

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТА ВОДЫ ПОСЛЕ ИХ РЕКОНСТРУКЦИИ

Орлов В. А.

ENSURING PHYSICAL INTEGRITY AND ENERGY SAVING IN WATER TRANSPORT PIPELINE SYSTEMS AFTER THEIR RECONSTRUCTION

Orlov V. A.

Аннотация

Введение. Сформулированы задачи водоканалов по эффективному управлению трубопроводными системами и экологических служб по обеспечению удовлетворительного состояния грунтов и подземных вод вблизи трасс инженерных сетей. Особое внимание отводится обеспечению физической целостности и предотвращению старения трубопроводов транспорта воды. В качестве методов реконструкции трубопроводов обосновано применение бестраншейных технологий с использованием современных набрызгиваемых защитных покрытий на базе органических материалов и полимерных труб с предварительно сжатым поперечным сечением по технологии *Swagelining*. **Методы.** Описаны применяемые аналитические и расчетные методы, которые позволяют рекомендовать наиболее востребованный тип защитного покрытия в зависимости от вида дефекта с одновременным достижением эффекта энергосбережения при соблюдении условий гидравлической совместимости отдельных участков старого и нового трубопроводов. **Результаты.** Приведены и проанализированы результаты расчетов потенциала энергосбережения для конкретных задач реконструкции старого стального трубопровода набрызгиваемыми покрытиями полимерами серии *Copon Hycote* в различных модификациях, а также полимерных труб. **Заключение.** Установлены диапазоны изменения внутреннего диаметра нового стального трубопровода после реновации, толщины стенки после операций сжатия-распрямления трубы, динамика потерь напора, среднегодовая экономия электроэнергии на погонный метр и по всей длине трубопровода. Представлены математические зависимости для расчета диаметра и потенциала энергосбережения в случае применения при реконструкции напорных полимерных труб с нестандартным значением *SDR*.

Ключевые слова: трубы, реконструкция, физическая целостность, потенциал энергосбережения, прочностные свойства.

Abstract

Introduction. The authors set tasks for water service companies, regarding the efficient management of pipeline systems, and environmental services, regarding the assurance of the satisfactory state of soils and groundwater near the routes of utility networks. They pay special attention to ensuring physical integrity in water transport pipelines and preventing their aging. The paper gives a rationale for using trenchless technologies, modern sprayed protective coatings based on organic materials, and polymer pipes with a pre-compressed cross-section applying the *Swagelining* technology, as methods and tools for reconstructing pipelines. **Methods.** The paper describes analytical and computational methods used, which make it possible to recommend the most relevant protective coating depending on the type of defect while ensuring energy saving in case certain sections of old and new pipelines are compatible hydraulically. **Results.** The authors present and analyze results of energy-saving potential calculations for specific problems related to the reconstruction of an old steel pipeline with sprayed coatings of various modifications of *Copon Hycote* polymers, as well as the reconstruction of polymer pipes. **Conclusion.** The following characteristics are determined: variation ranges for the internal diameter of a new steel pipeline after renovation, wall thickness after pipe compression and straightening; dynamics of pressure losses; average annual energy savings per linear meter and the entire length of the pipeline. The authors also suggest several equations to calculate the diameter and energy-saving potential in case of using polymer pressure pipes with non-standard *SDR* values during reconstruction.

Keywords: pipes, reconstruction, physical integrity, energy-saving potential, strength properties.

Введение

Общая тема исследований. На повестке дня отечественных и зарубежных водоканалов одной из базовых задач является эффективное управле-

ние магистральными и распределительными трубопроводами систем водоснабжения и водоотведения, где первостепенная проблема — защита здоровья потребителя и пользователя [6]. Эко-

логические службы РФ проявляют заботу о предотвращении загрязнений грунтов и подземных вод вблизи трасс инженерных сетей, которые по протяженности более чем на 50 % находятся в неудовлетворительном состоянии [1].

Связанные с экологией проблемы часто называются, не на виду, так как городские водопроводная и водоотводящие сети в своем большинстве расположены под землей. Инженерные трубопроводы, подвергаясь старению, приобретают различного типа дефекты, которые приводят к утечкам [13, 19]. Значительные утечки провоцируют такие негативные явления, как подтопление территорий, карстово-суффозионные процессы и т. д. Утечки на напорных водопроводных сетях нередко приводят к выходу большого количества воды на рельеф поверхности, что вызывает определенные экологические проблемы и негативный социальный эффект. В связи с этим основным тезисом в плане управления трубопроводными системами должно стать предотвращение дальнейшего ухудшения состояния инженерных сетей. Этому призваны способствовать новые решения, которые обеспечивают не только экономически эффективные методы проектирования, но и оперативный ремонт трубопроводного транспорта при соблюдении условий гидравлической совместимости новых и старых участков сетей. При этом значительная роль должна отводиться экологически безопасным и оперативным бестраншейным технологиям реконструкции и строительства городских инженерных сетей [17].

