

ИННОВАЦИИ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 696.133:678

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.1

Длительная прочность полиэфирных композиционных труб большого диаметра

Михаил Германович Ковалев¹, Владимир Анатольевич Какуша¹,
Олег Александрович Корнев¹, Денис Александрович Мельников²,
Максим Владимирович Федоров¹, Данил Васильевич Зайцев¹,
Павел Дмитриевич Капырин¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

²Новые трубные технологии (НТТ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены коэффициенты релаксации и ползучести, долговременная предельная деформация изгиба при длительном воздействии влаги и химически активной среды (10 000 ч) канализационных труб.

Материалы и методы. Использовали канализационные трубы диаметром 400, 1200 и 1400 мм, изготовленные из полиэфирных стеклопластиков. К образцу с постоянной скоростью прикладывали сжимающую нагрузку до достижения удельной кольцевой деформации $3,0 \pm 0,5$ % за 60 ± 10 с. Полученную удельную кольцевую деформацию поддерживали постоянной в течение 2 мин, по прошествии этого времени определяли и фиксировали сжимающую нагрузку и кольцевую деформацию. Сущность метода заключается в нагружении образца для испытаний, расположенного горизонтально и погруженного в воду, при заданной температуре диаметрально сжимающей нагрузкой на время, в течение которого кольцевая деформация остается постоянной. Нагрузку измеряют через заданные промежутки времени до достижения 10 000 ч. По результатам испытаний определяют долговременную удельную кольцевую жесткость и коэффициент релаксации при воздействии влаги в соответствии с ГОСТ Р 57008–2016. Для испытания используют два образца, если иное не установлено в нормативном документе. Долговременная удельная кольцевая жесткость и коэффициент релаксации являются средним арифметическим, полученным для двух образцов.

Результаты. Установлено, что эксплуатационные характеристики (долговременная предельная деформация изгиба, коэффициенты релаксации и ползучести при воздействии влаги) исследованных канализационных труб определяются удельной кольцевой жесткостью и их диаметром. Для полиэфирных труб с начальной кольцевой жесткостью 5000 Н/м² повышение их диаметра с 400 до 1400 мм приводит к линейному росту коэффициента релаксации (с 0,79 до 0,96) и снижению долговременной предельной деформации изгиба (с 0,84 до 0,75 %) при воздействии влаги в течение 10 000 ч.

Выводы. Долговечность исследованных канализационных труб из полиэфирных стеклопластиков превышает 50 лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диаметр, канализационные трубы, кольцевая жесткость, коэффициенты ползучести и релаксации, полиэфирные стеклопластики, предельные деформации изгиба, агрессивная среда

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ковалев М.Г., Какуша В.А., Корнев О.А., Мельников Д.А., Федоров М.В., Зайцев Д.В., Капырин П.Д. Длительная прочность полиэфирных композиционных труб большого диаметра // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 4. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.1

Автор, ответственный за переписку: Олег Александрович Корнев, i@okornev.ru.

Long-term durability of large-diameter polyester composite pipes

Mikhail G. Kovalev¹, Vladimir A. Kakusha¹, Oleg A. Kornev¹, Denis A. Melnikov²,
Maxim V. Fedorov¹, Danil V. Zaitsev¹, Pavel D. Kapyrin¹

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

²New Pipe Technologies; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper deals with relaxation and creep coefficients, long-term ultimate bending deformation under long-term exposure to moisture and chemically active environment (10,000 hours) of sewer pipes.

Materials and methods. 400, 1,200 and 1,400 mm diameter sewer pipes made of glass-reinforced polyester. A compressive load was applied to the specimen at a constant rate until a specific annular strain of $(3.0 \pm 0.5) \%$ was achieved in (60 ± 10) s. The obtained specific annular strain was kept constant for 2 minutes, after this time the compressive load and annular strain were determined and recorded. The essence of the method is to load a test specimen, placed horizontally and immersed in water, at a given temperature, with a diametrically compressive load for a time during which the annular strain remains constant. The load is measured at specified intervals until 10,000 h is reached. According to the test results, the long-term specific annular stiffness and relaxation coefficient under the influence of moisture are determined in accordance with the methodology of GOST R 57008–2016. Two specimens shall be used for testing, unless otherwise specified in the normative document. Long-term specific ring stiffness and relaxation coefficient are the arithmetic mean obtained for two specimens.

Results. It was found that the performance characteristics (long-term ultimate bending deformation, relaxation and creep coefficients when exposed to moisture) of the investigated sewer pipes are determined by the specific ring stiffness and their diameter. For polyester pipes with initial ring stiffness of 5,000 N/m² increasing their diameter from 400 to 1,400 mm leads to linear increase of relaxation coefficient (from 0.79 to 0.96) and decrease of long-term ultimate bending strain (from 0.84 to 0.75 %) when exposed to moisture during 10,000 hours.

Conclusions. The durability of the investigated sewer pipes made of glass-reinforced polyester exceeds 50 years.

KEYWORDS: sewer pipes, ring stiffness, creep and relaxation coefficients, glass-reinforced polyester

FOR CITATION: Kovalev M.G., Kakusha V.A., Kornev O.A., Melnikov D.A., Fedorov M.V., Zaitsev D.V., Kapyrin P.D. Long-term durability of large-diameter polyester composite pipes. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(4). URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.

Corresponding author: Oleg A. Kornev, i@okornev.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Трубы из стеклонаполненных полимерных материалов на основе реакционноспособных олигомеров (РСО) широко используются в химической, нефтегазовой и аэрокосмической промышленности, судостроении и мелиорации, гидротехнике и строительной индустрии для транспортировки энергоносителей и агрессивных жидкостей (водных растворов различных химических соединений), жирных пищевых продуктов и хозяйственно-бытовых отходов, промышленных и ливневых стоков, питьевой, морской и технической воды. Это обусловлено, прежде всего, низкой плотностью, высокими химической стойкостью и физико-механическими характеристиками труб из стеклонаполненных полимеров, длительным сроком их эксплуатации [1–5]. Кроме того, они обладают низкой теплопроводностью, что снижает на 30–50 % теплопотери относительно высокой теплостойкостью, позволяющей транспортировать жидкости с температурой до 135 °С, высокой степенью герметичности и надежности, гидравлическим сопротивлением (на 25–30 % ниже, чем у стальных труб). При их эксплуатации отсутствует зарастание внутренних поверхностей труб отложениями из-за гладкой поверхности, они быстро и легко монтируются, а их долговечность превышает 50 лет [6, 7].

