числе при полном статическом отказе старой трубы (рис. 3). К преимуществам такой арматуры, например, из базальтового волокна относится то, что она не подвергается коррозии даже в случае обнажения по какой-либо причине. Монтаж обрешетки производился с помощью специальной передвижной машины, конструкция которой за счет рамы с роликами позволяет использовать ее

в широком диапазоне внутренних диаметров трубопровода.

Для приготовления цементно-песчаной смеси (ЦПС) требуется выполнить подготовку необходимых компонентов. Сначала песок необходимо просеять через сито и затем хранить в специальных емкостях, чтобы исключить наличие инородных предметов. Портландцемент также должен соответствовать определенным стандартам, а именно не содержать сгустков



Рис. 1. Фрагмент полимерного рукава с анкерными элементами и арматурным каркасом на внутренней поверхности восстанавливаемого трубопровода



Рис. 2. Фрагмент нанесенного на обрешетку защитного покрытия по технологии «Арм-Пайп»



Рис. 3. Внутреннее армирование трубопровода сеткой (решеткой) из композитных материалов

и комков, плотность цементного теста не более 27 %, активность радионуклидов не менее 370 Бк/кг в соответствии с ГОСТ 31108–2020. При необходимости в составе ЦПС могут присутствовать минеральные добавки, но их содержание не должно превышать 10 %, чтобы улучшить физико-химические свойства покрытия.

К песку также предъявляются строгие требования по его составу и содержанию примесей. Например, крупность зерен не более 1 мм, фракции с размерами от 0,315 до 0,63 мм должны составлять не менее 70 % от общей массы песка. Вода, используемая для приготовления смеси, должна соответствовать ГОСТ 23732–79 и иметь температуру от +10 до +30 °С. Следует добиться оптимального соотношения твердых компонентов (цемента и песка) в пределах от 1:1 до 1:1,2 по объему и от 1:1,115 до 1:1,338 по массе.

Минимальная толщина наносимого на внутреннюю поверхность трубопровода защитного слоя должна определяться диаметром и материалом труб, а требуемая возраст труб, толщиной их стенок и физическим состоянием (степенью износа).

Незначительное сужение проходного сечения восстанавливаемого трубопровода нивелируется низким коэффициентом шероховатости затвердевшей цементно-песчаной смеси, что позволяет сохранить высокую пропускную способность многослойной конструкции трубопровода.

На всех этапах производства работ по технологиям «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» выполняется строгий контроль по качественным параметрам используемых материалов и оборудования. Также ведется визуальное и телеинспекционное внутритрубное обследование трубопровода с подробной фото- и видеофиксацией всех технологических процессов, влияющих на качество выполнения работ.

Все фото- и видеоматериалы тщательно анализируются ответственным за производство работ, и при необходимости вносятся качественные корректировки, предварительно согласованные с заказчиком.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В задачи базовых расчетов по применению технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм» для санации трубопроводных сетей входили вопросы возможной экономии электроэнергии при транспортировке воды по трубопроводу после работ по его реконструкции.

Расчет производился с использованием автоматизированной программы [8], в алгоритм которой заложена формула для определения экономии электроэнергии (ΔE , кВт·ч в год) через показатели расхода воды (Q , м³/с), удельных сопротивлений соответственно старого и нового трубопровода ($A_{\text{стар}}$, $A_{\text{нов}}$, с²/м⁶), зависящих от внутреннего диаметра (d , м), коэффициента полезного действия (КПД) насосной установки ($\eta_{\text{нас.устан}}$), продолжительности ее работы в часах и сут-

ках соответственно (24 ч, 365 сут) и протяженности трубопровода (l , м).

Внутренний диаметр старого стального трубопровода принят равным $d = 0,7$ м, расход транспортируемой воды $Q = 0,392$ м³/с, протяженность трубопровода $l = 1000$ м, КПД насосной установки $\eta_{\text{нас.устан}} = 0,8$. Толщина слоя внутреннего защитного покрытия для обоих вариантов реновации составляла 10 мм (соответственно с учетом арматурных каркасов/обрешетки, толщины полимерного рукава и самоуплотняющихся смесей-наполнителей).