Восстановление обладающих многочисленными дефектами трубопроводных сетей направлено, прежде всего, на поддержание их физической целостности. Под физической целостностью подразумевается способность сетей противостоять всем видам нагрузок, гарантируя поддержание гидравлических характеристик, а также достижение эффекта энергосбережения (для напорных сетей). С точки зрения управления инженерными сетями и экологической составляющей качество и количество транспортируемых вод независимо от существующей ситуации должно оставаться в рамках проектных решений [15]. При транспортировке воды по трубопроводам не должно наблюдаться явлений инфильтрации и эксфильтрации. В случае утечек из трубопро-

водов, транспортирующих бытовые и производственные сточные воды, наблюдается поступление в почву и подземные воды нежелательных компонентов загрязнителей. При наличии рядом расположенных напорных трубопроводов, имеющих даже незначительные свищи, патогенные микроорганизмы противотоком могут попасть в питьевую воду, что приведет к ее заражению и многочисленным негативным последствиям для здоровья населения. Возникающие течи также провоцируют трудно определяемый и незаметный обмен воды между трубой и окружающим грунтом. Такие процессы могут развиваться в течение дней или десятилетий в зависимости от материалов и местных условий. Определенный негативный вклад вносят и изменения температуры, вызывающие сжатие/расширение и удлинение материала трубопроводов (особенно полимерных) и окружающего грунта, изменение его веса над закопанным трубопроводом. Более того, движение воды в грунте под трубопроводом может вести к вымыванию мелких минеральных фракций и созданию малых или больших пустот под трубой. В таком случае силу, действующую на верхнюю часть трубы по направлению вниз, должна принимать на себя сама труба, без поддержки материала снизу. Если такая сила превышает предел прочности трубы, в трубопроводе могут возникнуть прогибы и даже переломы отдельных труб. Чаще всего такие разрывы возникают в самых слабых точках трубы, т. е. в местах соединений.

Необходимо отметить, что физическая целостность сетей постоянно находится в состоянии изменения, в первую очередь старения. В связи с этим необходимо учитывать ряд факторов, таких как: материал, из которого изготовлены трубы, возраст трубопроводов, наличие/отсутствие давления воды, количество и характер дефектов, взаимное расположение трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения и т. д. Основываясь на перечисленных показателях, специалистами могут быть предложены соответствующие методы ремонта, в основе которых также должны быть заложены принципы гидравлической совместимости участков старого и восстановленного трубопровода.

Типовым решением описанных выше проблем может стать оперативное нанесение на

внутреннюю поверхность ветхого трубопровода внутренней обделки (облицовки, изоляции, защитных покрытий) преимущественно из полимерных и композиционных материалов [2].

Цели и задачи работы состоят в исследовании возможности применения для ремонта напорных трубопроводов бестраншейных технологий нанесения на их внутреннюю поверхность двух типов защитных покрытий (набрызгиваемых облицовок и протаскиваемых полимерных труб) и достижения эффекта энергосбережения при транспортировке воды.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в исследовании гидравлических показателей защитных покрытий, способствующих достижению эффекта ресурсо- и энергосбережения.

В наиболее известных и значимых публикациях по данной тематике [8, 9, 10, 12, 16, 20] отражается комплекс вопросов эффективности применения набрызгиваемых покрытий и сравнения их с альтернативными, использования для ремонта различного типа полимерных труб с круглыми и деформированными профилями с учетом стоимостных показателей и специфических технологических аспектов реконструкции при использовании бестраншейных методов.

Нерешенной проблемой является определение потенциальных возможностей защитных покрытий в плане достижения ресурсо- и энергосбережения в напорных трубопроводах.

Методы и материалы.

Базовый метод исследований — аналитический, состоящий в описании перспективных набрызгиваемых и сплошных (в виде полимерных труб) защитных материалов для восстанавливаемых трубопроводов. Также используется расчетный метод для обоснования достижения эффекта энергосбережения при использовании защитных покрытий.

1. Анализ прочностных и гидравлических характеристик перспективных защитных покрытий, обеспечивающих ресурсосбережение.

К числу перспективных набрызгиваемых (напыляемых) на внутреннюю поверхность трубопроводов относятся быстро отверждаемые органические покрытия. В последние годы эти покрытия составили конкуренцию цементно-пес-

чаным облицовкам благодаря ряду показателей, к которым, в первую очередь, можно отнести возможность эффективной локализации свищей (сквозных отверстий) и трещин размерами до 5 мм в трубах из различных материалов (сталь, чугун, хризотилцемент и т. д.). Кроме того, органические покрытия позволяют увеличить несущую способность восстанавливаемых трубопроводов, что резко отличает их от цементно-песчаных облицовок, наносимых в полевых условиях только на внутреннюю поверхность стальных трубопроводов.

Необходимо отметить, что защитные покрытия наносятся на старые трубопроводы, относящиеся к первому или второму классам состояния системы «старая труба–грунт», когда действующие трубопроводы обладают несущими способностями (т. е. их кольцевая жесткость соответствует условиям эксплуатации), но могут иметь продольные трещины и свищи при оваллизации до 5 % [2].

