

УДК 621.643.02-036.742

**Н. Р. Прокопчук<sup>1</sup>, Л. А. Ленартович<sup>1</sup>, А. Т. Рудковский<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>УП «Мингаз»

## ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ГАЗОВЫХ ТРУБ ПОДЗЕМНОГО ЗАЛЕГАНИЯ

В настоящее время обеспечение потребителей качественными теплоносителями является одной из важнейших задач промышленной безопасности страны. Для бесперебойной поставки горючих газов, а также водных ресурсов используют протяженную сеть трубопроводов, которая должна обеспечивать доставку транспортируемых сред в течение длительного срока. Материалы для изготовления труб прошли модернизацию от первоначально применяемых металлических труб, покрытых изоляционными материалами, до используемых в настоящее время полимерных труб. Металлические трубы обладают высокой механической прочностью, выдерживают повышенное внутреннее давление среды, однако имеют существенный недостаток – подвержены коррозии, которая вызывает повреждение поверхности трубы и со временем может привести к аварийным ситуациям. Полимерные трубы лишены этого недостатка, обладают меньшей плотностью, удобны в монтаже. Современные трубные марки характеризуются высокой кратковременной и длительной прочностью, высокой стойкостью к растрескиванию, высоким модулем упругости, хорошими технологическими свойствами. Такие материалы могут использоваться как для водопроводных, так и для газовых труб, выдерживая рабочее давление газовой среды до 12 атм. Однако полиэтиленовые трубы для газовых трубопроводов стали применяться только с начала 90-х гг. прошлого столетия. При этом многие из них эксплуатируются уже более 35 лет, постоянно испытывая наружное механическое воздействие грунта, внутреннее давление метана, а также воздействие сточных вод различного химического состава. Для своевременного мониторинга состояния газовых труб предлагается использовать неразрушающий метод оценки долговечности, который позволяет исключить необходимость остановки работы газотрубопровода. В статье рассмотрена расширенная методика расчета долговечности, а также приведены конкретные расчеты для полиэтиленовых труб с различным сроком эксплуатации.

**Ключевые слова:** долговечность, полиэтиленовая труба, экспресс-метод, газотрубопровод, срок эксплуатации.

**Для цитирования:** Прокопчук Н. Р., Ленартович Л. А., Рудковский А. Т. Остаточный ресурс работоспособности полиэтиленовых газовых труб подземного залегания // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 72–79. DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-7.

**N. R. Prokopchuk<sup>1</sup>, L. A. Lenartovich<sup>1</sup>, A. T. Rudkovsky<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>UE “Mingaz”

## RESIDUAL SERVICE LIFE OF UNDERGROUND POLYETHYLENE GAS PIPES

Providing consumers with high-quality heat transfer fluids is currently one of the most important industrial safety tasks in the country. Extensive pipeline networks are used to ensure the uninterrupted supply of flammable gases and water resources. These pipelines must ensure the long-term delivery of the transported media. Pipe materials have evolved from the original metal pipes coated with insulating materials to the polymer pipes currently used. Metal pipes offer high mechanical strength and can withstand high internal pressures. However, metal pipes have a significant drawback: they are susceptible to corrosion. Corrosion processes damage the pipe surface and can lead to emergency situations. Polymer pipes eliminate this drawback, have a lower density, and are easy to install. Modern pipe grades are characterized by high short-term and long-term strength, high crack resistance, a high modulus of elasticity, and good process properties. These materials can be used for both water and gas pipes, withstanding operating pressures of up to 12 atm. However, polyethylene pipes for gas pipelines only began to be used in the early 1990s.

Many of these pipes have been in service for over 35 years. These pipes are constantly exposed to external mechanical stress from soil, internal methane pressure, and wastewater of varying chemical compositions. A non-destructive durability assessment method is proposed for timely monitoring of gas pipelines. This method eliminates the need to shut down the gas pipeline. This article presents a generalized durability calculation method and provides specific calculations for polyethylene pipes with varying service life.

