

Комплексные исследования гидравлических характеристик напорных трубопроводов из альтернативных материалов

Рецензия эксперта на статью получена
23.07.2025 [The expert review of the article
was received on July 23, 2025]

Статистические данные свидетельствует, что к настоящему времени протяжённость трубопроводов городских водопроводных сетей в Российской Федерации составляет свыше 600 тыс. км, из них порядка 72 % являются стальными, 26 % — чугунными, 2 % — железобетонными, полиэтиленовыми и поливинилхлоридными. По данным АО «Мосводоканал», доля полиэтиленовых труб в массе трубопроводов городских водопроводных сетей к первому января 2025 года составила 11 %, а доля труб из чугуна и ВЧШГ — 35 %. По данным Росстата, на январь 2025 года состояние подземных трубопроводных сетей оставляет желать лучшего: порядка 45 % из них находятся в ветхом состоянии и требуют оперативного ремонта. Поскольку большинство водопроводных сетей, как в России, так и за рубежом, выполнено из стали, то вопрос их реновации вызывает наибольшую актуальность. Стальные трубы не имеют должной защиты от внешней и внутренней коррозии и начинают подвергаться различного рода дефектам через пять-шесть лет, создавая аварийные ситуации на сетях. Потери воды от повреждений на трубопроводах в виде трещин, разрывов и разгерметизации стыков составляют от 8 до 40 % от объёма воды, поданной в сеть [1].

Наряду с решением задач по оперативной реконструкции трубопроводных сетей одним из актуальных направлений работы городского хозяйства в приложении к системам водоснабжения является обеспечение ресурсо- и энергосбережения, как при подготовке питьевой воды, так и при её транспортировке насосами по напорным трубопроводам [2, 3].

Применение новых материалов для строительства и реновации трубопроводов позволяет сократить утечки и уменьшить гидравлические сопротивления в 1,2–2 раза по сравнению с расчётными значениями

Решение подобных задач по отношению к новым трубопроводам транспорта воды сводится к созданию условий, обеспечивающих безаварийный режим эксплуатации сетей в течение установленного (нормативного) срока их службы независимо от материала изготовления труб. Таким образом, вопросы эффективного и оперативного устранения всех типов дефектов на напорных трубопроводах (свищей, коррозионных обрастаний, трещин, разрывов швов, проломов и т.д.), приводящих к значительным потерям воды или существенному (до 20 %) уменьшению их живого сечения труб, всегда актуальны.

Применение новых материалов для строительства и реновации трубопроводов позволяет сократить (ликвидировать) утечки и уменьшить гидравлические сопротивления в 1,2–2 раза по сравнению с расчётными значениями, а также увеличить нормативные сроки службы трубопровода. В качестве таких труб прежде всего рассматриваются трубы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) и полимерные (ПЭ-100), в которых отсутствует зарастание внутренней поверхности труб. В стальных трубопроводах зарастание внутренней поверхности компенсируется повышением давления в сетях, что ведёт к значительному увеличению потребления электроэнергии.

УДК 628.462. Научная специальность: 2.1.4.

Комплексные исследования гидравлических характеристик напорных трубопроводов из альтернативных материалов

Владимир Александрович Орлов, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ «МГСУ», г. Москва); **Сергей Петрович Зоткин**, к.т.н., профессор, НИУ «МГСУ»; **Александр Александрович Бабанов**, к.т.н., эксперт по системам водоснабжения; **Александр Вилиевич Минченков**, директор по новым технологиям; **Олег Геннадьевич Волков**, эксперт по системам водоснабжения; **Маргарита Владимировна Хорошилова**, специалист, ООО «Липецкая трубная компания «Свободный сокол» (г. Липецк)

В статье представлен анализ результатов комплексных исследований по определению коэффициентов эквивалентной шероховатости двух типов трубопроводов — полиэтиленовых ПЭ-100 и из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) — традиционными гидравлическими и современными методами оптического и программного контрастирования. Полученные данные направлены на совершенствование нормативно-технической базы по применению напорных трубопроводных систем транспорта жидкостей с поиском оптимальных вариантов экономии электроэнергии при их проектировании, эксплуатации и ремонте.

