

Обеспечение эффекта энерго- сбережения после реконструкции напорных водо- проводных сетей внутренними защитными покрытиями

Рецензия эксперта на статью получена
29.07.2020 [Expert review on the article
received on July 29, 2020].

Введение

Одним из элементов эффективного управления магистральными и распределительными трубопроводами систем городского водоснабжения является их оперативный ремонт как традиционными методами с раскопкой и заменой отдельных участков сетей, так и использованием бестраншейных технологий [1, 2]. Помимо восстановления физической целостности трубопроводной системы параллельно ставятся вопросы обеспечения санитарной надёжности при авариях и побочных переходных процессах, к которым можно отнести прочистку и дезинфекцию труб, обеспечение оптимального гидродинамического режима работы сети [3]. Значительная роль отводится также вопросам энергосбережения при транспортировке воды [4, 5].

Эффект энергосбережения после ремонта может быть обеспечен использованием защитных покрытий из полимерных и композиционных материалов, которые наносятся на внутреннюю поверхность трубопроводов [6, 7]. В качестве ремонтных материалов могут применяться протаскиваемые в старые трубопроводы новые трубы меньшего поперечного сечения, а также гибкие полимерные рукава, обделки на базе неорганических и органических составов, которые наносятся на внутренние стенки труб [8, 9]. Перечисленные ремонтные материалы в большинстве случаев обеспечивают снижение коэффициента гидравлического трения и тем самым содействуют достижению эффекта энергосбережения [10].

Отсюда цели и задачи исследователей, занимающихся вопросами энергосбережения в приложении к напорному трубо-

проводному транспорту жидкостей, сводятся к поиску и реализации на практике наиболее эффективных строительных технологий реконструкции и модернизации сетей, а также поиску строительных материалов с соответствующими гидравлическими характеристиками [11–12].

В качестве наиболее известных и значимых публикаций по данной тематике можно выделить следующие [13–15], где отражён комплекс вопросов по обоснованию выбора защитных покрытий и технологий их нанесения на трубопроводы.

Эффект энергосбережения после ремонта можно обеспечить использованием защитных покрытий из полимерных и композиционных материалов, которые наносятся на внутреннюю поверхность трубопроводов. В качестве ремонтных материалов могут применяться как новые трубы меньшего поперечного сечения, так и гибкие полимерные рукава и обделки на базе неорганических и органических составов

Материалы настоящей статьи направлены на выявление потенциальных возможностей внутренних защитных покрытий в плане достижения энергосбережения в напорных трубопроводах, предназначенных для транспортировки питьевой воды, и опираются на результаты экспериментальных и теоретических исследований и разработок за последние годы в НИУ МГСУ [16].

УДК 628.462. Научная специальность: 05.23.04.

Обеспечение эффекта энергосбережения после реконструкции напорных водопроводных сетей внутренними защитными покрытиями

В. А. Орлов, д.т.н., профессор; **В. А. Нечитаева**, старший преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Приведены результаты гидравлических исследований по определению коэффициента удельного сопротивления для нескольких защитных покрытий, которые потенциально могут использоваться для ремонтно-восстановительных работ на ветхих напорных трубопроводах, позволяя обеспечить эффект энергосбережения при транспортировке воды. Приведены и проанализированы результаты автоматизированного расчёта потенциала энергосбережения для конкретной задачи бестраншейной реконструкции старого стального трубопровода путём протаскивания в него полимерных труб по технологии серии Swagelining. Установлены диапазоны изменения внутреннего диаметра трубопровода после реновации, толщины стенки после операций сжатия/распрямления полимерной трубы, динамики изменения потерь напора, среднегодовой экономии электроэнергии на погонный метр и по всей длине трубопровода. Представлены результаты по характеру изменения потенциала энергосбережения от диаметра восстанавливаемого трубопровода.

Ключевые слова: трубопроводы, реконструкция, защитные покрытия, потенциал энергосбережения.

UDC 628.462. The number of scientific specialty: 05.23.04.

