

Научная статья

УДК 678

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31304>



Д.В. Нечаев ✉, *Б.С. Ермаков*, *О.В. Швецов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ nechaev_dv@spbstu.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ СВАЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ТРУБЫ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Аннотация. В настоящей работе было рассмотрено комплексное влияние ультрафиолета (УФ), температуры и влажности на механические свойства стекло- и базальтопластиковых труб, изготовленных по технологии мокрой косослойной и перекрестной намотки соответственно. Показано, что УФ является одним из ключевых факторов, приводящих к деградации структуры полимерно-композитных материалов (ПКМ) и, как следствие, влияющих на их работоспособность в условиях Крайнего Севера в летний период. Причиной изменения механических свойств ПКМ под действием УФ-излучения, температуры и влаги является обширная эрозия, приводящая к микрорастрескиванию матрицы ПКМ с последующим образованием объемных дефектов. Установлено, что стекло- и базальтопластик имеют одинаковую стойкость к летним условиям арктического и субарктического климата, однако образцы из стеклопластика более склонны к процессу водопоглощения. Полученные регрессионные уравнения позволяют с высокой точностью прогнозировать реальный срок эксплуатации верхней части ПКМ-свай в природных условиях Арктики.

Ключевые слова: ПКМ, УФ-излучение, деградация материала, ресурс материала, климатические испытания, прогнозная модель, климатические факторы старения.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).

Для цитирования:

Нечаев Д.В., Ермаков Б.С., Швецов О.В. Разработка метода прогнозирования реального срока эксплуатации надземной части свайной полимерной композитной трубы в летний период в условиях Крайнего Севера // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 60–73. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31304>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31304>*D.V. Nechaev* ✉, *B.S. Ermakov*, *O.V. Shvetsov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ nechaev_dv@spbstu.ru

DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE METHOD FOR ACTUAL SERVICE LIFE ESTIMATION OF THE ABOVE-GROUND PART OF A PILE POLYMER COMPOSITE PIPE IN THE SUMMER PERIOD IN EXTREME NORTHERN CONDITIONS

Abstract. In this paper, the complex effect of ultraviolet (UV) radiation, temperature and humidity on the mechanical properties of glass and basalt-plastic pipes manufactured using wet cross-layer and cross-winding technologies, respectively, was considered. It was shown that UV radiation is one of the key factors leading to degradation of the structure of polymer-composite materials (PCM) and, as a consequence, affecting their performance in extreme Northern conditions in summer period. The reason for the change in the mechanical properties of PCM under the influence of UV radiation, temperature and humidity is extensive erosion, leading to microcracking of the PCM matrix with the subsequent formation of volumetric defects. It was found that glass and basalt-plastic have the same resistance to summer conditions of the Arctic and Subarctic climates, but fiberglass samples are more prone to water absorption. The obtained regression equations make it possible to accurately predict the actual service life of the upper part of the PCM pile in natural Arctic conditions.

Keywords: PCM, UV radiation, material degradation, material resource, climatic tests, predictive model, climatic factors of aging.

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Development of models for the degradation of service properties of metal and composite materials for construction in permafrost conditions” (FSEG-2024-0009).

Citation:

Nechaev D.V., Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Development of a predictive method for actual service life estimation of the above-ground part of a pile polymer composite pipe in the summer period in extreme Northern conditions, *Global Energy*, 31 (03) (2025) 60–73, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31304>

Введение. Освоение новых нефтегазовых месторождений в отдаленных районах с особо суровыми климатическими условиями и залеганием вечной мерзлоты актуализирует проблемы по снижению капитальных затрат на этапе строительства нефтегазовой инфраструктуры [1]. Одним из способов сокращения затрат на обустройство месторождения является разработка новых решений в области фундаментостроения [2] как самого материалоемкого элемента нефтегазовой инфраструктуры [3].