Величины удельных сопротивлений старого ($A_{\text{стар}}$) и новых ($A_{\text{нов.ПА}}$, $A_{\text{нов.АП}}$) трубопроводов определялись по формулам:

$$A_{\text{стар}} = 0,0017 \cdot d^{-5,1359};$$

$$A_{\text{нов.ПА}} = 0,0007 \cdot d_{\text{ПА}}^{-5,2791}; A_{\text{нов.АП}} = 0,0006 \cdot d_{\text{АП}}^{-5,3081}.$$

Расчет величины экономии электроэнергии ΔE для обоих вариантов осуществлялся по базовой формуле:

$$\Delta E = [9,81 Q^3 l (A_{\text{стар}} - A_{\text{нов}}) / \eta_{\text{нас.устан}}] \times 24 \cdot 365 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год}.$$

Ниже представлены результаты расчета величин удельных сопротивлений защитных покрытий при реализации альтернативных технологий реновации для соответствующих внутренних диаметров d после проведения ремонтных работ и экономии электроэнергии при транспортировке воды после реновации:

- по технологии «Пайп-Арм» при внутреннем диаметре трубопровода $d_{\text{ПА}} = 0,68$ м:

$$A_{\text{нов.ПА}} = 0,005362 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$\Delta E_{\text{ПА}} = [9,81 Q^3 l (A_{\text{стар}} - A_{\text{нов.ПА}}) / \eta_{\text{нас.устан}}] 24 \cdot 365 = 34 \, 006 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год};$$

- по технологии «Арм-Пайп» при внутреннем диаметре трубопровода $d_{\text{АП}} = 0,68$ м:

$$A_{\text{нов.АП}} = 0,004647 \text{ с}^2/\text{м}^6;$$

$$\Delta E_{\text{АП}} = [9,81 Q^3 l (A_{\text{стар}} - A_{\text{нов.АП}}) / \eta_{\text{нас.устан}}] \times 24 \cdot 365 = 38 \, 627 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год}.$$

Таким образом, несмотря на сужение живого сечения старого стального трубопровода после ремонта и благодаря малому коэффициенту удельного сопротивления новых внутренних покрытий, можно добиться экономии электроэнергии при транспортировке воды соответственно на 34 006 кВт·ч в год (по технологии «Пайп-Арм») и 38 627 кВт·ч в год (по технологии «Арм-Пайп»).

В то же время, принимая условие относительно равенства затрат на ремонтно-восстановительные работы на стальном трубопроводе альтернативными технологиями, преимущество в плане потенциальной экономии электроэнергии при транспортировке воды имеет технология «Арм-Пайп» по сравне-

нию с «Пайп-Арм» ($\Delta E_{\text{АП}} - \Delta E_{\text{ПА}} = 4621 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ в год или 13,59 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описана сущность, технический потенциал и условия монтажа передовых технологий бестраншейной реконструкции ветхих трубопроводов «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм».

С использованием информационно-поисковой автоматизированной системы проведен анализ применения технологий «Арм-Пайп» и «Пайп-Арм»

для реновации ветхого стального трубопровода, который показал, что, наряду с ресурсосбережением и повышением несущей способности трубопровода, возможно достичь снижения потребления электроэнергии при транспортировке воды по трубопроводам.

Для рассматриваемой частной задачи реконструкции старого стального трубопровода определенной длины, диаметра и транспортируемого расхода при использовании альтернативных технологий экономия электроэнергии на транспортировку воды может составить от 34 006 до 38 627 кВт·ч в год.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Shah G., Pitroda J., Bhavsar J. Trenchless technology: a new era towards underground utility construction // Engineering: Issues, opportunities and Challenges for Development. 2015. Pp. 1–8.