Ensuring the energy saving effect after the reconstruction of pressure water networks with internal protective coatings

V. A. Orlov, Doctor of Technical Sciences, Professor; **V. A. Nechitaeva**, senior lecturer, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)

The results of hydraulic studies to determine the coefficient of resistivity for several protective coatings that can potentially be used for repair and restoration work on dilapidated pressure pipelines, allowing to ensure the effect of energy saving during water transportation. The results of automated calculation of the energy saving potential for a specific task of trenchless reconstruction of an old steel pipeline by dragging polymer pipes into it using the Swagelining technology are presented and analyzed. Set the ranges of the internal pipe diameter after renovation, wall thickness after compression/straightening of plastic pipes, dynamics of change of pressure loss, the average energy savings per meter and across the length of the pipeline. The results on the nature of changes in the energy saving potential from the diameter of the restored pipeline are presented.

Key words: pipelines, reconstruction, protective coatings, energy saving potential.



:: Фото 1. Общий вид гидравлического стенда с исследуемыми трубами

Методы и материалы

В качестве методов исследований использовались аналитический и расчётный, которые базировались на результатах стендовых гидравлических экспериментов и их компьютерной обработки с помощью специально разработанного программного обеспечения [16–18]. Основное внимание уделялось вопросам обеспечения эффекта энергосбережения после реконструкции напорных водопроводных сетей внутренними защитными покрытиями из различных материалов.

Расчёт экономии электроэнергии (потенциала энергосбережения) при транспортировке воды по напорному трубопроводу, восстановленному альтернативными способами нанесения внутренних защитных покрытий, производится по следующей модифицированной формуле:

$$\Delta \mathcal{E}_{1\text{м}} = \frac{g Q^3 (A_{\text{стар}} - A_{\text{нов}})}{\eta_{\text{ну}}} \times 24 \times 365, \quad (1)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{1\text{м}}$ — изменение потенциала энергосбережения, кВт·ч; g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; Q — расход

подаваемой трубопроводом воды, $\text{м}^3/\text{с}$; $\eta_{\text{ну}}$ — коэффициент полезного действия насосной установки; 24 — количество часов работы насоса в сутки, ч; 365 — количество дней в году; $A_{\text{стар}}$ и $A_{\text{нов}}$ — эмпирические значения коэффициентов удельного сопротивления старого трубопровода и защитного покрытия (новой трубы), соответственно.

Для использования формулы (1) при расчёте эффекта энергосбережения необходимы сведения об универсальных эмпирических математических зависимостях удельного сопротивления A от диаметра d для каждого материала трубопровода (защитного покрытия), то есть $A = f(d)$. В этих целях в лаборатории кафедры «Водоснабжение и водоотведение» НИУ МГСУ были проведены комплексные гидравлические эксперименты на трубопроводах с разными защитными покрытиями, используемыми при реконструкции и модернизации участков старых трубопроводных сетей (фото 1).

Результаты экспериментов и их интерпретация представлены ниже.

В качестве исследуемых на гидравлическом стенде материалов трубопроводов, которые потенциально могут быть использованы для достижения эффекта энергосбережения, были представлены следующие трубопроводы (условным диаметром 100 мм):

- полиэтиленовая труба ПЭ-100 SDR 17 (110×6,6 мм) по ГОСТ 18599–2001;
- полиэтиленовая труба ПЭ-80 SDR 17 (110×6,6 мм) по ГОСТ 18599–2001;
- стеклопластиковая по ТУ 2296-002-05919802-03 «Трубы бипластмассовые и соединительные детали»;
- высокопрочный чугун с шаровидным графитом по ТУ 1461-037-50254094–2004 завода «Свободный Сокол»;
- стальная по ГОСТ 10704–91 труба с полимерным рукавом;
- стальная по ГОСТ 10704–91 труба с набрызгиваемым покрытием Scotchkote 169 HB;
- стальная по ГОСТ 10704–91 труба с набрызгиваемым покрытием Scotchkote Liner 2400;
- стальная по ГОСТ 10704–91 труба с набрызгиваемым покрытием Subcote FLP.

В качестве сравнения приведён аналитический обзор каталожных характеристик стальных бесшовных труб отечественного производства 09Г2С по ГОСТ 10704–91.

Результаты исследования и обсуждение

На основании результатов стендовых гидравлических экспериментов на трубопроводах из различных материалов получены следующие эмпирические зависимости коэффициента удельного сопротивления A [$\text{с}^2/\text{м}^6$] в зависимости от диаметра трубопровода d [м] (табл. 1).