Традиционным решением при проектировании и строительстве свайных фундаментов в условиях Арктики являются сваи, изготовленные из стальных труб, сваренных токами высокой частоты или под слоем флюса [4]. Однако их применение приводит к повышению капитальных затрат из-за осложненной и дорогостоящей доставки на объекты, расположенные в арктических и субарктических регионах [5]. Кроме того, суровые условия эксплуатации, связанные с особенностями мерзлых грунтов [6], низкими отрицательными температурами [7] и частыми переходами температур через 0°C [8, 9], могут привести к преждевременному выходу свайного фундамента из строя и, как следствие, к дополнительным операционным затратам [10].

Одним из способов снижения затрат и повышения надежности при обустройстве свайного фундамента является применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в качестве свайных труб, в частности из стекло- и базальтопластика [11]. Данные материалы обладают хорошим соотношением «цена–качество» и низкой плотностью, что делает их пригодными для массового применения в капитальном строительстве и снижает логистические затраты нефтегазовых компаний [12]. Однако активному внедрению свай из ПКМ препятствует отсутствие понимания деградации их структуры и изменения механических свойств под влиянием климатических факторов Крайнего Севера, вследствие чего данных для создания методик по определению реального срока их эксплуатации недостаточно [13].

Среди разнообразных климатических факторов Арктической зоны, оказывающих влияние на структуру и свойства полимерных ПКМ, важное значение, особенно в летний период, имеет комплексное воздействие солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения, положительной температуры и относительно высокой влажности, что приводит к деградации поверхности этих материалов и снижению механических свойств [14–20]. Причиной такой ускоренной деструкции ПКМ может являться нарушение целостности поверхностного слоя под действием УФ, ведущее к деградации структуры ПКМ и появлению микротрещин за счет разрыва молекулярных цепей с последующим проникновением влаги [21]. Проникновение влаги увеличивает пластификацию, которая, в свою очередь, повышает молекулярную подвижность, что приводит к диффузии кислорода и запуску фотоокислительного процесса [21]. При этом накопленная влага в ПКМ при последующем замерзании и увеличении объема инициирует возникновение внутренних напряжений и появление новых дефектов.

Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению влияния УФ-излучения на структуру и свойства ПКМ, в них отсутствует комплексная оценка механизмов деградации ПКМ и скорость их протекания. Без такой оценки невозможно достоверно определить ресурс материала и обеспечить его надежность. Поэтому целью настоящей работы являлась качественная и количественная оценка деградации свайных труб, изготовленных из ПКМ, под воздействием УФ-излучения, повышенной температуры и влажности с последующей разработкой расчетной методики прогнозирования их ресурса.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведение климатических испытаний опытных образцов ПКМ.
2. Оценка влияния длительного воздействия УФ-излучения, повышенной температуры и влажности на механические свойства опытных образцов ПКМ.
3. Определение механизма деструкции опытных образцов ПКМ под воздействием УФ-излучения, повышенной температуры и влажности.
4. Разработка прогнозной модели поведения ПКМ в летний период в условиях Крайнего Севера.

Материал и методы исследования

Материалом исследования являлись трубы из стекло- и базальтопластика диаметром 204 и 219 мм. Труба из стеклопластика изготавливалась методом мокрой косослойной намотки, а труба из базальтопластика – методом мокрой перекрестной намотки. Образцы для проведения исследования вырезались с применением станка с ЧПУ. Кондиционирование образцов осуществлялось согласно ГОСТ 12423–2013. Климатические испытания проводились в климатической камере СМ-70/100-1000 ТВХ согласно ГОСТ 9.708–83 по методу 2. Воздействие УФ-излучением осуществлялось только на одну сторону образцов с использованием ламп UVA 340.

Испытательная среда обладала следующими параметрами: воздушная атмосфера – с нормальным давлением, величина солнечной радиации составляла 86 МДж/м² в сутки, влажность и температура составляли 90% и 45°С соответственно.

Испытания на растяжение проводились по ГОСТ Р 54924–2017 с использованием испытательной машины Zwick/Roell Z100 после экспонирования в испытательной среде на протяжении 24, 48, 96, 168, 1440 часов, а для базальтопластика – дополнительно в течение 4320 часов.