**Keywords:** durability, polyethylene pipe, express method, gas pipeline, service life.

**For citation:** Prokopchuk N. R., Lenartovich L. A., Rudkovsky A. T. Residual service life of underground polyethylene gas pipes. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 72–79 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-7.

**Введение.** Исследования в области обеспечения безопасности полимерных трубопроводов, их устойчивости к воздействию химических реагентов, топлив, масел, газовой среды, повышенной температуры являются в настоящее время весьма актуальными [1–9]. В Республике Беларусь не существует независимой оценки долговечности полиэтиленовых газопроводных труб, в отличие от труб систем водоснабжения и канализации (СТБ 1333.0-2002 [10] и СТБ 1333.2-2002 [11]). В Российской Федерации срок эксплуатации газопроводов определяется при их проектировании и установлен не менее 50 лет (ГОСТ Р 50838–2009 [12]).

В нашей стране контроль качества труб, поступающих от заводов-изготовителей, осуществляется только по соответствию диаметра и толщины труб согласно сопроводительной документации и отсутствию их овальности, механических дефектов на поверхности труб. Вместе с тем качество полиэтиленов, их марка не устанавливаются. Полимерный материал может сильно отличаться (сильно влиять на долговечность труб при их эксплуатации) по молекулярной массе и молекулярно-массовому распределению, по количеству используемого вторичного сырья при экструзии труб и др. Кроме того, подземные газопроводы монтируются из полиэтиленовых труб с начала 90-х гг. XX в., т. е. более 35 лет (взамен стальных с битумным антикоррозионным покрытием, эксплуатируемых с начала 60-х гг.). За время эксплуатации полиэтиленовые трубы существенно состарились, а насколько, неизвестно. Во время старения полиэтилен теряет свою молекулярную массу и пластичность. В трубах появляются микротрещины, которые могут перерасти в трещины за неопределенное время. Трубы теряют свою герметичность, газ выходит из газопровода. Это может привести к экономическим затратам, экологическим последствиям и даже аварийным ситуациям. Поэтому правильная и своевременная оценка долговечности (остаточного ресурса работоспособности) весьма актуальна.

**Основная часть.** Существует хорошо зарекомендовавший себя за два десятилетия экспресс-метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деградации полимерных материалов [10, 11]. Метод определения долговечности полимерных материалов основан на взаимосвязи между долговечностью и значением энергии активации, определяемой качеством материала и уменьшающейся под воздействием эксплуатационных факторов. Ранее, например, при оценке долговечности полимерных труб для инженерно-технических систем определялось значение  $E_d$  на материалах из новых, не бывших в эксплуатации труб. Эксплуатационные факторы (температура и давление перемещаемой среды) были жестко зафиксированы соответствующими нормативными документами. Это позволяло оценивать снижение параметра  $E_d$  эксплуатационными факторами на величину  $\Delta E_{\text{экс.ф.}}$ . В уравнении долговечности использовалась величина  $\Delta E_{\text{расч}} = E_d - \Delta E_{\text{экс.ф.}}$ . В результате расчетов получались реальные значения долговечности, подтверждаемые на практике.

Однако при использовании полиэтиленовых газовых труб подземного залегания возникает ряд важных эксплуатационных факторов, влияние которых должно быть учтено. Температура на поверхности трубы может отличаться в различных местах пролегания газотрубопровода и зависит от района, глубины залегания и погодных-климатических особенностей местности. Очевидно, что температура газа внутри полиэтиленовых труб в течение десятков лет в разных районах Республики Беларусь также не может быть постоянной. Механические напряжения, зависящие от глубины залегания труб, их диаметра и плотности

грунта, также разные, трудно учитываемые. Еще необходимо принимать во внимание воздействие на полимерные трубы грунтовых вод, которые могут иметь различные рН, содержание солей, примесей и т. п.

Целью данной работы является оценка долговечности (остаточного ресурса работоспособности) образцов полиэтиленовых труб с различным сроком их эксплуатации в различных районах нашей страны. Объектами исследования выступали полиэтиленовые трубы, введенные в эксплуатацию в 1993, 1999, 2007, 2011, 2017 и 2019 гг., и труба, не бывшая в эксплуатации.