Используя представленные в табл. 1 зависимости и формулу (1) можно определить величину потенциала энергосбережения при транспортировке воды после проведения работ по реконструкции старого трубопровода соответствующими ремонтными материалами.

Ниже в качестве примера представлен расчёт потенциала энергосбережения $\mathcal{E}$ на 1 м трубопровода в киловатт-час в год при использовании в качестве ремонтного материала для восстановления ветхих стальных трубопроводов полимерных труб (ПЭ-100 с SDR 17). Предусматривается, что реконструкция стального трубопровода осуществляется по технологии Swagelining, которая заключается в протягивании в трубопровод плети полимерных труб идентичного диаметра после предварительных операций их термомеханического сжатия [14].

:: Эмпирические зависимости коэффициента удельного сопротивления*

табл. 1

Материал внутренней поверхности трубопровода	Эмпирическая зависимость $A = f(d)$
Полиэтилен ПЭ-100	$A_{\text{ПЭ-100}} = 0,0007 d^{-5,1744}$
Полиэтилен ПЭ-80	$A_{\text{ПЭ-80}} = 0,0009 d^{-5,2146}$
Стеклопластик	$A_{\text{стеклопл.}} = 0,0005 d^{-5,3592}$
ВЧШГ	$A_{\text{ВЧШГ}} = 0,0006 d^{-5,3081}$
Полимерный рукав	$A_{\text{пол.рук.}} = 0,0007 d^{-5,2791}$
Scotchkote 169 HB	$A_{\text{Sc.169}} = 0,0008 d^{-5,19}$
Scotchkote Liner 2400	$A_{\text{Sc.2400}} = 0,00095 d^{-5,19}$
Subcote FLP	$A_{\text{Subc.}} = 0,0008 d^{-5,1883}$
Сталь	$A_{\text{сталь}} = 0,0017 d^{-5,1359}$

* Зависимость коэффициента A от диаметра для защитных покрытий (труб) из различных материалов.

При такой технологии достигается наивысший эффект энергосбережения за счёт плотного прижатия новой полимерной трубы после её распрямления к внутренним стенкам старого стального трубопровода.

В качестве инструментария использовано специально разработанное программное обеспечение [17]. Задаваясь стандартными диаметрами и соответствующим значением SDR (отношение диаметра к толщине стенки трубы), а также величиной расчётного расхода q и коэффициента полезного действия η насосной установки, производится автоматизированный расчёт потенциала энерго-

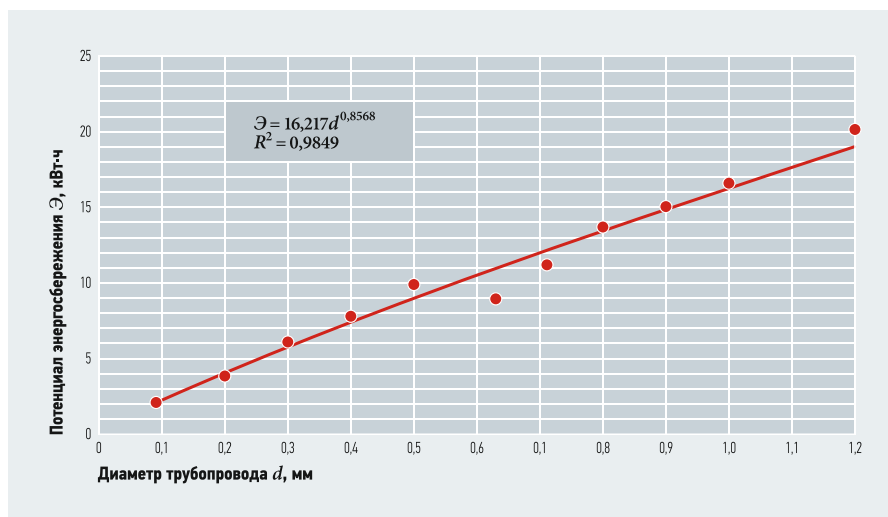


Рис. 1. Динамика изменения потенциала энергосбережения от диаметра восстанавливаемого трубопровода (при КПД насосной установки 0,95)