Оценка деградации осуществлялась путем расчета соотношения значения соответствующих механических свойств (k_{σ} , k_E , k_{δ}), определенных испытанием на растяжении после экспонирования в испытательной среде и в исходном состоянии.

Исследование деградации макро- и микроструктуры проводилось в продольном и поперечном направлении с использованием стереомикроскопа Meiji Techno RZ7 и оптического микроскопа Reichert-Jung MeAF-3A соответственно.

Испытания на водопоглощение проводились согласно ГОСТ 4650–2014.

Регрессионный анализ полученных зависимостей проводили с применением ПО Excel.

Среднюю величину суммарной солнечной радиации в год на вертикальную поверхность при действительных условиях облачности брали согласно ТСН 23-334-2002 Ямало-Ненецкого АО для городов Надыма, Нового Уренгоя и Ноябрьска. За критерий выхода из строя рассматриваемого ПКМ брали величину падения предела прочности на 10%.

Результаты

Механические свойства образцов-свидетелей, не подвергавшихся экспонированию в испытательной среде, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства образцов-свидетелей из стекло- и базальтопластика

Table 1

Mechanical properties of glass and basalt-reinforced plastic witness samples

Материал	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Относительное удлинение, %
Стеклопластик	159±4,4	20	1,3±0,1
Базальтопластик	218,9±3,8	19,4±0,2	1,5±0,1

Из табл. 1 следует, что опытные образцы имеют схожие упругие и пластические свойства, однако предел прочности у стеклопластика ниже примерно на 35% по сравнению с базальтопластиком. Характерный внешний вид образцов после завершения каждого этапа выдержки в испытательной среде приведен на рис. 1.

Характерный вид опытных образцов после завершения каждого этапа экспонирования и проведения испытания на растяжение приведен на рис. 2.

Обобщенные результаты изменения свойств стекло- и базальтопластика после выдержки в испытательной среде на протяжении 1440 часов приведены в табл. 2.

Определено, что скорость деградации не зависит от типа материала. Результаты по оценке на водопоглощения образцов после экспонирования в испытательной среде на протяжении 1440 часов приведены в табл. 3.

Скорость изменения механических свойств образцов базальтопластика в испытательной среде приведена на рис. 3.



Рис. 1. Характерный внешний вид образцов из базальто- (а–б) и стеклопластика (в–г) по завершению каждого этапа выдержки в испытательной среде; вид сверху (а, в); вид с боку (б, г)

Fig. 1. Typical appearance of basalt-plastic (a–b) and fiberglass (c–d) samples upon completion of each stage of exposure in the test environment; top view (a, c); side view (b, d)

Таблица 2

**Обобщенные изменения свойств стекло- и базальтопластика
после выдержки в испытательной среде на протяжении 1440 часов**

Table 2

**Generalized changes in the properties of glass and basalt-plastic
after exposure to the test environment for 1440 hours**

Материал	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Относительное удлинение, %
Стеклопластик	$153 \pm 1,55$ ($k_{\sigma} = 0,96$)	20 ($k_E = 1$)	$1,3 \pm 0,08$ ($k_{\delta} = 1$)
Базальтопластик	$210,2 \pm 1,55$ ($k_{\sigma} = 0,96$)	$20 \pm 0,7$ ($k_E = 1$)	$1,4 \pm 0,05$ ($k_{\delta} = 0,93$)