Долговечность материалов труб оценивали экспресс-методом, разработанным ранее [9, 11] для полимерных систем водоснабжения и отопления.

Значение энергии активации термоокислительной деструкции  $E_d$  материалов труб рассчитывали методом Бройдо по данным динамической термогравиметрии (СТБ 1333.0-2002, Приложение В). Термический анализ выполняли на приборе фирмы Mettler Toledo (Швейцария) модуль TGA/DSC 1HT/1600 31 9 DTA. Интервал температур 20–500°C. Среда – воздух. Скорость линейного подъема температуры 5 град/мин. Масса навески образцов 15 мг.

Уравнение долговечности для ПЭВП (марка полиэтилена установлена по температуре плавления), согласно СТБ 1333.2-2002, имеет вид ( $\tau_{T_3}$ , лет):

$$\tau_{T_3} = \frac{10^{-0,1167 \cdot E_{\text{расч}} - 0,936} \cdot e^{E_{\text{расч}}/R \cdot T}}{365}, \quad (1)$$

где  $T_3$  – температура эксплуатации изделия, °C;  $E_{\text{расч}}$  – расчетная энергия активации, определяющая долговечность, кДж/моль.

$E_{\text{расч}}$  будет ниже  $E_d$  за счет действия на изделие эксплуатационных факторов  $\Delta E_{\text{экс.ф}}$ :  $E_{\text{расч}} = E_d - \Delta E_{\text{экс.ф}}$ .

Эксплуатационными факторами, действующими на полимерные трубы в системах подземного газоснабжения, являются: температура (определяемая температурой грунта снаружи и температурой метана внутри); механические напряжения в стенке трубы (зависят от давления газа в трубе, давления массы грунта высотой 1,6 м, давления массы самой трубы); агрессивные среды (газ внутри трубы и солевые водные растворы снаружи трубы); действие жидкой среды (эффект Ребиндера, СТБ 1333.2-2002).

Механические напряжения в стенке трубы, вызванные давлением газа, рассчитываются по формуле Кесселя:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{P_n \cdot (d_n - \delta_{\text{ст}})}{2 \cdot \delta_{\text{ст}}} \cdot K_3, \quad (2)$$

где  $P_n$  – номинальное давление в трубе, МПа;  $d_n$  – наружный диаметр трубы, мм;  $\delta_{\text{ст}}$  – толщина стенки трубы, мм;  $K_3$  – коэффициент запаса прочности материала трубы.

Согласно ГОСТ Р 50838–2009, допустимое давление в трубах из полиэтилена для эксплуатации при температуре 20°C и сроке службы 50 лет (максимальное рабочее давление МОР) может быть 0,3 или 0,4 МПа. Допуская максимально жесткие условия, полагаем в дальнейших расчетах  $P_n = 0,4$  МПа. Коэффициент запаса прочности  $K_3$  принимается по табл. 1.5 [13] в зависимости от значения  $SDR = d_n / \delta_{\text{ст}}$  и составляет от 3 до 5.

Понижение параметра  $E_d$  механическим напряжением в стенке на величину  $\Delta E_{\text{мех}}$  определяется по формуле:  $\Delta E_{\text{мех}} = \sigma_{\text{ст}} \cdot \gamma$ , где  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент, равный 1,6 кДж/(моль · МПа) согласно СТБ 1333.2-2002 для ПЭВП.

Для трубы диаметром 63 мм и с толщиной стенки 6 мм:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{0,4 \cdot (63 - 6)}{2 \cdot 6} \cdot 5 = 10 \text{ МПа}. \quad (3)$$

Тогда  $\Delta E_{\text{мех}1} = 1,6 \cdot 10 = 16$  кДж/моль.