2. Храменков С.В. Стратегия модернизации водопроводной сети. М. : Стройиздат, 2005. 398 с. EDN QNLXXX.

3. Примин О.Г. Утечки воды. М. : Изд-во МИСИ–МГСУ, 2022. 168 с. DOI: 10.22227/978-5-7264-3010-2.2022.168. EDN CWUKBX.

4. Романов Н.Р. Низкая надежность, отказы и реконструкция инженерных сетей // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2020. № 3. С. 6. EDN LWRGIU.

5. Орлов В.А. Бестраншейные технологии строительства и восстановления трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения. Вологда : Изд-во «Инфра-Инженерия», 2024. 228 с. EDN LRGVFI.

6. Бубнов Д.В., Волнушкина К.А., Брянская Ю.В. Гидравлические характеристики трубопроводов, восстановленных с помощью полимерных рукавов // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ студентов института промышленного и гражданского строительства. 2023. С. 266–275.

7. Горьков К.В. Технология «ПАЙПАРМ» для восстановления и ремонта водопропускных труб // Гидротехника. 2021. № 4 (65). С. 90–91. EDN IZQRDC.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615165 от 12.04.2024. Расчет экономии электроэнергии при транспортировке воды по напорным трубопроводам после их бестраншейного ремонта / Орлов В.А., Зоткин С.П., Подолян Д.В., Горелов А.В.

9. Volgin G. The hydraulic resistance coefficient in the conditions of simultaneous effect of Re, Fr and B/h // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 05031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199705031

10. Рылова И.А., Боровков В.С. Эквивалентная шероховатость напорных и безнапорных водоводов // Вестник МГСУ. 2013. № 4. С. 181–187. EDN PZIERZ.

11. Кадулин С.С. Разработка инновационного решения модернизации инженерного оборудования систем водоснабжения // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2020. № 3.

12. Сидоров И.В., Петрова А.Б. Инновации в области водоснабжения: Технологии реконструкции водопроводных сетей // Журнал водных ресурсов. 2020. № 12 (4). С. 215–220.

13. Фролова Е.М. Устойчивое развитие водопроводных сетей: вызовы и решения // Экология и промышленность России. 2023. № 28 (1). С. 78–83.

14. Гринь В.Г., Пахомов А.А., Колобанова Н.А., Шишкин А.С. Антикоррозийные покрытия как фактор обеспечения прочностных показателей реконструируемых металлических трубопроводов // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3 (63). С. 404–415. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-42. EDN UFPPMH.

15. Диденко Л.М., Клименко А.А. Обеспечение безопасности при выполнении работ по реконструкции водопроводных сетей в стесненных условиях // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2016. № 7 (220). С. 29–37. EDN WZTHMT.

16. Николенко И.В., Крымов Р.С., Жилин К.А. Анализ отказов трубопроводных сетей систем водоснабжения городов Крыма с целью обоснования параметров реконструкции // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 7 (59). С. 61–72. EDN ZWBTHJ.

17. Волна В.В., Крымов Р.С., Мельникова Н.С. Оптимизация системы водоснабжения г. Феодосия с учетом износа трубопроводов // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 27 (79). С. 59–69. EDN WDBNHU.

18. Носкова А.О. Разработка моделей развития инженерной инфраструктуры в масштабах градостроительного планирования и реорганизации сложившейся застройки // Вестник науки и образования. 2019. № 7–1 (61). С. 28–31. EDN CIQZGP.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Александрович Орлов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; orlov950@yandex.ru;

Сергей Петрович Зоткин — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры информатики и прикладной математики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; zotkinsp@mgsu.ru;

Дмитрий Владимирович Подолян — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; dim.p-2010@yandex.ru.

Вклад авторов:

Орлов В.А. — научное руководство, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Зоткин С.П. — концепция исследования, научное редактирование, проведение автоматизированных расчетов.