Таблица 3

Водопоглощение образцов в течение 1440 часов

Table 3

Water absorption of samples for 1440 hours

Материал	Водопоглощение, %
Стеклопластик	0,33
Базальтопластик	0,24

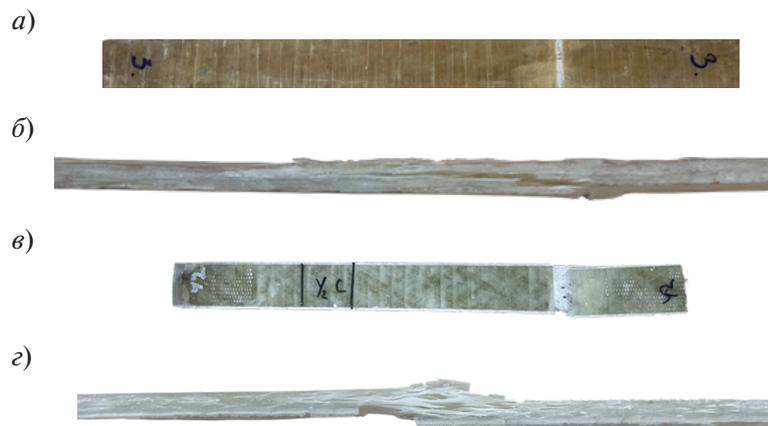


Рис. 2. Характерный вид опытных образцов из базальто- (а–б) и стеклопластика (в–г) после завершения каждого этапа экспонирования и проведения испытания на растяжение; вид сверху (а, в); вид с боку (б, г)

Fig. 2. Typical appearance of basalt-plastic (a–b) and fiberglass (c–d) samples upon completion of each stage of exposure and tensile testing; top view (a, c); side view (b, d)

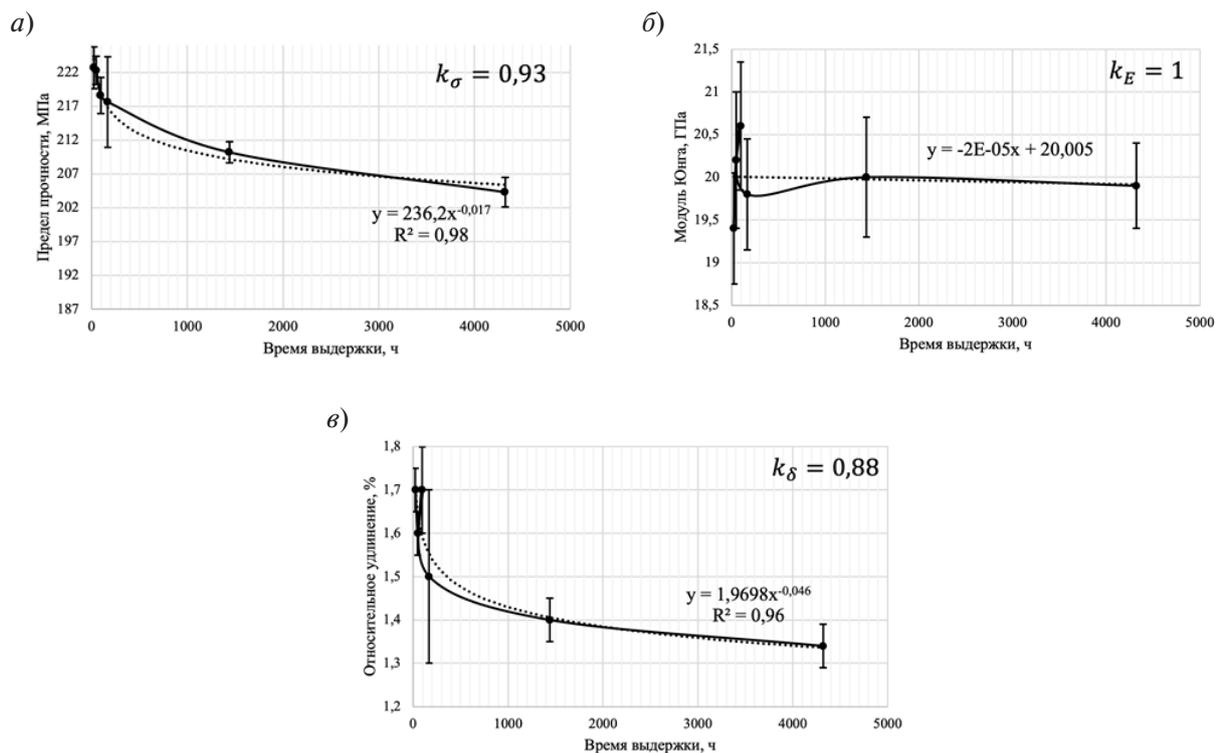


Рис. 3. Зависимость изменения значений предела прочности (а); модуля Юнга (б); относительного удлинения (в) от времени выдержки базальтопластика в испытательной среде