В основе операций по центробежному набрызгу лежит использование двухкомпонентного полимера *Copon Hycot* (100 % алифатический изоцианатный полиуретан). Типичными представителями серии полимера *Copon Hycot* являются модификации *Scotchkote 169 HB* и *Scotchkote Liner 2400*, а также *Scotchkote™ 165 HB*, *Scotchkote™ 352* и *Scotchkote 226N/226N+* [11].

К преимуществам покрытия *Scotchkote 169 HB* относится то, что отверждение (полимеризация смол) до степени «сухой на отлив» происходит за 1 минуту, и через 1 час трубопровод можно вводить в эксплуатацию. Покрытие обладает высокой стойкостью к абразивному воздействию. Технология позволяет наносить покрытия толщиной до 5 мм за один проход. При необходимости возможно повторное неоднократное нанесение покрытия, что также отличает его от цементно-песчаного. После нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубопровода значительно улучшаются гидравлические характеристики восстановленной трубопроводной системы, что способствует достижению эффекта энергосбережения. На рис. 1 представлен фрагмент отрезка трубы с нанесенным покрытием.

Необходимо отметить, что несмотря на общую природу исходного материала покрытий

Scotchkote 169 HB и *Scotchkote Liner 2400*, а также схожесть в процессах нанесения этих покрытий, существует ряд различий в областях использования и особенностях применения при ремонте трубопроводов. В частности, покрытие *Scotchkote Liner 2400* по сравнению с *Scotchkote 169 HB* позволяет санировать чугунные трубы со слоем ЦПП и даже поливинилхлоридные (ПВХ). Диапазон толщины покрытия за один проход составляет 1,2–2,75 мм.

По своим физико-механическим параметрам покрытие *Scotchkote 169 HB* после процесса полимеризации на стенке старого трубопровода наиболее близко к трубопроводам из полиэтилена низкого давления (ПНД). В свою очередь, покрытие *Scotchkote Liner 2400* наиболее близко по своим физико-механическим характеристикам к трубам из поливинилхлорида (ПВХ).

Покрытие *Scotchkote™ 352*, в отличие от покрытия *Scotchkote™ 165 HB*, применяется для наружной антикоррозионной защиты трубопроводов, емкостей, соединительных деталей и задвижек. Оно может наноситься на внутреннюю поверхность трубопровода в полевых или заводских условиях. Срок службы покрытия оценивается более чем в 30 лет. Покрытие полимеризуется даже при отрицательных температурах. Оптимальная температура окружающей среды для нанесения и отверждения покрытия от –10 до +35 °С. Высыхание до исчезновения липкости составляет 10–15 мин при температуре до 20 °С.

Покрытие *Scotchkote 226N/226N+* представляет собой однокомпонентный порошковый ма-

териал, затвердевающий под действием тепла, и предназначено для защиты труб от коррозии. При условии правильного нанесения оно должно сохранять удовлетворительные свойства на трубах, эксплуатируемых при температурах от –73 до 110 °С.

К другому конкурирующему с цементно-песчаной облицовкой типу внутренних органических покрытий можно отнести напыляемое покрытие *Subcote FLP*. При толщине защитного покрытия 3 мм (с нанесением одним слоем) в диапазоне диаметров 100–1200 мм оно способно перекрывать сквозные отверстия (свищи) диаметром до 8 мм, а также кольцевые и продольные трещины и зазоры стыковых соединений шириной до 7 мм. Время образования защитной пленки составляет 6 минут, а время отверждения (для возможности проведения телеинспекции) — 12 минут. Суммарное время полимеризации покрытия составляет 60 минут. На рис. 2 представлен фрагмент отрезка трубы с нанесенным покрытием *Subcote FLP*.

Рассмотренные выше набрызгиваемые покрытия имеют экспертное заключение о соответствии продукции Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, которые могут быть нанесены на внутреннюю поверхность трубопроводов в системах хозяйственно-питьевого назначения.

Необходимо отметить, что в последние годы на строительном рынке появились новые типы эпоксидных покрытий, которые следует рассматривать в качестве конкурентов вышеназванным

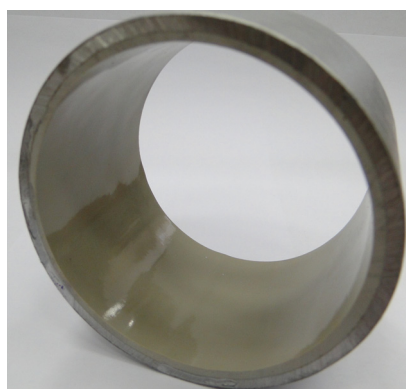


Рис. 1. Образец двухслойной конструкции на основе стальной трубы и набрызгиваемого покрытия серии *Sorol Hycot* с ярко выраженной гладкой внутренней поверхностью



Рис. 2. Покрытие *Subcote FLP* на стальном трубопроводе

органическим покрытиям в тех случаях, если трубопровод сохранил несущую способность. Это объясняется тем, что при нанесении эпоксидных покрытий (пневматическим или безвоздушным напылением) толщина его не превышает 250 мкм, т. е. диаметр трубопровода не изменяется. Покрытия водостойки и защищают материалы от коррозии. Они обладают хорошим сцеплением с влажной или даже мокрой поверхностями. Время полимеризации покрытий составляет от 6 до 24 ч в зависимости от температуры поверхности. К таким покрытиям относятся, например, *EPO-CHEM™ RS 500 P*, *EPO-CHEM™ RL 500 PF*, *EPO-CHEM™ RS 500 M*, производимые компанией *Chemco International* (Шотландия) и поставляемые на российский рынок ООО «Умные Поверхности» [5].