Эксплуатационные свойства полимерных композиционных труб во многом зависят от номинального диаметра (DN), начальной удельной кольцевой жесткости (SN) и вида используемого для их производства связующего. Чаще всего для их производства применяют полиэфирные или эпоксидные смолы. Для устройства напорной и безнапорной канализации, дренажа, водопропускных систем и водоснабжения используют композитные трубы и детали трубопроводов из стеклопластиков на ос-

нове промышленных марок полиэфирных смол^{1, 2}. Трубы и детали трубопроводов из полиэфирных стеклопластиков с номинальным диаметром от 300 до 3000 мм эксплуатируются при рабочем давлении до 3,2 МПа при температуре среды от –50 до +50 °С. Проектирование и монтаж подземных трубопроводов водоснабжения и канализации из стеклопластиковых труб регламентируют соответственно СП 40-104³ и СП 40-105⁴. Методы синтеза, свойства и области применения полиэфирных смол детально рассмотрены в работах [8, 9].

Производство композиционных труб длиной 6 и 12 м на основе РСО осуществляют следующими методами:

1. Намоткой (навивкой) пропитанного связующим стекловолокна на металлическую поверхность формообразующей технологической оправки формы с последующим его отверждением. Намотка обеспечивает высокое качество внутренней поверхности композитной трубы за счет ее формирования на наружной поверхности оправки. Для повышения плотности, снижения стоимости и пористости композитов стекловолокно используют в сочетании с кварцевым песком.

2. Центробежным формованием (в том числе из препрега) на внутреннюю поверхность тех-

¹ ТУ 22.21.21-004-99675234–2019. Трубы, соединительные элементы и детали трубопроводов для канализации, водотока и дренажа из реактопластов, армированных стекловолокном, изготовленные по технологии «НТТ».

² СТО 99675234.001–2020. Трубы и детали трубопроводов водопропускные «НТТ ДОР» из реактопластов, армированных стекловолокном. Технические условия. 2020. 122 с.

³ СП 40-104–2001. Проектирование и монтаж подземных трубопроводов водоснабжения из стеклопластиковых труб.

⁴ СП 40-105–2001. Проектирование и монтаж подземных трубопроводов канализации из стеклопластиковых труб.

нологической оправки, что позволяет получать трубы с высокой точностью внешнего диаметра (до 0,1 мм).

3. Пултрузией (протяжкой) через зазоры между наружной и внутренней поверхностями оправки. Однако этим методом пултрузии сложно реализовать кольцевое армирование труб и производить композитные трубы больших диаметров.

4. Экструзией связующего, наполненного рубленными стекловолокном и кварцевым песком. Этот метод используют в основном при применении в качестве связующих термопластичных полимеров (полиэтилена или полипропилена).

ООО «Новые трубные технологии» (ООО «НТТ») производит канализационные полиэфирные композиционные трубы и фасонные детали методом непрерывной намотки различных видов стеклорвинга, наполненных кварцевым песком и пропитанных полиэфирным связующим. Композиционные трубы состоят из трех слоев:

1. Внутренний (лайнерный) — защитный герметизирующий слой на основе химически стойкой полиэфирной смолы, наполненной стекловолокном.

2. Структурный слой (несущая оболочка) на основе полиэфирных связующих, наполненных стекловолокном и кварцевым песком с размером частиц менее 1 мм.

3. Наружный слой — полиэфирные связующие, наполненные стекловолокном. Указанные полиэфирные композиционные трубы компания ООО «НТТ» производит в соответствии с требованиями ТУ 22.21.21-004-99675234–2019¹ и СТО 99675234.001–2020² в двух вариантах:

- обычном — для подземной прокладки;
- специальном — для открытой (надземной) прокладки.

Во втором случае в состав связующего дополнительно вводят различные пигменты и светостабилизаторы. Основные физико-механические

свойства канализационных труб из полиэфирного стеклопластика приведены в табл. 1. При производстве указанных труб соотношение связующее/стекловолокно составляет 40/60 мас. %, а соотношение связующее/стекловолокно/кварцевый песок равно 34–35/12–66/0–54 мас. %. При этом степень отверждения полиэфирного связующего превышает 98 % [10–15].

Учитывая широкое применение в современном строительстве полиэфирных композиционных труб, представлялось целесообразным оценивать влияние номинального диаметра и начальной удельной кольцевой жесткости на значение долговременной удельной кольцевой жесткости при релаксации и ползучести, коэффициентов релаксации и ползучести, а также долговременной предельной деформации изгиба при воздействии влаги и агрессивной среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования использовали трубную продукцию ООО «Новые трубные технологии – Пересвет» — канализационные трубы на основе полиэфирных стеклопластиков марки СК/НПС-К, соответствующие требованиям ТУ 22.21.21-004-99675234–2019 [5] с номинальным диаметром 400, 1200 и 1400 мм с номинальной жесткостью 5000 Н/м². Условные обозначения канализационных труб: Ду 400-0,6-5000, Ду 1200-0,6-5000, Ду 1400-0,6-5000. Толщина стенки исследованных труб колеблется в пределах от 6,6 до 22,0 мм.

Физико-механические характеристики трубопроводов из полиэфирных стеклопластиков определяли в соответствии с требованиями действующих ГОСТ:

- начальную удельную кольцевую жесткость по ГОСТ Р 55071–2012 (метод Б)⁵;

⁵ ГОСТ Р 55071–2012. Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Методы испытаний. Определение начальной удельной кольцевой жесткости.

Табл. 1. Физико-механические свойства материала стенок полиэфирной стеклопластиковой трубы [15]

Наименование показателя	Значение
Плотность, кг/м ³	1700–1900
Предел прочности при растяжении, МПа, в окружном направлении в осевом направлении	150–440 55–85
Окружной модуль упругости при растяжении, МПа	10 000–29 000
Осевой модуль упругости при растяжении, МПа	3800–5500
Окружной модуль упругости при изгибе, МПа	3800–5500
Коэффициент линейного теплового расширения, 1/°C	2,5 · 10 ⁻⁵
Коэффициент Пуассона окружность/ось, ν_{hl} ось/окружность, ν_{lh}	0,08–0,10 0,23–0,25
Показатель твердости внутренней и наружной поверхностей по Барколу (изофталева, ортофталева и винилэфирная смола), не менее	40
Шероховатость внутренней стенки, мкм, не более	25
Абсолютная шероховатость внутренней поверхности стенок, мкм, не более	50

- долговременную удельную кольцевую жесткость при релаксации и расчет коэффициентов релаксации при воздействии влаги в течение 10 000 ч по ГОСТ Р 57008–2016⁶, нагрузку прикладывали до достижения расчетной деформации, равной 0,40 %;

- долговременную удельную жесткость при ползучести и коэффициенты ползучести при воздействии влаги в течение 10 000 ч по ГОСТ 34643–2020⁷, нагрузку прикладывали до достижения расчетной деформации, равной 0,17 %;

- долговременные предельные деформации изгиба и долговременную предельную относительную деформации при воздействии влаги по ГОСТ 34647–2020⁸;

⁶ ГОСТ Р 57008–2016. Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Метод определения долговременной удельной кольцевой жесткости при релаксации и коэффициента релаксации при воздействии влаги.