Подолян Д.В. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Significant wear and tear of the water supply and wastewater disposal systems of settlements that have been in operation for a long time requires prompt renovation and modernization of engineering networks. The recommended methods of effective rehabilitation of dilapidated pipelines include trenchless technologies, which make it possible not only to neutralize the negative processes of electrochemical and biological corrosion, but also to ensure the required level of bearing capacity of pipeline networks and eliminate leaks [1–3]. Also, the actual issues of reliability of the restored pipeline should be on the agenda [4].

This extends the service life of pipeline transport, and for pressure pipelines creates additional guarantees of effective reduction of energy costs for transporting liquids. Trenchless pipeline rehabilitation technologies minimize the risks of damage (environmental, social and material), while increasing the reliability of utility networks and helping to regulate the price issue arising from their use.

Trenchless repair methods include various types of operations, protective coatings are applied to the inner surface of dilapidated pipeline networks, which are classified as sprayed, continuous in the form of pipes or polymer sleeves, coiled (wound) and local (bandages, etc.) [5, 6]. The tasks of the conducted research included a set of measures to familiarize with some promising types of internal protective coatings that allow for prompt and economical restoration of pressure pipelines.

One of the varieties of sprayed renovation technologies, named “Pipe-Arm” and “Arm-Pipe” respectively, is presented as a research material.

The essence of the “Pipe-Arm” culvert renovation technology is to restore their load-bearing capacity by concreting on fixed polymer formwork and consists of three interrelated technical solutions: installation of reinforcement frame in the pipe; installation of polymer protective sleeve in the pipe body; caulking of the structure, i.e. filling the space between the pipe body and the polymer sleeve with high-powder mixture [7]. The reinforcement frame consists of metal longitudinal reinforcement with a cross coiling of composite fibreglass reinforcement, which is not subject to corrosion. The cage is manufactured at the site of works and fixed on the inner wall of the pipe being sanitized.

Arm-Pipe culvert rehabilitation technology consists in forming a new pipe from quartz-cement mixture reinforced with special composite material, using the old pipeline as a case. This method makes it possible to create a new pipeline in the old one with the required performance characteristics, including its use in seismic areas¹.

MATERIALS AND METHODS

The method of research is the analysis of technological operations in the implementation of “Pipe-Arm” and “Arm-Pipe” renovation technologies, as well as the calculation of energy cost savings for water transportation before and after the repair works according to two alternative methods when rehabilitating the pipeline of the corresponding diameter and length.

Innovative technology “Pipe-Arm”, developed specifically for repair and restoration of culverts, has a number of advantages, which include: elimination of defects in pipeline systems, preventing the development of new

¹ Advertising leaflet of LLC MC Innovative Technologies. 2016.

defects, preventing the destruction of their structures, extending the service life of pipelines up to 50 years and more, reducing operating costs, as well as the estimated cost and timing of repair work, ensuring environmental safety in different natural and climatic conditions.

As a basis for the protective coating material when implementing the “Pipe-Arm” technology, TECHPOLYMER Group of Companies presents a polymer sleeve made of high-density polyethylene according to TU 22.29.29-019-56910145–2019. One side of the sleeve has a smooth surface with a low roughness coefficient, the other side is equipped with special anchoring elements designed for fixing in the monolithic layer of concrete (Fig. 1). The space between the polymer sleeve and the pipe is filled with a special high-margin, shrinkage-free and self-compacting mixture made on the basis of mineral binder. This mixture ensures uniform filling of all voids, securely binding the reinforcement frame and anchoring elements of the polymer sleeve. The new structure resulting from the renovation has a high load-bearing capacity, low hydraulic resistance and resistance to the negative effects of environment. At the same time, the maximum usable cross-section of the culvert is preserved, as the low roughness coefficient of the polymer sleeve compensates for the slight narrowing of the opening, which ensures high flow capacity of the renovated pipeline.