Ключевые слова: трубопроводы, эквивалентная шероховатость, гидравлические эксперименты, оптическое контрастирование, компьютерное моделирование, экономия электроэнергии.

UDC 628.462. Scientific specialty number: 2.1.4.

Comprehensive studies of the hydraulic characteristics of pressure pipelines made of alternative materials

Vladimir A. Orlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU, Moscow); **Sergey P. Zotkin**, PhD (Technical), Professor, MGSU; **Alexander A. Babanov**, PhD (Technical), expert on water supply systems; **Alexander V. Minchenkov**, director of new technologies; **Oleg G. Volkov**, expert on water supply systems; **Margarita V. Khoroshilova**, specialist, "Svobodny Sokol" Lipetsk Pipe Co., LLC

The article presents an analysis of the results of comprehensive studies to determine the coefficients of equivalent roughness of two types of pipelines — polyethylene PE-100 and high-strength cast iron with spherical graphite — using traditional hydraulic and modern optical and software contrast methods. The data obtained are aimed at improving the regulatory and technical framework for the use of pressure pipeline systems for the transport of liquids with the search for optimal energy savings during their design, operation and repair.

Key words: pipelines, equivalent roughness, hydraulic experiments, optical contrast, computer modeling, energy saving.

Для строительства новых трубопроводных систем реальным выходом, обеспечивающим энергосбережение, является использование альтернативных материалов труб с меньшими гидравлическими сопротивлениями и стойких к зарастанию их внутренних стенок. Это же относится и к проведению ремонтно-восстановительных работ на старых трубопроводных сетях, где с помощью бестраншейных методов реновации, в частности, замены старых труб методом разрушения на трубы из ВЧШГ и полимерные трубы, как самостоятельно, так и при использовании в качестве внутренних защитных покрытий, возможно сэкономить от 5 до 15 % потребляемой энергии [4].

Отсюда можно констатировать, что решение задач энергосбережения вкупе с ресурсосбережением состоит в поиске новых и использовании уже опробованных материалов труб и внутренних ремонтных защитных покрытий, применение которых даст экономический эффект за счёт уменьшения коэффициентов гидравлического трения.

С одной стороны, использование новых ремонтных полимерных или традиционных материалов с улучшенными свойствами и более дешёвых необходимо рассматривать как веление времени, но, с другой стороны, оно требует принятия ряда контрмероприятий, направленных на строгое обоснование взаимозаменяемости тех или иных материалов трубопроводов с выявлением наиболее эффективных диапазонов диаметров и гидравлических характеристик локальных систем, включающих новые и соседствующие с ними старые участки трубопроводов.

Материалы и методы исследований

В качестве материала для исследований рассматриваются трубы из ВЧШГ и ПЭ-100, широко используемые в практике проектирования новых и реконструкции старых городских и производственных инженерных сетей.

Методом исследований являются гидравлические эксперименты по определению коэффициентов эквивалентной шероховатости, как ключевой характеристики трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения, с использованием данных оптической профилометрии (светоскопии), автоматизированной обработки полученных значений гидравлических и энергетических показателей альтернативных материалов труб при использовании их в период эксплуатации напорных трубопроводов. К гидравлическим показателям относятся величины потерь напора на единицу длины трубопровода i ,



:: Фото 1. Крупногабаритный гидравлический стенд с пьезометрами и пятью трубами [1 — ПЭ-100 SDR 17 (110×6,6) по ГОСТ 18599–2001 условным диаметром 100 мм; 2 — труба ВЧШГ условным проходом 100 мм по ТУ 1461-037-50254094–2008]