Fig. 3. Dependence of the change in the values of tensile strength (a); Young's modulus (b); relative elongation (c) on the time of exposure of basalt-plastic in the test environment

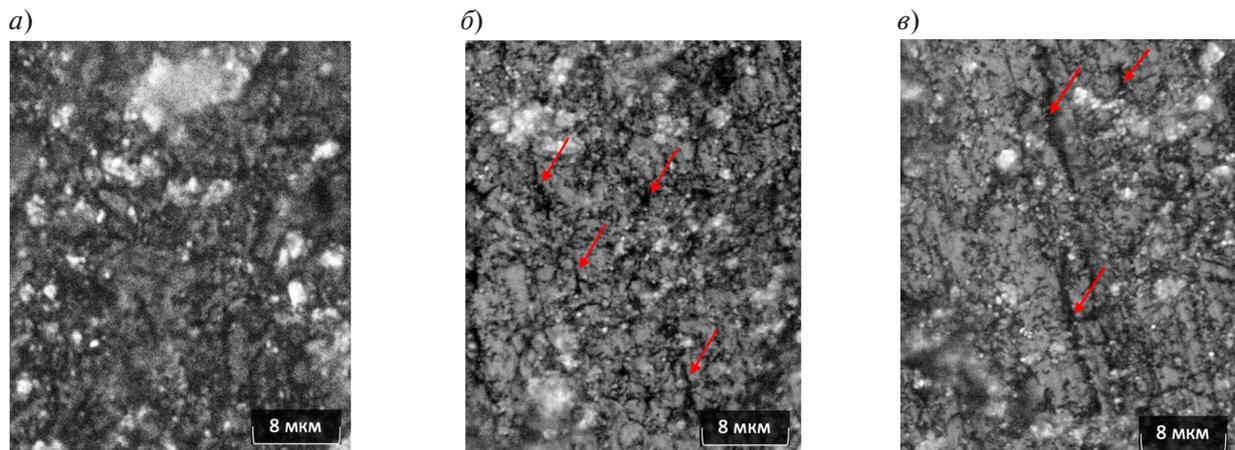


Рис. 4. Изображение структуры образца-свидетеля (а) после экспонирования на протяжении 1440 часов микротрещин (б); 4320 часов (в)

Fig. 4. Image of the structure of the witness sample (a) after exposure for 1440 hours of microcracks (b); 4320 hours (c)

На основании полученных зависимостей с целью их описания были получены эмпирические уравнения изменения предела прочности (1); модуля Юнга (2) и относительного удлинения (3):

$$y = 236,2x^{-0,017}; \quad (1)$$

$$y = -2E - 05x + 20,005; \quad (2)$$

$$y = 1,9698x^{-0,046}, \quad (3)$$

где y – величина соответствующих механических свойств базальтопластика; x – время выдержки в испытательной среде.

При этом полученные уравнения имеют высокое значение величины достоверности аппроксимации, что говорит о пригодности данных уравнений для создания прогнозных моделей.

Изображения структуры базальтопластиковых образцов в исходном состоянии и после выдержек различной протяженности приведены на рис. 4.

Обсуждение

В результате исследования макроструктуры образцов после каждого этапа экспонирования было отмечено отсутствие дефектов типа расслоения, набухания и т.п.

Исследование изломов после завершения каждого этапа экспонирования и проведения испытания на растяжение показало отсутствие влияния времени выдержки образцов в испытательной среде на характер разрушения. При этом определено, что образцы из стеклопластика разрушаются с заметным сдвигом в межфазной зоне с последующим разрывом волокон. Также во время фрактографического анализа изломов стеклопластика обнаружены значительные пустоты, вероятно связанные с отслоением матрицы от волокна (рис. 5).