Давление массы грунта высотой 1,6 м при средней плотности грунта  $2,8 \text{ г/см}^3$  не достигает 1,8 МПа, а значение  $\Delta E_{\text{мех}2} = 1,6 \cdot 1,8 = 2,88 \sim 3,0$  кДж/моль.

Давление массы трубы по линии касания ее в траншее ( $\Delta E_{\text{мех}3}$ ) не превышает 1 кДж/моль.

Суммарное механическое воздействие составляет  $\Delta E_{\text{сум}} = \Delta E_{\text{мех}1} + \Delta E_{\text{мех}2} + \Delta E_{\text{мех}3} = 16 + 3 + 1 = 20$  кДж/моль.

ПЭВП устойчив к действию воды и растворам солей, особенно при температурах ниже  $20^\circ\text{C}$ , его оценка в баллах самая высокая – 5. Действие агрессивной среды усиливается в механически напряженных полимерных материалах. Среда расклинивает микротрещины или микродефекты на поверхности материала, ускоряет его деструкцию [14]. ПЭВП считается стойким к природному газу, содержащему 90% метана [15]. Поэтому газообразный метан может подвергать стенку ПЭВП трубы эрозии, диффундируя на небольшую долю ее толщины. Хотя ПЭВП – химически стойкий полимер, за долгие годы эксплуатации трубы значение  $\Delta E_{\text{хим.газ}}$  может достичь значительной величины (около 20 кДж/моль). Солевые водные растворы, действуя на трубу снаружи, также постепенно разрушают ее стенки, однако процесс протекает замедленно при температуре  $+10^\circ\text{C}$ , и даже за долгие годы эксплуатации трубы значение  $\Delta E_{\text{хим.вода}}$ , вероятно, не превысит 9 кДж/моль. Суммарное действие агрессивных сред на ПЭВП не достигнет 29 кДж/моль и равно  $\Delta E_{\text{хим.сум}} = \Delta E_{\text{хим.газ}} + \Delta E_{\text{хим.вода}}$ .

Значение  $\Delta E_{\text{м.вз(сум)}}$  складывается из уменьшения значения параметра  $E_{\text{д}}$  при постоянном воздействии на материал воды (эффект Ребиндера)  $\Delta E_{\text{м.вз(вода)}}$  и газа  $\Delta E_{\text{м.вз(газ)}}$ , тогда  $\Delta E_{\text{м.вз(сум)}} = 3 + 7 = 10$  кДж/моль в соответствии с СТБ 1333.2-2002.

Максимальное воздействие эксплуатационных факторов, действующих вначале эксплуатации труб, будет составлять:  $20 + 29 + 10 = 59$  кДж/моль. С увеличением времени эксплуатации труб (старения ПЭВП) величина  $\Delta E_{\text{экс.ф}}$  будет медленно снижаться.

Пример расчета долговечности трубы, введенной в эксплуатацию 19.08.1999, при температуре  $+10^\circ\text{C}$  (установлена УП «Мингаз»), если известны  $E_{\text{д}} = 136$  кДж/моль,  $\Delta E_{\text{экс.ф}} = 57$  кДж/моль, приведен ниже:

$$E_{\text{расч}} = E_{\text{д}} - \Delta E_{\text{экс.ф}} = 136 - 57 = 79 \text{ кДж/моль}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tau_{10^\circ\text{C}} &= \frac{10^{-0,1167 \cdot 79 - 0,936} \cdot e^{79/2,352}}{365} = \\ &= \frac{10^{-10,16} \cdot 3,9 \cdot 10^{14}}{365} = 74 \text{ года}. \end{aligned} \quad (5)$$

Результаты расчетов для 7 образцов труб сведены в таблицу.