Конкурентами набрызгиваемых покрытий являются полимерные трубы, которые с помощью бестраншейных технологий протягиваются внутрь старого трубопровода, локализуя различного типа дефекты и повышая его несущую способность [14, 18].

Позитивной стороной данного метода бестраншейной реновации является то, что он имеет множество модификаций, например, протягивание труб с U-образным и C-образным профилями с последующим их распрямлением и плотным прижатием к внутренней стенке старого трубопровода. Это позволяет незначительно уменьшить живое (проходное) сечение восстанавливаемого трубопровода при одновременном снижении величины коэффициента гидравлического трения λ и коэффициента удельного сопротивления A .

Среди конкурирующих технологий использования полимерных труб, протягиваемых в восстанавливаемый трубопровод и позволяющих обеспечить эффект энергосбережения прежде всего следует отметить методы по технологиям *Swagelining* и *U-liner*. Метод *Swagelining* заключается в протягивании предварительно сжатой по всему сечению круглой трубы (без ее удлинения) с последующим распрямлением в старом трубопроводе в течение некоторого времени. Распрямление трубы происходит без образования межтрубного пространства (кольцевого зазора). При этом обеспечивается ее плотное прилегание к внутренней поверхности старого трубопрово-

да и незначительное уменьшение его диаметра. Старый трубопровод используется как направляющий каркас и может служить дополнительной защитой (футиляром).

Необходимо отметить, что технология *Swagelining* — безусловный лидер среди альтернативных методов реновации трубопроводов в диапазоне диаметров 100–1200 мм методом протягивания в целях достижения эффекта энергосбережения. Дополнительным преимуществом технологии *Swagelining* вместе с использованием номенклатуры полиэтиленовых труб с различными значениями *SDR* (отношение диаметра к толщине стенки) является возможность получения широкой гаммы внутренних диаметров на восстанавливаемом участке трубопровода после реконструкции.

2. Метод определения эффекта энергосбережения и его реализация при использовании альтернативных ремонтных материалов.

В основе метода расчета экономии электроэнергии на единицу длины ветхого трубопровода $\Delta \mathcal{E}_{1м}$ (т. е. потенциала энергосбережения, кВт·ч) при его реконструкции альтернативными материалами может быть использована следующая модифицированная формула:

$$\Delta \mathcal{E}_{1м} = \frac{9,81 \cdot Q^3 (A_{стар} - A_{нов})}{\eta_{нас.устан}} 24 \cdot 365, \quad (1)$$

где 9,81 — ускорение свободного падения, м/с²; Q — расход подаваемой трубопроводом воды, м³/с; $\eta_{нас.устан}$ — коэффициент полезного действия насосной установки; 24 — количество часов работы насоса в сутки, ч; 365 — количество дней в году; $A_{стар}$, $A_{нов}$ — соответственно эмпирические значения удельного сопротивления старого трубопровода и защитного покрытия (новой трубы).

Ниже в качестве примера приведены результаты расчета экономии электроэнергии при реконструкции старого стального трубопровода следующими набрызгиваемыми ремонтными материалами:

– покрытиями *Scotchkote 169 HB* и *Scotchkote 2400* (то же $A_{Sct.169} = 0,0008d^{*-5,19}$ и $A_{Sct.2400} = 0,00095d^{*-5,19}$);

– покрытием *Subcote FLP* (то же $A_{Subc.} = 0,0008d^{*-5,1883}$).

При этом во всех случаях коэффициент удельного сопротивления стального трубопровода

рассчитывался по формуле $A_{\text{сталь}} = 0,0017d^{-5,1359}$ [7]. Эмпирические формулы для удельных сопротивлений A для вышеуказанных защитных покрытий и полимерных труб определялись в ходе экспериментов на гидравлическом стенде, установленном в лаборатории кафедры «Водоснабжение и водоотведение» НИУ МГСУ [3].

Расчеты произведены на единицу длины ветхого стального трубопровода $\Delta\mathcal{E}_{1м}$ для соответствующих массивов диаметров и скоростей, коэффициенте полезного действия насосной установки 0,95 и различной проектной толщине стенки m защитных покрытий. Уменьшение величины внутреннего диаметра d^* после реконструкции подсчитывалось по формуле $d^* = d - 2m$.

В таблицах 1 и 2 приведены расчетные значения при реконструкции стального трубопровода соответственно покрытиями *Scotchkote 169 HB* и *Scotchkote 2400*. В целях унификации подхода к оценке потенциала энергосбережения условно приняты величины толщины стенок в диапазоне 0,002–0,006 м с шагом 0,002 м.