⁷ ГОСТ 34643–2020. Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Метод определения долговременной удельной кольцевой жесткости при ползучести и коэффициента ползучести при воздействии влаги или в сухих условиях.

⁸ ГОСТ 34647–2020. Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Метод определения долговременной предельной деформации изгиба и долговременной предельной относительной кольцевой деформации при воздействии влаги.

- химическую стойкость внутренней поверхности в условиях нагружения по ГОСТ 34644–2020⁹. В качестве химической среды применялся раствор с содержанием 0,5 моль/л серной кислоты.

Метод определения долговременной удельной кольцевой жесткости при релаксации и расчет коэффициентов релаксации при действии влаги в течение 10 000 ч (ГОСТ Р 57008–2016⁶) состоит в нагружении образцов труб вертикальной сжимающей нагрузкой, погруженных в воду с pH = 6,7, и температурой 23 ± 2 °С. Нагрузку измеряли через заданные промежутки времени до достижения 10 000 ч.

Схема установки и собранная установка для определения указанных показателей приведены на рис. 1, 2.

Образец трубы и нагружающая рама образуют замкнутую систему тел, на которую действуют гидростатические эффекты, не оказывающие влияния на приложенную к образцу нагрузку. Установка для испытаний на сжатие канализационных труб обеспечивает сжатие погруженного в воду образца с постоянной скоростью перемещения и измерение нагрузки с погрешностью не более ± 1 % от измеряемой величины.

Для исключения влияния трения на прилагаемое усилие в нагружающих площадках были предварительно просверлены сквозные отверстия диаметром 16 мм, обеспечивающие необходимый

⁹ ГОСТ 34644–2020. Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Методы определения химической стойкости внутренней поверхности в условиях нагружения.

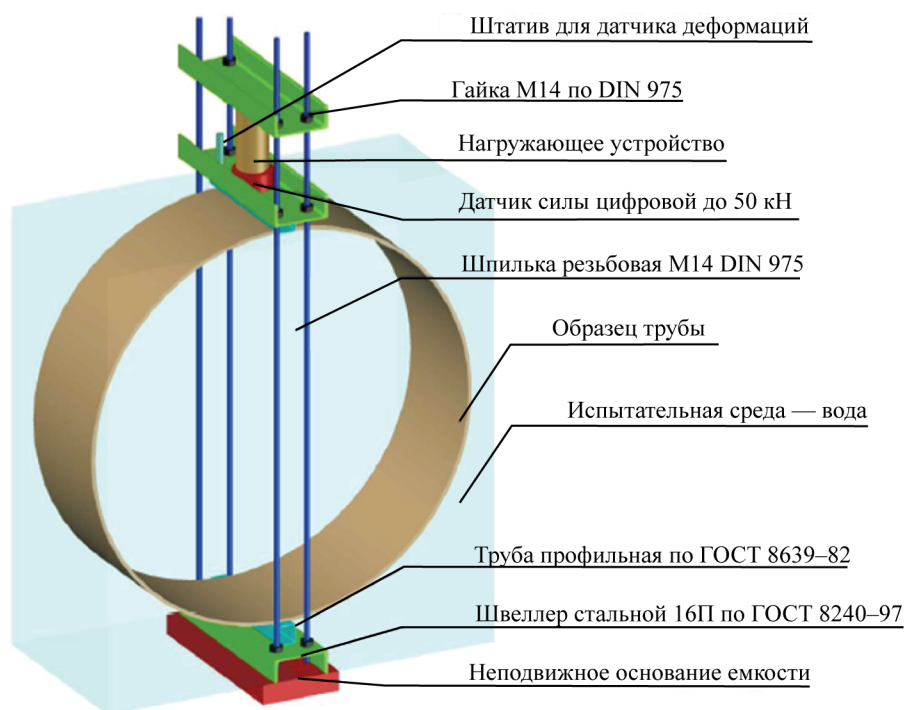


Рис. 1. Схема установки для определения показателей



Рис. 2. Образцы труб, установленные в пространство лотка, заполненного водой

технологический зазор между стержнем с резьбой и нагружающими площадками.

Для измерения нагрузки, приложенной к образцу трубы, с погрешностью не более $\pm 1\%$ использовали цифровой тензодатчик сжатия мембранного типа Тензо-М М50-С3 со степенью защиты оболочки IP68 — защита при полном и длительном погружении в воду на глубину до 1 м. Показания тензодатчика регистрировались при помощи портативного цифрового регистратора ТС-32К, оснащенного интервальным таймером, встроенной памятью и интерфейсом для управления с компьютера, позволяющего собирать и передавать данные с 20 различных каналов. Емкость, наполненная водой с pH 6,7, представляет собой глубоководный длинноволновой лоток шириной 1,6 м, глубиной 1,8 м и длиной 90 м. Для достижения расчетной деформации ϵ_p в течение 3 мин при нагружении образца трубы использовали домкрат пневматический Сивик В-690 140-400 мм. Для измерения длины, диаметра и толщины стенки использовали штангенциркуль цифровой с глубиномером (ГОСТ 166–89), линейку измерительную металлическую (ГОСТ 427–75) и рулетку измерительную металлическую (ГОСТ 7502–98). Перед погружением образцов труб в воду по их наружной поверхности наносили по окружности трубы с шагом 60° прямые линии, выполняющие роль опорных

линий, и измеряли следующие геометрические параметры образца:

- длина L , м, каждого образца вдоль опорной линии с погрешностью $\pm 1\%$;
- толщина стенки образца с каждой стороны опорных линий с погрешностью не более $\pm 0,2\%$;
- внешний диаметр $d_{\text{ср}}$, м, посередине между каждой парой противоположных опорных линий с погрешностью $\pm 0,5\%$. Перед проведением испытаний образцы труб кондиционировались в течение 96 ч при температуре $23 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $50 \pm 10\%$ [16–20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные эксплуатационные характеристики исследованных канализационных труб марки СК/4ПС-К из полиэфирных стеклопластиков, использованных в работе, представлены в табл. 2 и на рис. 3, 4. Анализ данных табл. 2, рис. 3, 4 показал, что при номинальной жесткости 5000 Н/м² увеличение диаметра канализационных труб с 400 до 1400 мм приводит к линейному росту коэффициента релаксации (с 0,79 до 0,96) и снижению долговременной продольной деформации изгиба при воздействии влаги (с 0,84 до 0,75 %) и химической среды (с 0,81 до 0,64 %) в течение 10 000 ч. При этом коэффициент ползучести при воздействии влаги практически не зависит от номинального диаметра канализационных труб. Долговременная продольная деформация изгиба труб в агрессивной среде меньше, чем в обычной воде. Это обусловлено различной химической стойкостью полиэфирных связующих к действию воды и агрессивных сред.

Полученные данные в результате долгосрочных испытаний канализационных труб продемонстрировали, что они могут эксплуатироваться в течение более 50 лет, а по своим эксплуатационным характеристикам соответствуют требованиям ГОСТ Р ИСО 10467–2013¹⁰.

¹⁰ ГОСТ Р ИСО 10467–2013. Трубопроводы из армированных стекловолокном термореактопластов на основе ненасыщенных полиэфирных смол для напорной и безнапорной канализации и дренажа. Общие технические требования.

Табл. 2. Нормируемые показатели для канализационных труб, полученные в результате испытаний

Показатели	Вид канализационной трубы		
	Ду 400-0,6-5000	Ду 1200-0,6-5000	Ду 1400-0,6-5000
Начальная удельная кольцевая жесткость, Н/м ²	5800	5350	5750
Коэффициент релаксации при воздействии влаги в течение 10 000 ч	0,79	0,92	0,96
Коэффициент ползучести при воздействии влаги в течение 10 000 ч	0,81	0,85	0,81
Долговременная предельная деформация изгиба при воздействии влаги, %	0,84	0,77	0,75
Долговременная предельная деформация изгиба при химической среде, %	0,81	0,65	0,64

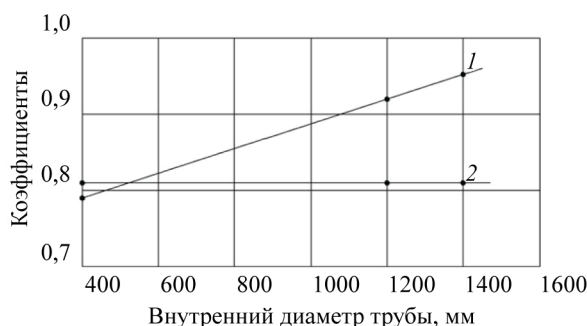


Рис. 3. Зависимость коэффициентов релаксации (1) и ползучести (2) от диаметра стеклопластиковой трубы

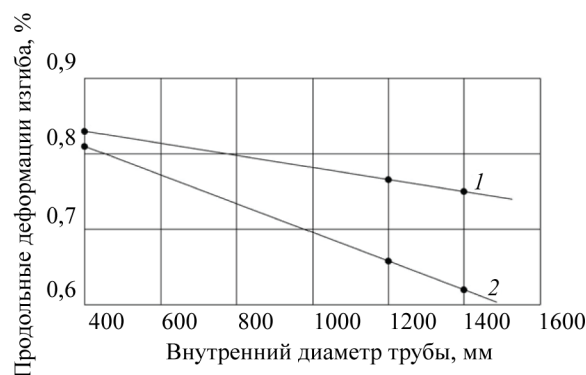


Рис. 4. Зависимость долговременной продольной деформации изгиба при воздействии влаги (1) и химической среды (2) от диаметра стеклопластиковой трубы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что коэффициенты релаксации и ползучести, долговременная предельная деформация изгиба при воздействии влаги в течение 10 000 ч определяются диаметром трубы и ее начальной удельной кольцевой жесткостью. С ростом диаметра канализационных труб коэффициенты

релаксации и ползучести возрастают. В то же время долговременная предельная деформация изгиба канализационных труб с начальной удельной кольцевой жесткостью 5000 Н/м² при воздействии влаги в течение 10 000 ч снижается с ростом их диаметра. Расчет долговечности исследованных канализационных труб из полиэфирных стеклопластиков показал, что срок эксплуатации превышает 50 лет.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Кушнир С.Я., Горковенко А.И., Гербер А.Д., Игнатко В.М. Прочностные характеристики стеклопластиковых труб и потеря устойчивости трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2003. № 3 (39). С. 58–63. EDN TGFXXD.
- Байбурова М.М., Файзрова И.Н. Оценка прочностных характеристик стеклопластиковых труб в областях смешанного напряженного состояния // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2011. № 2. С. 17–19. EDN NWEEGF.
- Бутовка А.Н., Строганов Н.В. Исследование прочностных характеристик стеклопластиковых труб на основе стекловолокна и эпоксидного связующего при различных условиях эксплуатации // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2017. № 6 (64). С. 38–40. EDN ZWUGYN.
- Мельников Д.А., Иванов С.В., Антошин В.А., Албагачиев А.Ю. Исследование упруго-прочностных характеристик стеклопластиковых труб для микротоннелирования при осевом сжатии // Композиты и наноструктуры. 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 48–59. EDN WESLUL.
- Мельников Д.А., Иванов С.В., Антошин В.А. Стеклокомпозитные трубы и изделия из них: заданное сочетание эксплуатационных и технологических свойств // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2020. № 6. С. 22–23. EDN GVVBOI.
- Бьёркланд И. Пластмассовые трубы, их характеристики и области применения. М. : NPG, 2000. 116 с.
- Лопатина А.А., Сазонова С.А. Анализ технологий укладки труб // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2016. Т. 7. № 1. С. 93–111. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.12. EDN VPZUXZ.
- Седов Л.Н., Михайлова З.В. Ненасыщенные полиэфирсы. М. : Химия, 1977. 231 с.
- Пот У. Полиэфирсы и алкидные смолы. М. : Пэйнт-Медиа, 2009. 232 с.
- Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М. : Химия, 1981. 230 с.
- Антошин В.А., Мельников Д.А., Иванов С.В., Албагачиев А.Ю. Определение долговременных прочностных свойств стеклокомпозитных труб для расчета срока эксплуатации // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : науч. тр. VII Междунар. науч. конф. 2021. С. 31–33. EDN FBBSRY.
- Мельников Д.А., Ильичев А.В., Вавилова М.И. Сравнение стандартов для проведения механических испытаний стеклопластиков на сжатие // Труды ВИАМ. 2017. № 3 (51). С. 6. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-6-6. EDN YGASIX.
- Мельников Д.А., Албагачиев А.Ю., Антошин В.А., Иванов С.В. Определение коэффициентов запаса прочности конструкции стеклокомпозитных

труб для микротоннелирования // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : науч. тр. VII Междунар. науч. конф. 2021. С. 166–168. EDN YPHBMK.

14. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. 2-е изд., перераб. М. : Химия, 1975. 263 с.

15. Мэллой Р.А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением. СПб. : Профессия, 2006. С. 30, 81, 82.

16. Бобович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы. М. : МГИУ, 2009. С. 6, 28, 55. EDN QNERBN.

17. Язубов Э.З. Композиционно-волоконистые трубы в нефтегазовом комплексе. М. : ЦентрЛит-НефтеГаз, 2008. С. 86–87, 103. EDN QNVDFG.

18. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб. : Профессия, 2006. С. 56–58. EDN QNEHJZ.

19. Кулезнева В.К., Гусева В.К. Технологии переработки полимеров. М. : Химия, 2004. С. 94, 281, 355.

20. Калинин В.А. Технология производства ракетных двигателей твердого топлива. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 63, 98, 118.

Поступила в редакцию 1 марта 2023 г.

Принята в доработанном виде 12 июля 2023 г.

Одобрена для публикации 24 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Михаил Германович Ковалев — ведущий инженер Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; KovalevMG@mgsu.ru;

Владимир Анатольевич Какуша — заведующий лабораторией испытаний строительных конструкций материалов и изделий; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; KakushaVA@mgsu.ru;

Олег Александрович Корнев — заместитель директора Научно-исследовательского института экспериментальной механики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; i@okornev.ru;

Денис Александрович Мельников — заместитель директора Дирекции инжиниринга и проектных работ; **Новые Трубные Технологии (НТТ);** 129110, г. Москва, ул. Щепкина, д. 53/4с1, melnikov@ntt.su;

Максим Владимирович Федоров — заведующий лабораторией натурных испытаний; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; FedorovMV@mgsu.ru;

Данил Васильевич Зайцев — заместитель заведующего лабораторией натурных испытаний; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; dannil5@mail.ru;

Павел Дмитриевич Капырин — кандидат технических наук, доцент кафедры механизации, автоматизации и роботизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kapyrin@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Ковалев М.Г. — обработка результатов исследования.

Какуша В.А. — организация и проведение экспериментальных исследований, проектирование установки для исследования, обработка результатов исследования.

Корнев О.А. — руководство проектом, проектирование оснастки.

Мельников Д.А. — научное редактирование текста.

Федоров М.В. — испытания строительных материалов и изделий натуральных размеров, разработка способов нагружения и передачи нагрузок на образцы, обработка результатов испытаний.

Зайцев Д.В. — организация и проведение экспериментальных исследований, проектирование установки для исследований, обработка результатов исследования.

Капырин П.Д. — обработка результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Pipes made of glass-filled polymer materials based on reactive oligomers are widely used in chemical, oil

and gas and aerospace industries, shipbuilding and land reclamation, hydraulic engineering and construction industry for transportation of energy carriers, and ag-

gressive liquids (aqueous solutions of various chemical compounds), oily food products and household waste, industrial and storm water drains, drinking, sea and technical water. This is due, first of all, to low density, high chemical resistance and physical and mechanical characteristics, pipes made of glass-filled polymers, long service life [1–5]. In addition, they have low thermal conductivity, which reduces heat losses by 30–50 %, relatively high heat resistance, allowing to transport liquids with temperatures up to 135 °C, high degree of tightness and reliability, hydraulic resistance (25–30 % lower than that of steel pipes). During their operation, there is no overgrowth of deposits on the internal surfaces of pipes due to their smooth surface, they are quickly and easily installed, and their durability exceeds 50 years [6, 7].

The performance of polymer composite pipes depends largely on the nominal diameter (DN), the initial specific ring stiffness (SN) and the type of binder used for their production. Most often polyester or epoxy resins are used for their production. For pressure and non-pressure sewerage, drainage, culverts and water supply composite pipes and pipeline parts made of fibreglass plastics based on industrial grades of polyester resins are used^{1,2}. Pipes and parts of pipelines from glass-reinforced polyester with nominal diameter from 300 to 3,000 mm are operated at working pressure up to 3.2 MPa at medium temperature from –50 to +50 °C. Design and installation of underground water supply and sewerage pipelines made of GRP pipes are regu-

lated by SP 40-104³ and SP 40-105⁴ respectively. Synthesis methods, properties and applications of polyester resins are discussed in detail in [8, 9].

Production of composite pipes with lengths of 6 and 12 m based on reactive oligomers is carried out by the following method:

1. By winding (coiling) the glass roving impregnated with the binder on the metal surface of the mould-forming technological mandrel of the mould with its subsequent curing. Winding provides high quality of the inner surface of the composite pipe due to its formation on the outer surface of the mandrel. To increase density, reduce cost and porosity of composites glass fibre is used in combination with quartz sand.

2. Centrifugal moulding (including prepreg) onto the inner surface of the processing mandrel, which allows to produce pipes with high accuracy of the outer diameter (up to 0.1 mm).

3. Pultrusion (pulling) through the gaps between the outer and inner surfaces of the mandrel. However, it is difficult to realize annular reinforcement of pipes by this pultrusion method and to produce composite pipes of large diameters.

4. Extrusion of a binder filled with chopped glass fibre and silica sand. This method is mainly used when thermoplastic polymers (polyethylene or polypropylene) are used as binders.

New Pipe Technologies (NTT LLC) produces sewer polyester composite pipes and fittings by continuous winding of various types of glass roving filled with silica sand and impregnated with polyester binder. Composite pipes consist of three layers:

1. Inner (liner) layer — protective sealing layer based on chemically resistant polyester resin filled with glass fibre.

³ SP 40-104–2001. Design and installation of underground water supply pipelines made of fiberglass pipes.