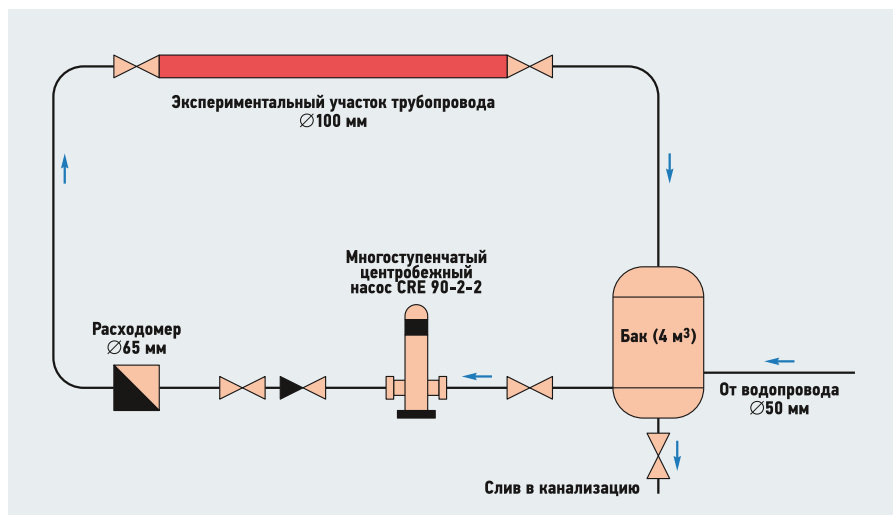
коэффициенты гидравлического сопротивления λ и коэффициент удельного сопротивления A [4].

Гидравлические исследования проводены в Лаборатории кафедры водоснабжения и водоотведения НИУ «МГСУ» по стандартной методике НИИ «ВОДГЕО». Работа на гидравлическом стенде осуществлялась по замкнутой системе с забором воды из накопительной ёмкости, заполняемой питьевой водой, подачи её к трубопроводам насосом Grundfos марки CRE90-2-2 с частотным регулированием и с последующим сливом в накопительную. В начале и конце рабочего участка длиной 10 м производились замеры статических давлений по соответствующим пьезометрам и фиксировался расход с помощью ультразвукового расходомера US-800 с электронным табло.

Общий вид стенда с исследуемыми трубами показан на фото 1, а схема экспериментального участка для гидравлических исследований представлена на рис. 1.

Проведение исследований по светоскопии (оптическому и программному контрастированию) образцов трубопроводов ПЭ-100 и ВЧШГ осуществлялось на инвертируемом электронном микроскопе Olympus GX53 японского производства с целью определения исходной шероховатости с высокой чёткостью исследуемого изображения.

Кроме того, в состав исследований входила оценка принимаемых технических решений при использовании для строительства или реконструкции трубопроводов с точки зрения экономии энергоресурсов на единицу протяжённости напорных трубопроводных сетей.



:: Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального участка трубопровода с накопительным баком, насосом и расходомером

По результатам экспериментов в контексте оценки качества внутренней поверхности трубопроводных систем представлен сопоставительный анализ расчётных показателей коэффициентов эквивалентной шероховатости, полученных гидравлическим путём и профилометрией.

Коэффициенты эквивалентной шероховатости определялись по альтернативным методикам и формулам, в частности, Прандтля (1) и Кольбрука-Уайта (2):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \left(\frac{d}{k_s} \right) + 1,14, \quad (1)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода; d — внутренний диаметр трубопровода, мм; k_s — коэффициент эквивалентной шероховатости трубопровода, мм:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{1}{3,71} \frac{k_s}{d} \right), \quad (2)$$

где Re — число Рейнольдса (безразмерная величина).

В отношении использования результатов профилометрии, как относительно простого способа с точки зрения временных затрат, необходимо отметить, что выход на конечное значение коэффициента эквивалентной шероховатости осуществлялся путём использования следующей зависимости (3) [6]:

$$K_s = 2 R_a^{1,33}, \quad (3)$$

где R_a — среднеарифметическое отклонение профиля внутренней поверхности трубы от средней линии.

Необходимо подчеркнуть, что коэффициент эквивалентной шероховатости K_s [мм] на сегодняшний день является одним из наиболее часто применяемых критериев оценки качества внутренней поверхности трубопроводов. Данный коэффициент присутствует в отечественных сводах правил по проектированию и строительству [7, 8].