В табл. 3 представлены расчетные значения при реконструкции стального трубопровода покрытием *Subcote FLP*.

В отношении оценки динамики изменения потенциала энергосбережения при реконструкции ветхих стальных трубопроводов полимерными трубами (в широком диапазоне *SDR*) использовалась разработанная автором в составе научного коллектива автоматизированная программа [4].

В качестве примера работы автоматизированного комплекса в табл.4, а также в графическом виде представлены: анализ динамики изменения потенциала энергосбережения (рис. 3) и внутреннего диаметра (рис. 4) при реконструкции стального трубопровода диаметром $d = 500$ мм по технологии *Swagelining* с использованием полимерных труб ПЭ 100 с наружным диаметром 0,56 м. Также проводились аналогичные расчеты при диаметрах полимерных труб 0,63 и 0,71 м.

Коэффициент удельного сопротивления рассчитывался по формуле $A_{\text{ПЭ 100}} = 0,0004d^{-5,7276}$, а величина расхода принята равной 0,21 л/с при КПД насосной установки 0,95.

Результаты и обсуждение

Анализируя данные табл. 1–3 можно констатировать, что абсолютные значения потенциала энергосбережения $\Delta\mathcal{E}_{1м}$ весьма близки для рассматриваемых видов набрызгиваемых покрытий органического происхождения при широкой гамме их толщины (0,002–0,006 м). Отсюда в качестве выводов из комплексного анализа расчетных данных следует отметить, что с точки зрения достижения эффекта энергосбережения рассмотренные защитные покрытия могут быть оценены как практически идентичные. Также следует отметить, что в данной ситуации потенциал энергосбережения не является критерием предпочтения того или иного материала защитного покрытия при выборе его в качестве ремонтного материала. Главенствующее значение при определении

Таблица 1

Изменение величины потенциала энергосбережения в динамике при реконструкции стального трубопровода покрытием *Scotchkote 169 HB* для $A_{\text{Scot.169}} = 0,0008d^{-5,19}$

Условный внутренний диаметр d , м	Расход воды Q , м ³ /с	$\Delta\mathcal{E}_{1м}$, кВт·ч в год при толщине стенки m , м				
		0,002	0,003	0,004	0,005	0,006
0,1	0,01025	9,661	7,937	5,975	3,728	1,15
0,2	0,03425	12,476	10,993	10,195	9,344	8,436
0,25	0,053	14,12	13,445	12,734	11,987	11,2
0,3	0,076	16,525	15,895	15,237	14,551	13,835
0,4	0,134	20,951	20,383	19,789	19,194	18,57
0,5	0,21	25,805	25,265	24,711	24,143	23,561
0,6	0,298	29,013	28,519	28,014	27,499	26,973
0,7	0,392	29,98	29,55	29,113	28,667	28,214
0,8	0,51	33,291	32,879	32,46	32,035	31,603
0,9	0,64	35,948	35,557	35,16	34,758	34,351
1,0	0,79	39,363	38,981	38,595	38,204	37,807
1,2	1,14	46,361	45,992	45,619	45,242	44,861

Таблица 2

Изменение величины потенциала энергосбережения в динамике при реконструкции стального трубопровода покрытием Scotchkote 2400 для $A_{Sct.2400} = 0,00095d^{-5,19}$

Условный внутренний диаметр d , м	Расход воды Q , м ³ /с	$\Delta \mathcal{E}_{1m}$, кВт·ч в год при толщине стенки m , м				
		0,002	0,003	0,004	0,005	0,006
0,1	0,01025	6,864	4,82	2,488	-0,179	-3,24
0,2	0,03425	9,17	8,285	7,338	6,327	5,249
0,25	0,053	11,195	10,393	9,55	8,662	7,727
0,3	0,076	13,224	12,475	11,694	10,879	10,029
0,4	0,134	16,955	16,282	15,586	14,869	14,128
0,5	0,21	21,026	20,385	19,727	19,052	18,361
0,6	0,298	23,748	23,161	22,562	21,95	21,326
0,7	0,392	24,623	24,112	23,592	23,063	22,524
0,8	0,51	27,413	26,923	26,426	25,922	25,409
0,9	0,64	29,663	29,198	28,727	28,25	27,766
1,0	0,79	32,537	32,084	31,625	31,16	30,689
1,2	1,14	38,426	37,988	37,545	37,097	36,645

метода реконструкции приобретают, прежде всего, прочностные характеристики альтернативных строительных материалов и способность их к локализации тех или иных дефектов на ветхих трубопроводах (габариты сквозных отверстий, длина и ширина щелей).