⁴ SP 40-105–2001. Design and installation of underground sewer pipelines made of fiberglass pipes.

¹ TU 22.21.21-004-996752342019. Pipes, connecting elements and details of pipelines for sewerage, drainage and drainage made of fiberglass reinforced thermoplastics manufactured using NTT technology.

² STO 99675234.001–2020. Pipes and pipeline parts are culverts “NTT DOR” made of fiberglass reinforced thermoplastics. Technical conditions. 2020; 122.

Table 1. Physical and mechanical properties of glass-reinforced polyester pipe wall material [15]

Name of indicator	Significance
Density, kg/m ³	1,700–1,900
Tensile strength, MPa in circumferential direction axially	150–440 55–85
Circumferential tensile modulus of elasticity, MPa	10,000–29,000
Axial tensile modulus of elasticity, MPa	3,800–5,500
Bending circumferential modulus of elasticity, MPa	3,800–5,500
Coefficient of linear thermal expansion, 1/°C	2.5–10 ^{–5}
Poisson's ratio circle/axis, ν_{hl} Axis/circle, ν_{lh}	0.08–0.10 0.23–0.25
Hardness index of inner and outer surfaces according to Barkol (isophthalic, orthophthalic and vinyl ester resin), not less than	40
Roughness of the inner wall, μm , not more	25
Absolute roughness of the inner surface of the walls, μm , not more	50

2. Structural layer (bearing shell) based on polyester binders filled with glass fibre and quartz sand with particle size less than 1 mm.

3. Outer layer — polyester binders filled with glass fibre. The specified polyester composite pipes are manufactured by NTT LLC in accordance with the requirements of TU 22.21.21-004-99675234–2019¹ and STO 99675234.001–2020² in two variants:

- conventional — for underground installation;
- special — for open (aboveground) laying.

In the second case, various pigments and light stabilizers are additionally added to the binder composition. The main physical and mechanical properties of sewer pipes made of polyester fibreglass are given in Table 1. At manufacture of the specified pipes the ratio of binder/glass fibre is 40/60 wt. %, and the ratio of binder/glass fibre/quartz sand is equal to 34–35/12–66/0–54 wt. %. The curing degree of polyester binder exceeds 98 % [10–15].

Taking into account the wide application of polyester composite pipes in modern construction, it seemed reasonable to evaluate the influence of nominal diameter and initial specific ring stiffness on the value of long-term specific ring stiffness under relaxation and creep, relaxation and creep coefficients, as well as long-term ultimate bending deformation under moisture and aggressive environment.

MATERIALS AND METHODS

As objects of research, we used pipe products of LLC “New Pipe Technologies-Peresvet” — sewer pipes on the basis of glass-reinforced polyester of SK/NPS-K grade, meeting the requirements of TS

22.21.21-004-99675234–2019 [5] with nominal diameter 400, 1,200 and 1,400 mm with nominal stiffness 5,000 N/m². Notation of sewer pipes: DN 400-0.6-5000, DN 1200-0.6-5000, DN 1400-0.6-5000. The wall thickness of the studied pipes ranges from 6.6 to 22.0 mm.

Physical and mechanical characteristics of pipelines made of glass-reinforced polyester were determined in accordance with the requirements of the current GOST:

1. Initial specific ring stiffness according to GOST R 55071–2012 (method B)⁵.

2. Long-term specific ring stiffness at relaxation and calculation of relaxation coefficients at exposure to moisture for 10,000 hours according to GOST R 57008–2016⁶, the load was applied until the design strain reached 0.40 %.

3. Long-term specific creep stiffness and creep coefficients under the influence of moisture during 10,000 hours according to GOST 34643–2020⁷, the load was applied until the design strain reached 0.17 %.

⁵ GOST R 55071–2012. Pipes and parts of pipelines made of glass fibre reinforced reactoplastics Test methods. Determination of initial specific ring stiffness.

⁶ GOST R 57008–2016. Pipes and parts of pipelines made of glass fibre reinforced thermoplastics. Method for determination of long-term specific ring relaxation stiffness and relaxation coefficient when exposed to moisture.

⁷ GOST 34643–2020. Pipes and pipeline parts made of glass fibre reinforced thermoplastics. Method for determination of long-term specific ring creep stiffness and creep coefficient when exposed to moisture or in dry conditions.

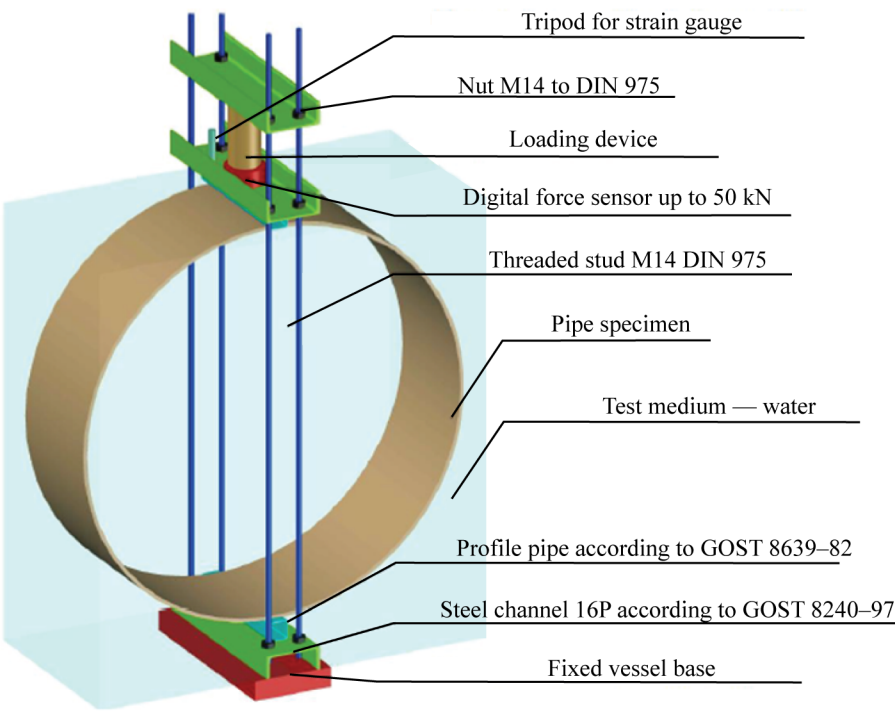


Fig. 1. Schematic diagram of the installation for determination of indicators



Fig. 2. Pipe samples installed in the space of a tray filled with water

4. Long-term limiting bending deformations and long-term limiting relative deformation under the influence of moisture according to GOST 34647–2020⁸.