Резюмируя изложенные выше материалы, в качестве постановочных задач исследований рассмотрены следующие:

- проведение гидравлических экспериментов и комплексного сопоставительного анализа показателей для трубопроводов

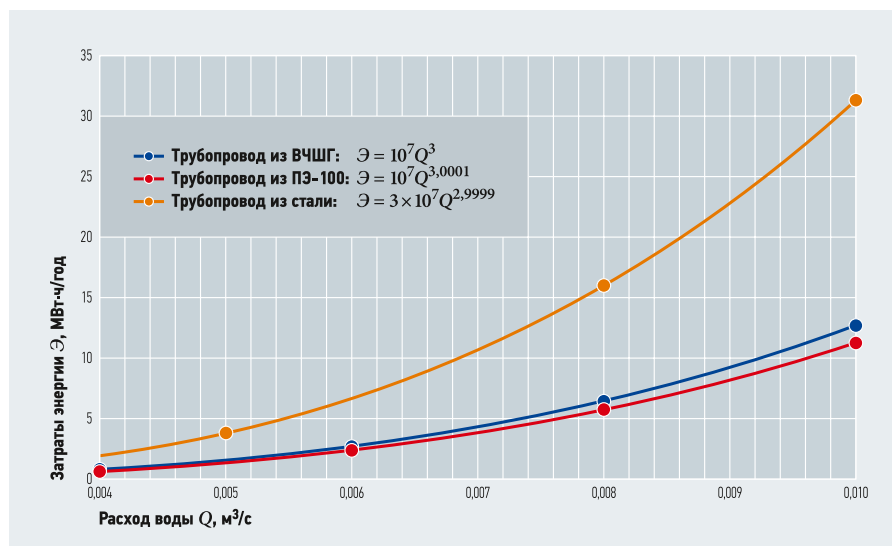


Рис. 3. Потребление электроэнергии $\mathcal{E}$ через коэффициенты удельного сопротивления λ в зависимости от расхода воды для трубопроводов из ВЧШГ, ПЭ-100 и стали

из ВЧШГ и ПЭ-100, а также стали как традиционного материала для строительства трубопроводов;

- проведение оценки принимаемых технических решений по строительству и реновации трубопроводов с точки зрения экономии энергоресурсов при транспортировке воды.

Результаты исследований

В результате проведённых исследований по оптическому контрастированию образцов труб и комплексных гидравлических испытаний труб ПЭ-100 и ВЧШГ на крупногабаритном стенде установлено, что расхождение показателей эквивалентной шероховатости, по данным светоскопии и гидравлических экспериментов, для каждого из указанных типов трубопроводов не превышало 12 % для ПЭ-100 и 13 % для ВЧШГ, а наиболее близкие значения при некоторых величинах расходов воды разнились менее чем на 3 %, что позволило определить автоматизированным путём характерные итоговые значения гидравлических показателей:

- для трубы из ПЭ-100:
 $i = 134,58 q^{1,9855}$; $\lambda_{\text{сред}} = 0,01547$;
 $A = 0,0008 d^{-5,191}$; $K_s = 0,0375$ мм;
- для трубы ВЧШГ:
 $i = 31,5 Q^{1,6943}$; $\lambda_{\text{сред}} = 0,01975$;
 $A = 0,0009 d^{-5,192}$; $K_s = 0,0498$ мм.

В табл.1 представлены сводные результаты экспериментальных исследований.

На рис. 3 в качестве сравнения представлены графики энергозатрат при использовании труб ВЧШГ, ПЭ-100 и стали условным диаметром 0,1 м и длиной 1000 м при различных расходах воды.

Анализ рис. 3 показывает незначительное отличие в характере кривых изменения энергозатрат для труб ВЧШГ и ПЭ-100 (разница в 0,0001). Для стальных трубопроводов ввиду большего гидравлического сопротивления их стенок энергозатраты возрастают значительно.

В отношении возможного увеличения гидравлического сопротивления во времени и тем самым роста энергозатрат на транспортировку воды по напорным трубопроводам из ВЧШГ и ПЭ-100 необходимо отметить следующее: коэффициенты гидравлического сопротивления данных труб приняты неизменными в сравнении со стальными трубопроводами, что доказывает длительная практика их применения [9].