Как свидетельствуют данные табл. 4, внутренний диаметр нового трубопровода после реновации составит от 395,66 до 477,49 мм в рассматриваемой гамме значений *SDR*. При этом потенциальный эффект энергосбережения при использовании для реконструкции полимерных труб наблюдается в разной степени для всех значений *SDR*, кроме труб с *SDR* 11, где $\Delta \mathcal{E}_{1m}$ при-

нимает отрицательное значение $-17,387$ кВт·ч на 1 пог. м в год. В данном случае полимерный трубопровод после операций сжатия–расширения приобретает такой внутренний диаметр (395,66 мм), что приводит к значительному сужению проходного сечения трубопровода и росту потерь напора (1,786 м) по сравнению с базовым вариантом (1,351 м). Отсюда следует, что труба с *SDR* 11 не может рекомендоваться как экономичный вариант в плане снижения затрат на электроэнергию при транспортировке воды. Полученные математические (логарифмические) зависимости, представленные на рис. 3 и 4, целесообразно использовать при расчете диаметра и потенциала

Таблица 3

Изменение величины потенциала энергосбережения в динамике при реконструкции стального трубопровода покрытием Subcote FLP для $A_{Subc.} = 0,0008d^{-5,1883}$

Условный внутренний диаметр d , м	Расход воды Q , м ³ /с	$\Delta \mathcal{E}_{1m}$, кВт·ч в год при толщине стенки m , м				
		0,002	0,003	0,004	0,005	0,006
0,1	0,01025	9,719	8,005	6,05	3,813	1,247
0,2	0,03425	11,779	11,033	10,238	9,389	8,484
0,25	0,053	14,157	13,484	12,775	12,03	11,245
0,3	0,076	16,562	15,933	15,276	14,592	13,878
0,4	0,134	20,984	20,418	19,834	19,23	18,608
0,5	0,21	25,836	25,296	24,743	24,176	23,595
0,6	0,298	29,038	28,544	28,04	27,526	27,0
0,7	0,392	29,998	29,568	29,131	28,686	28,233
0,8	0,51	33,303	32,891	32,474	32,048	31,716
0,9	0,64	35,954	35,563	35,167	34,765	34,358
1,0	0,79	39,364	38,982	38,595	38,204	37,808
1,2	1,14	46,348	45,979	45,606	45,229	44,848

Таблица 4

Сводные расчетные данные для варианта при диаметре стального трубопровода 0,5 м и полимерного 0,56 м

Расчетные величины	Величины <i>SDR</i>						
	11	17	21	26	33	41	50
Внутренний диаметр нового трубопровода после реновации $d_{\text{вн. нов.}}$, мм	395,66	432,44	446,04	456,58	465,47	472,29	477,49
Толщина стенки после операций сжатия–распрямления трубы x , мм	52,17	33,78	26,98	21,71	17,26	13,86	11,25
Потери напора:							
до реновации (в старом трубопроводе) $H_{\text{вн. стар.}}$, м	1,351	1,351	1,351	1,351	1,351	1,351	1,351
после реновации в новом трубопроводе $H_{\text{н. нов.}}$, м	1,786	1,073	0,899	0,786	0,704	0,648	0,608
Среднегодовая экономии электроэнергии, кВт·ч:							
на погонный метр трубопровода $\Delta \mathcal{E}_{1\text{м}}$	-17,38	11,102	18,082	22,583	25,872	28,12	29,698
по всей длине трубопровода \mathcal{E}_1	-8693,7	5551,2	9041,2	11291,5	12935,8	14060,1	14848,9

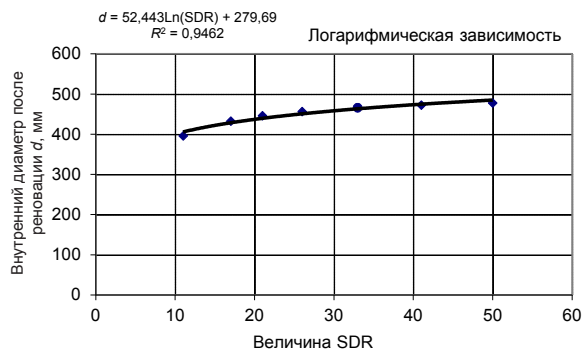


Рис. 3. Динамика изменения внутреннего диаметра от величины *SDR*

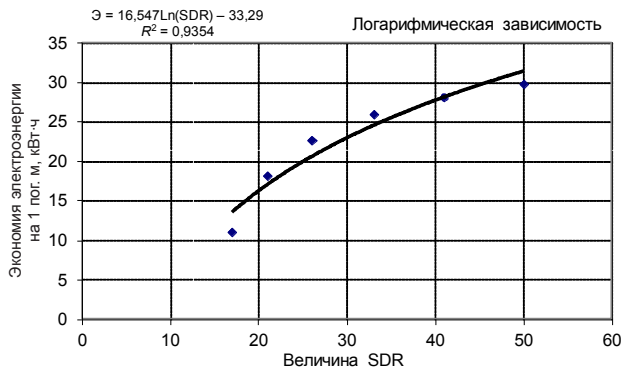


Рис. 4. Динамика изменения потенциала энергосбережения от величины *SDR*

энергосбережения в случае применения при реконструкции напорных сетей полимерных труб с нестандартными значениями *SDR*.

Для других вариантов реконструкции стального трубопровода диаметром 0,5 м и диаметрах протаскиваемого в него полимерного соответ-

ственно 0,63 и 0,71 м прослеживаются аналогичные результаты по динамике изменения исследуемых показателей. Однако в случае применения для реконструкции трубы диаметром 0,71 м значение $\Delta \mathcal{E}_{1\text{м}}$ становится отрицательным при *SDR* 17. Другими словами, диапазон применения трубы диаметром 0,71 м при необходимости достижения экономии электроэнергии возможен лишь при *SDR* 21 и более.