5. Chemical resistance of the inner surface under loading conditions according to GOST 34644–2020⁹. A solution containing 0.5 mol/l of sulphuric acid was used as a chemical medium.

The method of determination of long-term specific ring stiffness at relaxation and calculation of relaxation coefficients under the action of moisture for 10,000 h (GOST R 57008–2016⁶) consists in loading pipe specimens with a vertical compressive load immersed in water with pH = 6.7, and temperature 23 ± 2 °C. The load was measured at specified time intervals until reaching 10,000 h.

Schematic diagram of the installation and the complete installation for determination of the specified indicators are shown in Fig. 1, 2.

⁸ GOST 34647–2020. Pipes and parts of pipelines made of glass fibre reinforced thermoplastics. Method for determination of long-term ultimate bending deformation and long-term ultimate relative ring deformation under moisture exposure.

⁹ GOST 34644–2020. Pipes and pipeline parts made of glass fibre reinforced reactoplastics. Methods of determination of chemical resistance of inner surface under loading conditions.

The pipe specimen and the loading frame form a closed system of bodies subject to hydrostatic effects that have no influence on the load applied to the specimen. The sewer pipe compression test rig ensures compression of the specimen immersed in water at a constant rate of displacement and measurement of the load with an error of no more than ± 1 % of the measured value.

In order to eliminate the influence of friction on the applied force, through holes with a diameter of 16 mm were pre-drilled in the loading pads to provide the necessary technological gap between the threaded rod and the loading pads.

To measure the load applied to the pipe sample with an error of no more than ± 1 %, a digital compression strain gauge of membrane type TENZO-M M50-C3 with the degree of protection of the shell IP68 — protection during full and prolonged immersion in water to a depth of up to 1 metre was used. The load cell readings were recorded using a portable digital recorder TS-32K, equipped with an interval timer, built-in memory and interface for control from a computer, allowing to collect and transmit data from 20 different channels. The tank filled with water with a pH of 6.7 is a 1.6 m wide, 1.8 m deep and 90 m long deep long-water flume. A Civic B-690 140–400 mm pneumatic Civic B-690 140–400 mm jack was used to achieve the design strain ε_p within 3 minutes of loading the pipe specimen. To measure length, diameter and wall thickness a digital caliper with depth gauge (GOST 166–89), a metal measuring ruler (GOST 427–75) and a metal measuring tape (GOST 7502–98) were used. Before immersing the pipe specimens in water, straight lines were drawn on the outer surface of the pipe circumference at a pitch of 60° to act as reference lines, and the following geometric parameters of the sample were measured:

- length L , m, of each sample along the reference line with an error of ± 1 %;
 - thickness of the specimen wall on each side of the reference lines with an error not exceeding ± 0.2 %;
 - external diameter d_{av} , m, midway between each pair of opposite reference lines with an error of ± 0.5 %.
- Prior to testing, the pipe specimens were conditioned for 96 hours at a temperature of 23 ± 2 °C and relative humidity of 50 ± 10 % [16–20].

Table 2. Standardized indicators for sewer pipes obtained as a result of tests

Indicators	Type of sewer pipe		
	DN 400-0.6-5000	DN 1200-0.6-5000	DN 1400-0.6-5000
Initial specific ring stiffness N/m ²	5,800	5,350	5,750
Relaxation coefficient when exposed to moisture for 10,000 h	0.79	0.92	0.96
Creep coefficient when exposed to moisture for 10,000 h	0.81	0.85	0.81
Long-term ultimate bending deformation at exposure to moisture, %	0.84	0.77	0.75
Long-term ultimate bending deformation under chemical environment, %	0.81	0.65	0.64

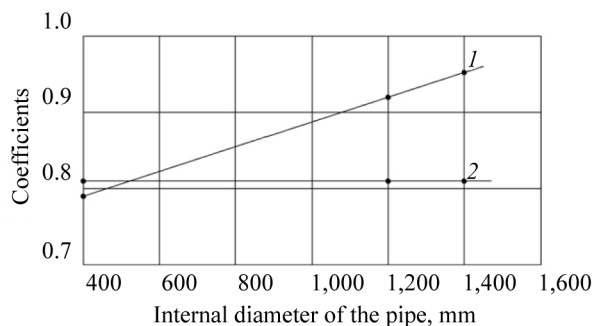


Fig. 3. Dependence of relaxation (1) and creep (2) coefficients on GRP pipe diameter

RESEARCH RESULTS

The main performance characteristics of the investigated sewer pipes of SK/4PS-K grade made of glass-reinforced polyester used in the work are presented in Table 2 and Fig. 3, 4. Data analysis of Table 2, Fig. 3 and 4 showed that at nominal stiffness of 5,000 N/m² increase in diameter of sewer pipes from 400 to 1,400 mm leads to linear increase of relaxation coefficient (from 0.79 to 0.96) and decrease of long-term longitudinal bending deformation under moisture (from 0.84 to 0.75 %) and chemical environment (from 0.81 to 0.64 %) during 10,000 hours. At the same time, the creep coefficient when exposed to moisture is practically independent of the nominal diameter of sewer pipes. Long-term longitudinal bending deformation of pipes in aggressive medium is less than in ordinary water. This is due to different chemical resistance of polyester binders to water and aggressive media.

The data obtained as a result of long-term tests of sewer pipes showed that they can be used for more

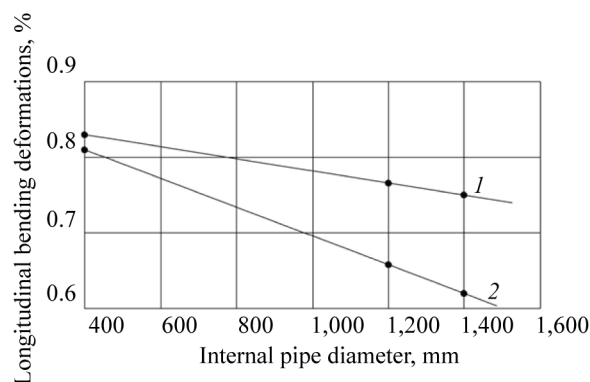


Fig. 4. Dependence of long-term longitudinal bending deformation under the influence of moisture (1) and chemical medium (2) on the GRP pipe diameter

than 50 years, and their performance characteristics meet the requirements of GOST R ISO 10467–2013¹⁰.