#### Зависимость долговечности труб от сроков их эксплуатации

Дата ввода в эксплуатацию	Срок эксплуатации, лет	$E_{\text{д}}$ , кДж/моль	$\Delta E_{\text{экс.ф}}$ , кДж/моль	$E_{\text{расч}}$ , кДж/моль	$\tau_{10^\circ\text{C}}$ , лет
08.12.1993	30	134	56	78	63
19.08.1999	24	136	57	79	74
30.12.2007	16	137	58	79	74
04.03.2011	12	138	58	80	87
29.12.2017	6	140	59	81	100
19.09.2019	4	140	59	81	100
Новая труба	0	141	59	82	117

Анализ данных таблицы показывает, что наблюдается хорошее соответствие между долговечностью  $\tau_{10^\circ\text{C}}$  и реальным сроком эксплуатации труб. Сумма времен (долговечность  $\tau_{10^\circ\text{C}}$

плюс время эксплуатации труб) колеблется около значения 100 лет, т. е. долговечность исходных, не бывших в эксплуатации труб в среднем составляет 100 лет. Колебания этой суммы времен примерно на 10% связаны, вероятно, с разным качеством труб ПЭ-80 и ПЭ-100, выпускаемых разными заводами-производителями.

В дальнейшем исследования были направлены на сравнение результатов долговечности для полиэтиленовой трубы, которая эксплуатировалась с 1989 г., и той же трубы, не подверженной эксплуатации. Нами было установлено, что температура плавления материала исходной трубы, не подверженной воздействию эксплуатационных факторов, составляет 127°C. Это значение температуры плавления указывает на то, что материал трубы является полиэтиленом высокой плотности (ПЭ-100 или ПЭ-80). Материал трубы, бывшей в эксплуатации, плавится при более высоких температурах: 131°C (наружная часть) и 134°C (внутренняя часть). Рост температуры плавления частично состаренной трубы может быть обусловлен редкой межцепной сшивкой макромолекул аморфной фазы полиэтилена (за счет рекомбинации образовавшихся макрорадикалов при термоокислительной деструкции макромолекул). Эти межмолекулярные связи «укрепляют» части макромолекул, входящих в кристаллы, так как размеры макромолекул много больше размеров кристаллитов, и макромолекулы проходят из одного кристалла в другой через аморфную фазу (проходные макромолекулы). В результате для разрушения межмолекулярных связей в кристаллах (их плавления) требуется большая тепловая энергия, и температура плавления ПЭВП возрастает.

Установленный рост температуры частично состаренного ПЭВП коррелирует со снижением показателя текучести расплава (ПТР): 0,43 (труба исходная), 0,40 (наружная часть бывшей в эксплуатации трубы), 0,37 (внутренняя часть бывшей в эксплуатации трубы), что также можно объяснить образованием редких межцепных связей в макромолекулах, образованных из-за частичной деструкции аморфной части полимера.

Полученные значения долговечности для исходной трубы составляют 99 лет, для внутренней поверхности эксплуатируемой трубы – 58 лет и для внешней поверхности эксплуатируемой трубы – 78 лет. Долговечность внутренних слоев полимерной трубы, бывшей в эксплуатации, меньше, чем наружных, что обусловлено более агрессивным действием метана по сравнению с водой, действующей снаружи на трубу. Анализ полученных значений показывает, что наблюдается хорошее соответствие между долговечностью  $t_{10^{\circ}\text{C}}$  и реальным сроком эксплуатации труб.

**Заключение.** Таким образом, предложенный метод оценки долговечности полимерных труб может быть использован для расчета долговечности газотрубопроводов подземного залегания. Представляет интерес проведение дальнейших исследований для изучения остаточного ресурса работоспособности полимерных труб, эксплуатируемых в различных регионах Республики Беларусь. Для корректировки методики расчета, учитывающей особенности эксплуатации полимерных труб, необходимо провести комплексные определения на большом массиве образцов, отличающихся не только сроком ввода в эксплуатацию, но и климатическими особенностями местности залегания (тип почвы, pH почвы, состав грунтовых вод, температура в течение года), уровнем залегания трубы в почве, давлением метана в трубе. Данные исследования являются целью последующих работ.