Заключение

1. Проведен краткий обзор значимости ресурсо- и энергосбережения, а также экологической составляющей при решении вопросов реконструкции инженерных сетей транспорта воды.

2. Представлена аналитическая информация об используемых современных защитных покрытиях трубопроводов (серии полимера *Copol Nucot* в различных модификациях), а также протаскиваемых полимерных труб по технологии *Swagelining*, обеспечивающих эффект ресурсо- и энергосбережения при транспортировке воды по напорным трубопроводам.

3. С использованием автоматизированной программы получены расчеты эффекта энергосбережения после работ по бестраншейной реконструкции ветхих трубопроводов в зависимости от толщины стенки набрызгиваемых покрытий и широкого диапазона величин *SDR* протаскиваемых труб. Применяемые эмпирические формулы для удельных сопротивлений защитных покрытий и полимерных труб заимствованы из проведенных ранее экспериментов автором

на гидравлическом стенде лаборатории кафедры «Водоснабжение и водоотведение» НИУ МГСУ.

4. Проведена комплексная оценка динамики изменения потенциала энергосбережения и внутреннего диаметра при реконструкции стального трубопровода диаметром $d = 500$ мм по технологии *Swagelining* с использованием полимерных труб ПЭ 100 в диапазоне их диаметров 0,56–0,71 м и выявлены значения *SDR* труб, при которых достигается эффект энергосбережения.

5. Получены математические зависимости для расчета диаметра и потенциала энергосбережения в случае применения при реконструкции напорных сетей нестандартных значений *SDR* полимерных труб.

Литература

1. Белякова, Е. В. и Головин, К. А. (2009). Современные бестраншейные технологии. Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, № 3, сс. 238–244.
2. Захаров, Ю. С. и Орлов, В. А. (2017). Восстановление водоотводящих сетей полимерными рукавами. М.: Русайнс, 108 с.
3. Орлов, В. А. (2015). Трубопроводные сети. Автоматизированное сопровождение проектных разработок. СПб.: Издательство Лань, 159 с.
4. Орлов, В. А., Зоткин, С. П., Зоткина, И. А. и Хренов, К. Е. (2014). Расчет параметров работы напорных трубопроводов, восстанавливаемых предварительно сжатыми полимерными трубами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612753 от 06.03.2014 по заявке 2014610231 от 10.01.2014.
5. Салтыков, Е. В. (2016). Эпоксидные покрытия на смену коррозии. Бурение и нефть, № 11, сс. 48–50.
6. Храменков, С. В. (2012). Время управлять водой. М.: Московские учебники и картолитография, 280 с.
7. Шевелев, Ф. А. (2013). Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. М.: Книга по требованию, 116 с.
8. Batchelor, C., Ratna Reddy, V., Linstead, C., Dhar, M., Roy, S. and May, R. (2014). Do water-saving technologies improve environmental flows? *Journal of Hydrology*, Vol. 518, Part A, pp. 140–149. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.063.
9. Bruce, W. A. (2015). Comparison of fiber-reinforced polymer wrapping versus steel sleeves for repair of pipelines. In: Karbhari, V. M. (ed.) *Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites*, pp. 61–78. DOI: 10.1016/B978-0-85709-684-5.00004-7.
10. Bykowski, J., Jakubowicz, J. and Napierała, M. (2013). Analiza finansowa zajęcia pasa drogowego w robotach sieciowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, No. 8, pp. 321–327.
11. Cruz, C. and De Souza, E. M. (2012). Spray applied coatings for the rehabilitation of drinking water pipelines. In:

30th International NO-DIG Conference and Exhibition 2012, Sao Paulo (Brazil), pp. 200–206.

12. Huang, Q., Wang, J. and Li, Y. (2017). Do water saving technologies save water? Empirical evidence from North China. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 82, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.jeem.2016.10.003.

13. Kuliczowski, A. (2012). Renowacja czy rekonstrukcja na przykładzie przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych. *INSTAL*, No. 1, pp. 46–49.

14. Kuliczowski, A. (2014). Trwałość rozwiązań stosowanych w budowie i odnowie przewodów kanalizacyjnych. *INSTAL*, No. 3, pp. 54–56.

15. Maslak, V., Nasonkina, N., Sakhnovskaya, V., Gutarova, M., Antonenko, S. and Nemova, D. (2015). Evaluation of technical condition of water supply networks on undermined territories. *Procedia Engineering*, Vol. 117, pp. 980–989. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.206.

16. Pridmore, A. B. and Ojdovic, R. P. (2015). Trenchless repair of concrete pipelines using fiber-reinforced polymer composites. In: Karbhari, V. M. (ed.) *Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites*, pp. 17–38. DOI: 10.1016/B978-0-85709-684-5.00002-3.