The membrane is fixed to the concrete surface of the pipe using 1,230 anchor elements per 1 m² of pipe surface.

“Arm-Pipe” technology serves as an alternative method of pipeline rehabilitation to “Pipe-Arm”, which allows localizing such types of damage as corrosion fouling, abrasion, defects in pipe joints and their displacements, while ensuring full restoration of the bearing capacity of pipelines for various purposes in the diameter ranges from 800 to 2,600 mm (Fig. 2).

The process of pipeline reconstruction by “Arm-Pipe” method consists of several stages. Firstly, preparatory work is carried out, including excavation of the start and end trenches, as well as pipeline preparation. Then the technological seizures are determined depending on the required length of the hose for supplying the mixture and the power of the mortar pump. Next, a special polymer batten is applied, which prevents possible destructive forces from outside, including the complete static failure of the old pipe (Fig. 3). The advantages of such reinforcement, e.g. basalt fibre reinforcement, are that it does not corrode even if exposed for any reason. The installation of the purlins was carried out with the help of a special mobile machine, the design of which, due to the frame with rollers, allows its use in a wide range of internal pipeline diameters.

The preparation of cement-sand mix (CSM) requires the preparation of the necessary components. First, sand must be sieved through a sieve and then stored in special containers to exclude the presence of foreign objects. Portland cement must also meet certain standards,

namely, it must not contain clots and lumps, the density of the cement test is not more than 27 %, the activity of radionuclides is not less than 370 Bq/kg in accordance with GOST 31108–2020. If necessary, mineral additives may be present in the composition of CSM, but their content should not exceed 10 % to improve the physical and chemical properties of the coating.

Sand is also subject to strict requirements regarding its composition and impurity content. For example,



Fig. 1. Fragment of polymer sleeve with anchoring elements and reinforcement framework on the inner surface of the restored pipeline



Fig. 2. Fragment of the “Arm-Pipe” protective coating applied to the purlins



Fig. 3. Internal reinforcement of the pipeline with a mesh (grid) made of composite materials

the grain size is not more than 1 mm, fractions with sizes from 0.315 to 0.63 mm must be at least 70 % of the total mass of sand. Water used for the preparation of the mixture, should comply with GOST 23732–79 and have a temperature of +10 to +30 °C. The optimum ratio of solid components (cement and sand) should be achieved in the range from 1:1 to 1:1.12 by volume and from 1:1.115 to 1:1.338 by mass.

The minimum thickness of the protective layer applied to the inner surface of the pipeline shall be determined by the diameter and material of the pipes, and the required thickness shall be determined by the age of the pipes, their wall thickness and physical condition (degree of wear).

The slight narrowing of the flow-through cross-section of the reconstructed pipeline is levelled by the low roughness coefficient of the hardened cement-sand mixture, which makes it possible to maintain the high flow capacity of the multi-layer pipeline structure.

At all stages of "Arm-Pipe" and "Pipe-Arm" technologies, strict quality control of the materials and equipment used is carried out. Visual and tele-inspection of the pipeline with detailed photo and video recording of all technological processes affecting the quality of work performance is also carried out.

All photo and video materials are carefully analyzed by the person in charge of the works and, if necessary, qualitative adjustments are made, previously agreed with the customer.

RESEARCH RESULTS

The tasks of basic calculations on application of "Arm-Pipe" and "Pipe-Arm" technologies for sanitation of pipeline networks included the issues of possible energy saving during water transportation through the pipeline after its reconstruction.

The calculation was performed using an automated programme [8], the algorithm of which contains a formula for determining the energy savings (ΔE , kWh per year) through the indicators of water flow (Q , m³/s), specific resistances of the old and new pipeline (A_{old} , A_{new} , s²/m⁶), depending on internal diameter (d , m), the efficiency of the pumping unit ($\eta_{pump, unit}$), duration of its operation in hours and days respectively (24 h, 365 days) and pipeline length (l , m).