### Список литературы

1. Clinton M., Rowe R. K. Long-term durability of two HDPE geomembranes formulated with polyethylene of raised temperature resistance (PE-RT) // *Geotextiles and Geomembranes*. 2023. Vol. 52, issue 3. P. 304–318. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2023.11.003.
2. Ageing study of different types of long-term pressure tested PE pipes by IR-microscopy / M. Raquel [et al.] // *Polymer*. 2015. Vol. 61. P. 131–139. DOI: 10.1016/j.polymer.2015.01.06.

3. Świetlik J., Magnucka M. Aging of drinking water transmission pipes during long-term operation as a potential source of nano- and microplastics // *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2024. Vol. 263. P. 114467. DOI: 10.1016/j.ijheh.2024.114467.
4. A new experimental approach to chemical ageing in materials and piping for drinking water infrastructure exposed to chlorine dioxide / M. Sgroi [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. 2025. Vol. 500. P. 140437. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140437.
5. Investigating the time- and spacedependent mechanical, physical and chemical properties of aged polyethylene gas pipes using nanoindentation tests / Sixi Zha [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 24. P. 3383–3398. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.04.004.
6. Characteristics of environmental stress cracking of PE-HD induced by biodiesel and diesel fuels / M. Schilling [et al.] // *Polymer Testing*. 2024. Vol. 138. P. 108547. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2024.108547.
7. A comprehensive review of influential factors and predictive techniques of time to failure for sewer pipes / J. Yang [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024. Vol. 157. P. 106357. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106357.
8. Sixi Zha, Hui-Qing Lan, Hui Huang. Review on lifetime predictions of polyethylene pipes: Limitations and trends // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2022. Vol. 198. P. 104663. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104663.
9. Dongjin Du, Pranav Karve, Sankaran Mahadevan. Calibration, validation, and selection of hydrostatic testing-based remaining useful life prediction models for polyethylene pipes // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2024. Vol. 207. P. 105108. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.105108.
10. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов: СТБ 1333.0-2002. Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2003. 16 с.
11. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности труб полимерных для инженерно-технических систем: СТБ 1333.2-2002. Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2003. 16 с.
12. Трубы из полиэтилена для газопроводов. Технические условия: ГОСТ Р 50838–2009. М.: Стандартинформ, 2012. 60 с.
13. Проектирование и монтаж трубопроводов из полиэтилена. Инструкция. URL: <https://vesco59.ru/upload/iblock/e3b/e3b81b7cb83293e16b558a0bd7eb5da3.pdf?ysclid=mkpl6wxcdr757456214> (дата обращения: 10.01.2026).
14. Воробьева Г. Я. Химическая стойкость полимерных материалов. М.: Химия, 1981. 296 с.
15. Химическая стойкость полимеров. URL: [http://agrigaz.ru/useruploads/files/chemical\\_resistance\\_of\\_polymers.pdf](http://agrigaz.ru/useruploads/files/chemical_resistance_of_polymers.pdf) (дата обращения: 12.01.2026).

## References

1. Clinton M., Rowe R. K. Long-term durability of two HDPE geomembranes formulated with polyethylene of raised temperature resistance (PE-RT). *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, vol. 52, issue 3, pp. 304–318. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2023.11.003.
2. Raquel M., Rode K., Schuster T., Geertz G., Malz F., Sanoria A., Oehler H., Brüll R., Wenzel M., Engelsing K., Bastian M., Brendlé E. Ageing study of different types of long-term pressure tested PE pipes by IR-microscopy. *Polymer*, 2015, vol. 61, p. 131–139. DOI: 10.1016/j.polymer.2015.01.06.
3. Świetlik J., Magnucka M. Aging of drinking water transmission pipes during long-term operation as a potential source of nano- and microplastics. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2024, vol. 263, p. 114467. DOI: 10.1016/j.ijheh.2024.114467.