Более того, за счёт возможного сглаживания впадин микронеровностей, то есть пространства между выступами шероховатости, не исключён эффект уменьшения коэффициентов эквивалентной шероховатости, в особенности в случаях транспортировки хлорсодержащих вод.

Сводная таблица экспериментальных и расчётных данных по альтернативным методикам и формулам

табл. 1

Средние значения эквивалентной шероховатости K_s [мм], по результатам светоскопии образцов труб ПЭ и ВЧШГ	Средние значения эквивалентной шероховатости K_s [мм], полученные опытным путём для трубы из полиэтилена условным проходом 0,0968 м и трубы ВЧШГ условным проходом 0,1 м по результатам гидравлических испытаний				Коэффициент эквивалентной шероховатости K_s [мм] в соответствии с нормативной документацией	Название нормативного документа
$K_s = 0,042759$ мм (ПЭ-100)	Труба из полиэтилена		Труба ВЧШГ		$K_s = 0,014$ (ПЭ-100)	СП 399.1325800.2018 (табл. 1 Приложения А)
	Прандтль	Кольбрук — Уайт	Прандтль	Кольбрук — Уайт		
$K_s = 0,0439$ мм (ВЧШГ)	35,59 мкм (0,03559 мм)	37,56 мкм (0,03756 мм)	49,87 мкм (0,0498 мм)	58,85 мкм (0,05885 мм)	$K_s = 0,15$ (ВЧШГ с ЦПП)	СП 66.13330.2011 (табл. 5.1)

Полученные экспериментальным путём значения шероховатостей для труб ВЧШГ имеют значительно меньшие значения, чем указанные в действующей нормативной документации; в качестве вывода следует отметить, что расхождения могут быть обусловлены тем, что современная трубная продукция отличается повышенным качеством изготовления

В частности, трубы ВЧШГ выпускаются с внутренним защитным цементно-песчаным покрытием. Нароста ржавчины (коррозионных процессов) на покрытии не наблюдается.

Выводы

1. В результате проведения экспериментальных гидравлических исследований труб из ВЧШГ и ПЭ-100 с параллельным проведением сравнительного анализа путём сопоставления результатов стеновых испытаний с результатами оптического контрастирования получены значения эквивалентной шероховатости K_z .
2. В соответствии с проведёнными расчётами по двум приведённым гидравлическим зависимостям получены достаточно близкие величины эквивалентной шероховатости K_z , как для трубы из полиэтилена (разница значений составила порядка 0,001 мм), так и для трубы из ВЧШГ (разница значений 0,009 мм), а по результатам светоскопии для труб из полиэти-



лена и из ВЧШГ результаты разнились на 0,00114 мм, то есть расхождение составило 2,66%.

3. Получены расчётные зависимости по определению энергозатрат для трёх типов труб (ВЧШГ, ПЭ-100 и сталь) при заданных параметрах и произведено сравнение результатов по возможности выбора наиболее экономичного решения по применению материала труб в системах транспортировки воды по напорному трубопроводу, то есть сделано ранжирование их по степени энергоэффективности.

Направленность данной статьи предполагает рассмотрение вопросов корректировки нормативной базы в части величины эквивалентной шероховатости для полиэтиленовых труб на основании применённых унифицированных расчётных формул

4. Проведено сравнение результатов экспериментальных исследований для труб из ВЧШГ и ПЭ-100 с данными, представленными в существующих нормативных и методических документах, что предполагает при разработке и модернизации нормативной базы внести коррективы в плане уменьшения значений K_z для труб из ВЧШГ, в том числе на основании повышенного качества изготовления современных труб.

5. Направленность статьи предполагает рассмотрение вопросов корректировки нормативной базы в части величины эквивалентной шероховатости для полиэтиленовых труб на основании применённых унифицированных расчётных формул. •