Результаты комплексного расчёта потенциала энергосбережения

табл. 2

Расчётные величины	Пары диаметров труб, м										
	0,09 / 0,1	0,2 / 0,2	0,3 / 0,3	0,4 / 0,4	0,5 / 0,5	0,63 / 0,63	0,71 / 0,71	0,8 / 0,8	0,9 / 0,9	1,0 / 1,0	1,2 / 1,2
Внутренний диаметр нового трубопровода после реновации, мм	77,82	176,2	264,8	352,6	440,6	555,2	625,8	705,2	793,4	881,4	1057,8
Толщина стенки после операций сжатия/распрямления трубы, мм	6,09	11,9	17,6	23,7	29,7	37,4	42,1	47,4	53,3	59,3	71,1
Потери напора на единицу длины, до реновации / после реновации, м	0,04832 / 0,04632	0,007642 / 0,006449	0,004751 / 0,003915	0,003376 / 0,002765	0,002636 / 0,002115	0,00162 / 0,001306	0,001517 / 0,0012162	0,0013909 / 0,0011095	0,00119623 / 0,0009496	0,001060 / 0,000839	0,000866 / 0,000681
Среднегодовая экономия электроэнергии на трубопроводе, на 1 п.м. / по всей длине, кВт·ч:	2,091 / 2090,1	3,8705 / 3870,5	6,10601 / 6106,01	7,7874 / 7787,4	9,81783 / 9817,83	8,92026 / 8920,26	11,22241 / 11222,41	13,6667 / 13,6667	14,97673 / 14976,73	16,6192 / 16619,2	20,18498 / 20184,98

* При значениях коэффициентов полезного действия насосных установок $\eta_{\text{НУ}} = 0,95$ и SDR 17.

сбережения для диапазона диаметров 0,09–1,2 м и протяжённостью трубопровода 1 и 1000 м. Результаты расчёта потенциала энергосбережения и других показателей для массива пар диаметров старого стального трубопровода и полиэтиленовых труб ПЭ-100 с SDR 17 представлены в табл. 2.

Для наглядности изменения величины среднегодовой экономии электроэнергии на погонный метр трубопровода $\Delta\mathcal{E}_{1\text{м}}$ представлен график (рис. 1), показывающий, что для больших диаметров потенциал энергосбережения значительно выше, чем для малых диаметров трубопроводов.

Таким образом, для ориентировочных расчётов величины энергосбережения при реконструкции старых стальных трубопроводов по технологии Swagelining новыми полиэтиленовыми трубами ПЭ-100 SDR 17 (при использовании соразмерных пар диаметров) можно использовать следующую формулу:

$$\Delta\mathcal{E}_{1\text{м}} = 16,217d^{0,8568}.$$

Выводы

1. Представлены полученные в ходе экспериментов эмпирические зависимости расчёта коэффициента удельного сопротивления для различных защитных покрытий (труб).

2. Разработана методика определения потенциала энергосбережения для ветхих напорных трубопроводов, подвергнутых бестраншейной реконструкции альтернативными защитными покрытиями (трубами).

3. С использованием специализированного ПО произведён расчёт потенциала энергосбережения для массива пар диаметров в случае восстановления старого стального трубопровода полимерными трубами SDR 17 по технологии Swagelining.

4. Получена ориентировочная математическая зависимость изменения потенциала энергосбережения от диаметра восстанавливаемого трубопровода. ●

- Отставнов А.А., Устюгов В.А., Дмитриев А.Н. К вопросу минимизации затрат на устройство и эксплуатацию подземных водопроводов // Сантехника, 2006. №9. С. 38–43.
- Kuliczowski A. Trwałość rozwiązań stosowanych w budowie i odnowie przewodów kanalizacyjnych. Instal. 2014. No. 3. Pp. 54–56.
- Чистякова А.В., Чухин В.А. Диагностика технического состояния металлических трубопроводов // Природообустройство, 2016. №2. С. 48–54.
- Башмаков И.А. Потенциал энергосбережения в России // Энергосбережение, 2009. №1. С. 28–36.
- Поршнев В.Н., Новикова Л.В. Мероприятия по энергосбережению и снижению потерь воды в системах городского водоснабжения // Энергосбережение, 2005. №10. С. 78–84.
- Орлов В.А. Восстановление трубопроводов с помощью внутренних защитных покрытий // Промышленное и гражданское строительство, 2010. №1. С. 35–37.