The internal diameter of the old steel pipeline was assumed to be $d = 0.7$ m, the conveyed water flow rate $Q = 0.392$ m³/s, the pipeline length $l = 1,000$ m, the efficiency of the pumping unit $\eta_{pump, unit} = 0.8$. The thickness of the internal protective coating layer for both renovation options was 10 mm (respectively taking into account the reinforcement cages/trim, the thickness of the polymer sleeve and the self-compacting filler mixtures).

The values of specific resistances of old (A_{old}) and new ($A_{new PA}$, $A_{new AP}$) pipelines were determined according to the formulas:

$$A_{old} = 0.0017 - d^{-5.1359},$$

$$A_{new PA} = 0.0007 - d_{PA}^{-5.2791}, A_{new AP} = 0.0006 - d_{AP}^{-5.3081}.$$

The energy savings ΔE for both variants were calculated using the basic formula:

$$\Delta E = [9.81 Q^3 l (A_{old} - A_{new}) / \eta_{(pump, unit)}] 24 - 365 \text{ kWh per year.}$$

The results of calculating the values of specific resistances of protective coatings when implementing alternative renovation technologies for corresponding internal diameters d after renovation works and energy savings in water transport after renovation are presented below:

- by "Pipe-Arm" technology at pipeline inner diameter $d_{PA} = 0.68$ m:

$$A_{new PA} = 0.005362 \text{ s}^2/\text{m}^6;$$

$$\Delta E_{PA} = [9.81 Q^3 l (A_{old} - A_{new PA}) / \eta_{(pump, unit)}] 24 - 365 = 34,006 \text{ kWh per year};$$

- by Arm-Pipe technology at pipeline inner diameter $d_{AP} = 0.68$ m:

$$A_{new PA} = 0.004647 \text{ s}^2/\text{m}^6;$$

$$\Delta E_{AP} = [9.81 Q^3 l (A_{old} - A_{new AP}) / \eta_{(pump, unit)}] 24 - 365 = 38,627 \text{ kWh per year.}$$

Thus, despite the narrowing of the live section of the old steel pipeline after repair and due to the low resistivity coefficient of the new internal coatings, it is possible to achieve savings of 34,006 kWh/year (using the "Pipe-Arm" technology) and 38,627 kWh/year (using the "Arm-Pipe" technology) respectively.

At the same time, assuming the condition of relative equality of costs for repair and rehabilitation works on the steel pipeline by alternative technologies, "Arm-Pipe" technology has an advantage in terms of potential energy savings during water transportation compared to "Pipe-Arm" ($\Delta E_{AP} - \Delta E_{PA} = 4,621$ kWh per year or 13.59 %).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The essence, technical potential and installation conditions of advanced technologies of trenchless reconstruction of dilapidated pipelines "Arm-Pipe" and "Pipe-Arm" are described.

With the use of information-search automated system the analysis of application of technologies "Arm-Pipe" and "Pipe-Arm" for renovation of dilapidated steel pipeline was carried out, which showed that along with resource saving and increase of bearing capacity of the pipeline, it is possible to achieve reduction of power consumption during water transportation through pipelines.

For the considered private task of reconstruction of an old steel pipeline of a certain length, diameter and transported flow rate with the use of alternative technologies, the energy savings for water transport can range from 34,006 to 38,627 kWh per year.