1. Храменков С.В. Стратегия модернизации водопроводной сети. — М.: Стройиздат, 2005. 288 с.
2. Башмаков И.А. Потенциал энергосбережения в России // Энергосбережение, 2009. №1. С. 28–36.
3. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоподводящих установках. — М.: Энергоатомиздат, 2006. 359 с.
4. Орлов В.А. Бестраншейные технологии и энергосбережение. — М.: Изд-во АСВ, 2021. 23 с.
5. Чугаев Р.Р. Гидравлика. — Л.: Энергия, 1970. 552 с.
6. Продоус О.А. Прогнозирование потерь напора в трубопроводах из разных полимерных материалов // Водоснабжение и санитарная техника, 2018. №11. С. 60–64.
7. СП 66.13330.2011. Проектирование и строительство напорных сетей водоснабжения и водоотведения с применением высокопрочных труб из чугуна с шаровидным графитом (с Изм. №1, 2) / Дата введ.: 20.05.2011.
8. СП 399.1325800.2018. Системы водоснабжения и канализации наружные из полимерных материалов. Правила проектирования и монтажа (с Изм. №1) / Дата введ.: 20.05.2011.
9. Касандина Т.А., Корягин М.В. Анализ полиэтиленовых труб // Современные научные исследования и инновации, 2022. №5.

References — see page 80.

Comprehensive studies of the hydraulic characteristics of pressure pipelines made of alternative materials. Pp. 23–26.

Vladimir A. Orlov, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU, Moscow); **Sergey P. Zotkin**, PhD (Technical), Professor, MGSU; **Alexander A. Babanov**, PhD (Technical), expert on water supply systems; **Alexander V. Minchenkov**, director of new technologies; **Oleg G. Volkov**, expert on water supply systems; **Margarita V. Khoroshilova**, specialist, "Svobodny Sokol" Lipetsk Pipe Co., LLC

1. S.V. Khramenkov. *Strategiya modernizatsii vodoprovodnoj seti* [Strategy for modernization of water supply network]. Moscow. *Strojizdat* [Publishing House of Literature on the Construction and Architecture ("Stroiizdat" Publishers)]. 2005. 288 p. [In Russian]
2. I.A. Bashmakov. *Potentsial energosberezheniya v Rossii* [Potential of energy saving in Russia]. *Energosberezhenie* ["Energy saving" Magazine]. 2009. No. 1. Pp. 28–36. [In Russian]
3. B.S. Leznov. *Energosberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy saving and adjustable drive in pumping and blower units]. Moscow. *Energoatomizdat* [Publishing House of Energy and Nuclear Industry of the USSR ("Energoatomizdat" Publishers)]. 2006. 359 p. [In Russian]
4. V.A. Orlov. *Bestranshejnye tekhnologii i energosberezhenie* [Trenchless technologies and energy saving]. Moscow. *Izd-vo ASV* [Publishing House of the Association of Construction Universities ("ASV" Publishers)]. 2021. 23 p. [In Russian]
5. R.R. Chugaev. *Gidravlika* [Hydraulics]. Leningrad. *Energiya* ["An energy" Publishers]. 1970. 552 p. [In Russian]
6. O.A. Prodous. *Prognozirovanie poter' napora v truboprovodakh iz raznykh polimernykh materialov* [Forecasting pressure losses in pipelines made of different polymeric materials]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* ["Water supply and sanitary engineering" Magazine]. 2018. No. 11. Pp. 60–64. [In Russian]
7. SP 66.13330.2011 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 66.13330.2011]. *Proektirovanie i stroitel'stvo napornykh setej vodosnabzheniya i vodootvedeniya s primeneniem vysokoprochnykh trub iz chuguna s sharovidnym grafitom (s Izm. No. 1, 2)* [Design and construction of pressure water supply and sanitation networks using high-strength spheroidal graphite cast iron pipes (with Amendments No. 1, 2)]. Date of impl.: May 20, 2011. [In Russian]
8. SP 399.1325800.2018 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 399.1325800.2018]. *Sistemy vodosnabzheniya i kanalizatsii naruzhnye iz polimernykh materialov. Pravila proektirovaniya i montazha (s Izm. No. 1)* [Outdoor water supply and sanitation systems made of polymeric materials. Design and installation rules (with Amendment No. 1)]. Date of impl.: May 20, 2011. [In Russian]
9. T.A. Kasandina, M.V. Koryagin. *Analiz polietilenovykh trub* [Analysis of polyethylene pipes]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* ["Modern scientific research and innovation" Magazine]. 2022. No. 5. [In Russian]