4. Sgroi M., Lancioni N., Parlapiano M., Giorgi L., Fusi V., Mattioli M., Darvini G., Soldini L., Eusebi A. L., Fatone F. A new experimental approach to chemical ageing in materials and piping for drinking water infrastructure exposed to chlorine dioxide. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, vol. 500, p. 140437. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140437.
5. Sixi Zha, Hui-Qing Lan, Nan Lin, Yueming Liu, Tao Meng. Investigating the time- and space-dependent mechanical, physical and chemical properties of aged polyethylene gas pipes using nanoindentation tests. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 24, p. 3383–3398. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.04.004.
6. Schilling M., Marschall N., Niebergall U., Wachtendorf V., Böhning M. Characteristics of environmental stress cracking of PE-HD induced by biodiesel and diesel fuels. *Polymer Testing*, 2024, vol. 138, p. 108547. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2024.108547.
7. Yang J., Zayed T., Arimiyaw D., Xiao R. A comprehensive review of influential factors and predictive techniques of time to failure for sewer pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, vol. 157, p. 106357. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106357.
8. Sixi Zha, Hui-Qing Lan, Hui Huang. Review on lifetime predictions of polyethylene pipes: Limitations and trends. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, vol. 198, p. 104663. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104663.
9. Dongjin Du, Pranav Karve, Sankaran Mahadevan. Calibration, validation, and selection of hydrostatic testing-based remaining useful life prediction models for polyethylene pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2024, vol. 207, p. 105108. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2023.105108.
10. STB 1333.0-2002. Polymer products for construction. Method for determining durability based on the activation energy of thermo-oxidative destruction of polymer materials. Minsk, Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' Publ., 2003. 16 p. (In Russian).
11. STB 1333.2-2002. Polymer products for construction. Method for determining the durability of polymer pipes for engineering systems. Minsk, Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' Publ., 2003. 16 p. (In Russian).
12. GOST R 50838–2009. Polyethylene pipes for gas pipelines. Technical conditions. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 60 p. (In Russian).
13. Design and installation of polyethylene pipelines. Instructions. Available at: [https://vesco59.ru/upload/iblock/e3b/e3b81b7cb83293e16b558a0bd7eb5da3.pdf?ysclid=mkpl6wxcdr\\_757456214](https://vesco59.ru/upload/iblock/e3b/e3b81b7cb83293e16b558a0bd7eb5da3.pdf?ysclid=mkpl6wxcdr_757456214) (accessed 10.01.2026) (In Russian).
14. Vorob'eva G. Ya. *Khimicheskaya stoykost' polimernykh materialov* [Chemical resistance of polymer materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 296 p. (In Russian).
15. Chemical resistance of polymers. Available at: [http://agriganz.ru/useruploads/files/chemical\\_resistance\\_of\\_polymers.pdf](http://agriganz.ru/useruploads/files/chemical_resistance_of_polymers.pdf) (accessed 12.01.2026) (In Russian).

### Информация об авторах

**Прокопчук Николай Романович** – член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@gmail.com. SPIN-код: 3126-7297. Scopus ID: 7005521371. ORCID: 0000-0001-7290-1199. ResearcherID: ABA-5557-2020.

**Ленартович Лилия Алексеевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lenartovich@belstu.by. SPIN-код: 7184-4473. Scopus ID: 57203741487. ORCID: 0000-0001-7876-9184. ResearcherID: H-5796-2016.

**Рудковский Александр Тадеушевич** – начальник службы неразрушающего контроля измерений и технической диагностики. УП «Мингаз» (ул. Ботаническая, 11/1, 220037, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: snk@mingas.by.

**Information about the authors**

**Prokopchuk Nikolay Romanovich** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Honored Scientist of the Republic of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@gmail.com. SPIN code: 3126-7297. Scopus ID: 7005521371. ORCID: 0000-0001-7290-1199. ResearcherID: ABA-5557-2020.

**Lenartovich Liliya Alekseevna** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lenartovich@belstu.by. SPIN code: 7184-4473. Scopus ID: 57203741487. ORCID: 0000-0001-7876-9184. ResearcherID: H-5796-2016.

**Rudkovsky Aleksandr Tadeushevich** – Head of the Non-Destructive Measurement and Technical Diagnostics Service. UE “Mingaz” (11/1 Botanicheskaya str., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: snk@mingas.by.

*Поступила 22.01.2026*