- Отставнов А.А., Орлов Е.В., Хантаев И.С. Определение приоритетных участков ремонта систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника, 2007. №3. С. 25–29.
- Салтыков Е.В. Эпоксидные покрытия на смену коррозии // Бурение и нефть, 2016. №11. С. 52–54.
- Bruce W.A. Comparison of fiber-reinforced polymer wrapping versus steel sleeves for repair of pipelines. Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites. 2015. No. 1. Pp. 61–78.
- Орлов В.А., Михайлин А.В., Хренов К.Е. Снижение энергопотребления при реновации кольцевых водопроводных сетей бестраншейными методами // Научное обозрение, 2015. №4. С. 155–158.
- Храменков С.В. Время управлять водой. — М.: Московские учебники и картолитография, 2012. 280 с.
- Захаров Ю.С. Опыт Германии. Бестраншейный ремонт систем водоотведения // Технологии мира, 2012. №1. С. 31–38.
- Cruz C., Emerson M. Spray applied coatings for the rehabilitation of drinking water pipelines // 31st No-Dig International Conference and Exhibition. 2012. Sao Paulo, Brasil. Pp. 1–7.
- Kuliczowski A. Renowacja czy rekonstrukcja na przykładzie przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych. Instal. 2012. No. 1. Pp. 46–49.
- Храменков С.В. Стратегия модернизации водопроводной сети. — М.: Стройиздат, 2005. 398 с.
- Орлов В.А. Трубопроводные сети. Автоматизированное сопровождение проектных разработок. — СПб.: Лань, 2015. 159 с.
- Орлов В.А., Зоткин С.П., Зоткина И.А., Хренов К.Е. Расчёт параметров работы напорных трубопроводов, восстанавливаемых предварительно сжатыми полимерными трубами / Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ №2014612753 от 06.03.2014. Правообл.: В.А. Орлов, С.П. Зоткин, И.А. Зоткина, К.Е. Хренов; заявл. 10.01.2014; опубл. 16.05.2014. Бюл. №9.
- Орлов В.А., Аверкеев И.А. Анализ автоматизированных программ расчёта водопроводных сетей в целях гидравлического моделирования при реновации трубопроводов // Вестник МГСУ, 2013. №3. С. 237–243.

References — see page 63.

Ensuring the energy saving effect after the reconstruction of pressure water networks with internal protective coatings. Pp. 26–28.

Vladimir A. Orlov, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Valentina A. Nechitaeva**, senior lecturer, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)