REFERENCES

1. Shah G., Pitroda J., Bhavsar J. Trenchless technology: a new era towards underground utility construction. *Engineering: Issues, opportunities and Challenges for Development*. 2015; 1-8.
2. Khramenkov S.V. *Strategy of modernization of the water supply network*. Moscow, Stroyizdat Publ., 2005; 398. EDN QNLXXX. (rus.).
3. Primin O.G. *Water leaks*. Moscow, Publishing house MISS-MGSU, 2022; 168. DOI: 10.22227/978-5-7264-3010-2.2022.168. EDN CWUKBX. (rus.).
4. Romanov N.R. Low, reliable, failures and reconstruction of engineering networks. *International Journal of Applied Sciences and Technology Integral*. 2020; 3:6. EDN LWRGIU. (rus.).
5. Orlov V.A. *Trenchless technologies for construction and restoration of pipelines of water supply and sanitation systems*. Vologda, Infra-Engineering Publishing House, 2024; 228. EDN LRGVFI. (rus.).
6. Bubnov D.V., Volnushkina K.A., Bryanskaya Yu.V. Hydraulic characteristics of pipelines restored using polymer hoses. *Student Science Days : collection of reports of a scientific and technical conference on the results of research work of students of the Institute of Industrial and Civil Construction*. 2023; 266-275. (rus.).
7. Gorkov K. PIPEARM technology for restoration and repair of culverts. *The Hydrotechnika*. 2021; 4(65):90-91. EDN IZQRDC. (rus.).
8. Certificate of state registration of the computer program No. 2024615165 dated 04.12.2024. *Calculation of energy savings during water transportation through pressure pipelines after their trenchless repair* / Orlov V.A., Zotkin S.P., Podolyan D.V., Gorelov A.V.
9. Volgin G. The hydraulic resistance coefficient in the conditions of simultaneous effect of Re, Fr and B/h. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:05031. DOI: 10.1051/e3sconf/20199705031
10. Rylova I.A., Borovkov V.S. Equivalent roughness of pressure and pressure-free conduits. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 4:181-187. EDN PZIERZ. (rus.).
11. Kadulin S.S. Development of an innovative solution for the modernization of engineering equipment for water supply systems. *International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral"*. 2020; 3 (rus.).
12. Sidorov I.V., Petrova A.B. Innovations in the field of water supply: Technologies for reconstruction of water supply networks. *Journal of Water Resources*. 2020; 12(4):215-220. (rus.).
13. Frolova A.S. Sustainable development projects in water supply: accounting ESG-factors. *Economics and Management of National Economy*. 2022; 7(212):145-151. (rus.).
14. Grin V.G., Pakhomov A.A., Kolobanova N.A., Shishkin A.S. Anti-corrosion coatings as a factor in ensuring the strength indicators of reconstructed metal pipelines. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2021; 3(63):404-415. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-42. EDN UFPPMH. (rus.).
15. Didenko L.M., Klimenko A.A. Providing of safety at works implementation on reconstruction of plumbings networks in the straitened terms. *Bulletin of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2016; 7(220):29-37. EDN WZTHMT. (rus.).
16. Nikolenko I.V., Krymov R.S., Zhilin A.K. Failure analysis of pipe networks of water supply systems of in the cities of Crimea in order to justify the reconstruction parameters. *Construction and Industrial Safety*. 2017; 7(59):61-72. EDN ZWBTIJ. (rus.).
17. Volna V.V., Krymov R.S., Melnikova N.S. Optimization of the water supply system in Feodosia, taking into account the wear of pipelines. *Construction and Industrial Safety*. 2022; 27(79):59-69. EDN WDBNHY. (rus.).
18. Noskova A.O. Development of models for the development of engineering infrastructure on the scale of urban planning and reorganization of existing buildings. *Herald of Science and Education*. 2019; 7-1(61):28-31. EDN CIQZGP. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on August 28, 2024.

Approved for publication on September 20, 2024.

B I O N O T E S : **Vladimir A. Orlov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; orlov950@yandex.ru;

Sergey P. Zotkin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; zotkinsp@mgsu.ru;

Dmitrii V. Podolian — postgraduate student of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dim.p-2010@yandex.ru.

Authors' contributions:

Vladimir A. Orlov — scientific guidance, development of methodology, writing of the source text, final conclusions.

Sergey P. Zotkin — research concept, scientific editing, automated calculations.

Dmitrii V. Podolian — collection and processing of material, writing of the source text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.