17. Rabmer-Koller, U. (2011). No-dig technologies — innovative solution for efficient and fast pipe rehabilitation. In: 29th International NO-DIG Conference and Exhibition, NO-DIG Berlin, Paper 2C-1, pp. 1–10.

18. Rameil, M. (2007). Handbook of pipe bursting practice. Essen: Vulkan Verlag, 351 p.

19. Tsyss, V. G. and Sergaeva, M. Yu. (2016). Finite element analysis of discharge antivibrational pipe stress state of the piping system flexible joint. *Procedia Engineering*, Vol. 152, pp. 251–257. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.699.

20. Wei, G., Xu, R.-Q. and Huang, B. (2005). Analysis of stability failure for pipeline during long distance pipejacking. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol. 24, No. 8, pp. 1427–1432.

References

1. Belyakova, E. V. and Golovin, K. A. (2009). Modern trenchless technologies. *News of the Tula State University. Natural Sciences*, No. 3, pp. 238–244.
2. Zakharov, Yu. S. and Orlov, V. A. (2017). Rehabilitation of drain and sewer systems with polymer hoses. Moscow: RuScience, 108 p.
3. Orlov, V. A., Zotkin, S. P., Zotkina, I. A. and Khrenov, K. E. (2014). Calculating the operating parameters of pressure pipelines rehabilitated using pre-compressed polymer pipes. Certificate of state software registration No. 2014612753 dd. 06.03.2014 on application No. 2014610231 dd. 10.01.2014.
4. Orlov, V. A. (2015). Pipeline networks. Automated support for project development. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 159 p.
5. Saltykov, E. V. (2016). Epoxy coatings — the change of corrosion. *Drilling and Oil*, No. 11, pp. 48–50.
6. Shevelev, F. A. (2013). Tables for the hydraulic analysis of steel, cast-iron, asbestos-cement, plastic and glass water pipes. Moscow: Книга по Требованию, 116 p.
7. Khramenkov, S. V. (2012). Time to manage water. Moscow: Moskovskiyе Uchebniki I Kartolitografiya, 280 p.

8. Batchelor, C., Ratna Reddy, V., Linstead, C., Dhar, M., Roy, S. and May, R. (2014). Do water-saving technologies improve environmental flows? *Journal of Hydrology*, Vol. 518, Part A, pp. 140–149. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.063.
9. Bruce, W. A. (2015). Comparison of fiber-reinforced polymer wrapping versus steel sleeves for repair of pipelines. In: Karbhari, V. M. (ed.) *Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites*, pp. 61–78. DOI: 10.1016/B978-0-85709-684-5.00004-7.
10. Bykowski, J., Jakubowicz, J. and Napierała, M. (2013). Analiza finansowa zajęcia pasa drogowego w robotach sieciowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, No. 8, pp. 321–327.
11. Cruz, C. and De Souza, E. M. (2012). Spray applied coatings for the rehabilitation of drinking water pipelines. In: 30th International NO-DIG Conference and Exhibition 2012, Sao Paulo (Brazil), pp. 200–206.
12. Huang, Q., Wang, J. and Li, Y. (2017). Do water saving technologies save water? Empirical evidence from North China. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 82, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.jeem.2016.10.003.
13. Kuliczkowski, A. (2012). Renowacja czy rekonstrukcja na przykładzie przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych. *INSTAL*, No. 1, pp. 46–49.
14. Kuliczkowski, A. (2014). Trwałość rozwiązań stosowanych w budowie i odnowie przewodów kanalizacyjnych. *INSTAL*, No. 3, pp. 54–56.
15. Maslak, V., Nasonkina, N., Sakhnovskaya, V., Gutarova, M., Antonenko, S. and Nemova, D. (2015). Evaluation of technical condition of water supply networks on undermined territories. *Procedia Engineering*, Vol. 117, pp. 980–989. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.206.
16. Pridmore, A. B. and Ojdovic, R. P. (2015). Trenchless repair of concrete pipelines using fiber-reinforced polymer composites. In: Karbhari, V. M. (ed.) *Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites*, pp. 17–38. DOI: 10.1016/B978-0-85709-684-5.00002-3.
17. Rabmer-Koller, U. (2011). No-dig technologies — innovative solution for efficient and fast pipe rehabilitation. In: 29th International NO-DIG Conference and Exhibition, NO-DIG Berlin, Paper 2C-1, pp. 1–10.
18. Rameil, M. (2007). *Handbook of pipe bursting practice*. Essen: Vulkan Verlag. 351 p.
19. Tsyss, V. G. and Sergaeva, M. Yu. (2016). Finite element analysis of discharge antivibrational pipe stress state of the piping system flexible joint. *Procedia Engineering*, Vol. 152, pp. 251–257. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.699.
20. Wei, G., Xu, R.-Q. and Huang, B. (2005). Analysis of stability failure for pipeline during long distance pipe jacking. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol. 24, No. 8, pp. 1427–1432.

Автор

Орлов Владимир Александрович, д-р техн. наук, профессор

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

E-mail: orlov950@yandex.ru

Author

Orlov Vladimir Aleksandrovich, Dr. of Engineering, Professor

National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

E-mail: orlov950@yandex.ru