1. A.A. Ostavnov, V.A. Ustjugov, A.N. Dmitriev. *K voprosu minimizatsii zatrat na ustroystvo i jekspluatatsiju podzemnykh vodoprovodov* [On the issue of minimizing costs for the construction and operation of underground water pipelines]. *Santehnika* ["Plumbing" Magazine]. 2006. No. 9. Pp. 38–43. [In Russian]
2. A. Kuliczkowski. *Trwałość rozwiązań stosowanych w budowie i odnowie przewodów kanalizacyjnych*. Instal. 2014. No. 3. Pp. 54–56. [In Polish]
3. A.V. Chistjakova, V.A. Chuhin. *Diagnostika tehničeskogo sostojanija metallicheskih truboprovodov* [Diagnostics of the technical condition of metal pipelines]. *Prirodoobustrojstvo* ["Environmental management" Magazine]. 2016. No. 2. Pp. 48–54. [In Russian]
4. I.A. Bashmakov. *Potencial jenergosberezhenija v Rossii* [Potential for energy saving in Russia]. *Jenergosberezhenie* ["Energy saving" Magazine]. 2009. No. 1. Pp. 28–36. [In Russian]
5. V.N. Porshnev, L.V. Novikova. *Meroprijatija po jenergosberezheniju i snizheniju poter' vody v sistemah gorodskogo vodosnabzhenija* [Measures to save energy and reduce water losses in urban water supply systems]. *Jenergosberezhenie* ["Energy saving" Magazine]. 2005. No. 10. Pp. 78–84. [In Russian]
6. V.A. Orlov. *Vosstanovlenie truboprovodov s pomoshhju vnutrennih zashhitnykh pokrytij* [Restoration of pipelines with internal protective coatings]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* ["Industrial and civil construction" Magazine]. 2010. No. 1. Pp. 35–37. [In Russian]
7. A.A. Ostavnov, E.V. Orlov, I.S. Hantaev. *Opreделение prioritetnykh uchastkov remonta sistem vodosnabzhenija i vodootvedenija* [Determination of priority areas for repairing water supply and sewerage systems]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika* ["Water supply and sanitary equipment" Magazine]. 2007. No. 3. Pp. 25–29. [In Russian]
8. E.V. Saltykov. *Jepoksidnye pokrytija na smenu korrozii* [Epoxy coatings to replace corrosion]. *Burenie i neft'* ["Hole cutting and oil" Magazine]. 2016. No. 11. Pp. 52–54. [In Russian]
9. W.A. Bruce. Comparison of fiber-reinforced polymer wrapping versus steel sleeves for repair of pipelines. *Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites*. 2015. No. 1. Pp. 61–78.
10. V.A. Orlov, A.V. Mihajlin, K.E. Hrenov. *Snizhenie jenergopotreblenija pri renovacii kolcevych vodoprovodnykh setej bestranshejnymi metodami* [Reducing energy consumption during renovation of ring water supply networks using trenchless methods]. *Nauchnoe obozrenie* ["Scientific Review" Magazine]. 2015. No. 4. Pp. 155–158. [In Russian]
11. S.V. Hramenkov. *Vremja upravljat' vodoj* [Time to manage water]. Moscow. *Moskovskie uchebniki i kartolitografija* ["Moscow textbooks and carto-lithography" Publishers]. 2012. 280 p. [In Russian]
12. Ju.S. Zaharov. *Opyt Germanii. Bestranshejnij remont sistem vodootvedenija* [The experience of Germany. Trenchless repair of drainage systems]. *Tehnologii mira* ["World technologies" Magazine]. 2012. No. 1. Pp. 31–38. [In Russian]
13. Cruz C., Emerson M. Spray applied coatings for the rehabilitation of drinking water pipelines. 31st No-Dig International Conference and Exhibition. 2012. Sao Paulo, Brasil. Pp. 1–7.
14. A. Kuliczkowski. *Renowacja czy rekonstrukcja na przykładzie przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych*. Instal. 2012. No. 1. Pp. 46–49. [In Polish]
15. S.V. Hramenkov. *Strategija modernizatsii vodoprovodnoj seti* [Strategy for the modernization of the water supply network]. Moscow. *Strojizdat* [Publishing House of literature on the construction and architecture of the USSR ("Stroiizdat" Publishers)]. 2005. 398 p. [In Russian]
16. V.A. Orlov. *Truboprovodnye seti. Avtomatizirovannoe soprovozhdenie proektnykh razrabotok* [Pipeline networks. Automated support for project development]. St. Petersburg. *Lan'* ["A doe" Publishers]. 2015. 159 p. [In Russian]
17. V.A. Orlov, S.P. Zotkin, I.A. Zotkina, K.E. Hrenov. *Raschjot parametrov raboty napornych truboprovodov, vosstanavlivaemykh predvaritel'no szhatymi polimernymi trubami* [Calculation of the operating parameters of pressure pipelines restored by pre-compressed polymer pipes]. *Svid-vo o gos. reg-cii programmy dlja JeVM №2014612753 ot 06.03.2014* [Certificate of state registration of a computer program No. 2014612753 of Mart 6, 2014]. Copyright: V.A. Orlov, S.P. Zotkin, I.A. Zotkina, K.E. Hrenov. Decl.: January 10, 2014. Publ.: May 16, 2014. Bull. No. 9. [In Russian]
18. V.A. Orlov, I.A. Averkhev. *Analiz avtomatizirovannykh programm raschjota vodoprovodnykh setej v celjah gidravličeskogo modelirovanija pri renovacii truboprovodov* [Analysis of automated programs for calculating water supply networks for the purpose of hydraulic modeling during pipeline renovation]. *Vestnik MGSU* [The bulletin of National Research University Moscow State of Civil Engineering]. 2013. No. 3. Pp. 237–243. [In Russian]