CONCLUSION AND DISCUSSION

On the basis of experimental studies it was established that the relaxation and creep coefficient, long-term ultimate bending deformation under the influence of moisture during 10,000 hours are determined by the pipe diameter and its initial specific ring stiffness. As the diameter of sewer pipes increases, the relaxation and creep coefficients increase. At the same time, long-term ultimate bending deformation of sewer pipes with initial specific ring stiffness of 5,000 N/m² when exposed to moisture for 10,000 hours decreases with the growth of their diameter. Calculation of durability of the investigated sewer pipes made of glass-reinforced polyester showed that the service life exceeds 50 years.

¹⁰ GOST R ISO 10467–2013. Pipelines from glass fibre reinforced thermosetting plastics based on unsaturated polyester resins for pressure and non-pressure sewerage and drainage. General technical requirements.

REFERENCES

1. Kushnir S.Ya., Gorkovenko A.I., Gerber A.D., Ignatko V.M. Strength characteristics of fiberglass pipes and loss of pipeline stability. *Oil and Gas Studies*. 2003; 3(39):58-63. EDN TGFXXD. (rus.).
2. Bayburova M.M., Faizrova I.N. Assessment of the strength characteristics of fiberglass pipes in areas of mixed stress state. *Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2011; 17-19. EDN NWEENF. (rus.).
3. Butovka A.N., Stroganov N.V. The research of fiberglass-to-epoxy resin pipes strength characteristics at different operating conditions. *Pipeline Transport: Theory and Practice*. 2017; 6(64):38-40. EDN ZWUGYH. (rus.).
4. Melnikov D.A., Ivanov S.V., Antoshin V.A., Albagachiev A.Y. A study of the stress-strain state of fiberglass pipes for microtunneling under axial compression. *Composites and Nanostructures*. 2022; 14(1):48-59. EDN WESLUL. (rus.).
5. Melnikov D.A., Ivanov S.V., Antoshin V.A. Glass composite pipes and products made from them: a given combination of operational and technological properties. *Best Available Technologies for Water Supply and Sanitation*. 2020; 6:22-23. EDN GYBIOI. (rus.).
6. Bjorkland I. *Plastic pipes, their characteristics and areas of application*. Moscow, NPG Publ., 2000; 116. (rus.).
7. Lopatina A.A., Sazonova S.A. Analysis of pipe-laying technologies. *Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2016; 7(1):93-111. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.12. EDN VPZUXZ. (rus.).

8. Sedov L.N., Mikhailova Z.V. *Unsaturated polyesters*. Moscow, Khimiya Publ., 1977; 231. (rus.).
9. Pot U. *Polyesters and alkyd resins*. Moscow, Paint-Media Publ., 2009; 232. (rus.).
10. Gunyaev G.M. *Structure and properties of polymer fiber composites*. Moscow, Khimiya Publ., 1981; 230. (rus.).
11. Antoshin V.A., Melnikov D.A., Ivanov S.V., Albagachiev A.Yu. Determination of long-term strength properties of glass composite pipes for calculating service life. *Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering : scientific proceedings of the VII International Scientific Conference*. 2021; 31-33. EDN FBBSY. (rus.).
12. Melnikov D.A., Ilichev A.V., Vavilova M.I. Comparison of standards for carrying out mechanical tests of grp compression strength. *Proceedings of VIAM*. 2017; 3(51):6. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-6-6. EDN YGASIX. (rus.).
13. Melnikov D.A., Albagachiev A.Yu., Antoshin V.A., Ivanov S.V. Determination of safety factors for the design of glass composite pipes for microtunneling. *Fundamental research and innovative technologies in mechanical engineering : scientific proceedings of the VII International Scientific Conference*. 2021; 166-168. EDN YPHBMK. (rus.).
14. Tarnopolsky Yu.M., Kintsis T.Ya. *Methods of static testing of reinforced plastics*. Ed. 2nd, revised. Moscow, Khimiya Publ., 1975; 263. (rus.).
15. Malloy R.A. *Design of plastic products for injection molding*. St. Petersburg, Profession Publ., 2006; 30, 81, 82. (rus.).
16. Bobovich B.B. *Non-metallic structural materials*. Moscow, MGIU Publ., 2009; 6,28,55. EDN QNERBN. (rus.).
17. Yagubov E.Z. *Composite fiber pipes in the oil and gas complex*. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2008; 86-87, 103. EDN QNVDGF. (rus.).
18. Mikhailin Yu.A. *Heat-resistant polymers and polymer materials*. St. Petersburg, Profession Publ., 2006; 56-58. EDN QNEHJZ. (rus.).
19. Kulezneva V.K., Guseva V.K. *Polymer processing technologies*. Moscow, Khimiya Publ., 2004; 94, 281, 355. (rus.).
20. Kalinchev V.A. *Technology for the production of solid fuel rocket engines*. Moscow, Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, 2011; 63, 98, 118. (rus.).

Received March 1, 2023.

Adopted in revised form on July 12, 2023.

Approved for publication on July 24, 2023.

B I O N O T E S : **Mikhail G. Kovalev** — Leading Engineer of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; KovalevMG@mgsu.ru;

Vladimir A. Kakusha — Head of the Laboratory for Testing Building Structures, Materials and Products; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; KakushaVA@mgsu.ru;

Oleg A. Kornev — Deputy Director of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; i@okornev.ru;

Denis A. Melnikov — Deputy Director of the Directorate of Engineering and Project Work; **New Pipe Technologies**; 53/4c1 Shchepkina st., Moscow, 129110, Russian Federation; melnikov@ntt.su;

Maxim V. Fedorov — Head of the Laboratory of Natural Tests; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; FedorovMV@mgsu.ru;

Danil V. Zaitsev — Deputy Head of the Laboratory of Natural Tests; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dannil5@mail.ru;

Pavel D. Kapyrin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanization, Automation and Robotization of Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kapyrin@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail G. Kovalev — processing of research results.

Vladimir A. Kakusha — organization and conduct of experimental studies, design of the study facility, processing of study results.

Oleg A. Kornev — project management, tooling design.

Denis A. Melnikov — scientific editing of the text.

Maxim V. Fedorov — tests of building materials and products of natural sizes, development of methods for loading and transferring loads on samples, processing of test results.

Danil V. Zaitsev — organization and conduct of experimental research, design of the research plant, processing of study results.

Pavel D. Kapyrin — processing of research results.

The authors declare that there is no conflict of interest.