В ходе анализа полученных результатов на водопоглощение установлено, что образцы из стеклопластика склонны к большему водопоглощению. Возможной причиной увеличенной склонности образцов из стеклопластика к водопоглощению является используемая технология косослойной намотки. При таком способе волокна преимущественно расположены в одном направлении, что способствует ускоренному влагопереносу за счет капиллярного эффекта [22].

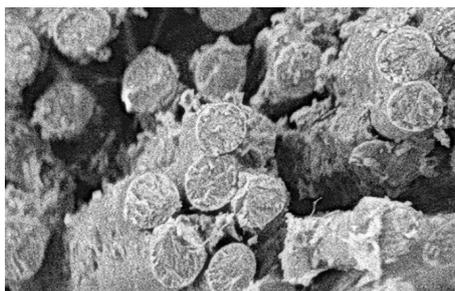


Рис. 5. Характерный излом стеклопластика после экспонирования в испытательной среде и испытания на растяжения

Fig. 5. Typical fracture of a PCM sample after exposure to a test environment and tensile testing

Таким образом, установлено, что применение опытной стеклопластиковой трубы в качестве сваи может быть ограничено в сильно обводненных и заболоченных грунтах. Поэтому дальнейшему экспонированию в испытательной среде подвергались только образцы из базальтопластика как наиболее подходящего материала для производства свайных труб, применяемых в условиях Крайнего Севера.

Анализ полученных зависимостей (рис. 4) показал отсутствие изменений механических свойств (с учетом доверительных интервалов) при малом воздействии УФ-излучения, тепла и влаги (до 168 часов). Дальнейшая выдержка образцов в испытательной среде (4320 часов) приводит к падению предела прочности (на 7%) и относительного удлинения (на 12%). Упругие свойства, с учетом доверительных интервалов, не изменились. Данные значения позволили уточнить результаты по изменению свойств базальтопластика под воздействием УФ-излучения, температуры и влаги, полученные ранее в работе [23]. При этом ГОСТ 9.708–83 позволяет проводить испытания образцов ПКМ с короткой выдержкой (до 500 часов при наличии программы испытаний), что может привести к получению недостоверных результатов по степени изменения свойств образцов ПКМ.

В ходе проведения анализа структур было определено, что причиной деградации поверхности опытных образцов является синергетический эффект эрозии, приводящий к микрорастрескиванию матрицы с последующим образованием объемных дефектов. Данные дефекты являются концентраторами напряжений, которые ускоряют рост и развитие трещин по всему сечению ПКМ при разрушении, что приводит к падению механических свойств. Данный вывод согласуется с результатами работ [24, 25]. Кроме того, изменение микроструктуры свидетельствует о процессе удаления продуктов деградации матрицы во время испытания за счет образования окисленных продуктов, меньшей молекулярной массы, из-за чего поверхность ПКМ становится доступнее для действия УФ-радиации, что облегчает и ускоряет процесс деструкции.

Также установлено, что с увеличением времени экспонирования в испытательной среде увеличиваются не только длина и ширина микротрещин, но также толщина дефектного слоя. Так, через 1440 часов выдержки опытных образцов в испытательной среде она составляет порядка 100–155 мкм, а через 4320 часов – порядка 220–310 мкм.

При этом данные объемные дефекты в экспонированных образцах по сравнению с образцами, не подвергавшимся экспонированию, увеличивают скорость водопоглощения, что может привести к снижению срока эксплуатации ПКМ, особенно в зимний период (рис. 6).

Для определения реального срока эксплуатации надземной части ПКМ-сваи сделали пересчет на натурные условия Ямало-Ненецкого АО. В результате расчета с применением полученного регрессионного уравнения показано, что через 9610 часов произойдет падение предела прочности базальтопластика на 10%. За это время ПКМ накопит 34435 МДж/м² солнечной радиации.

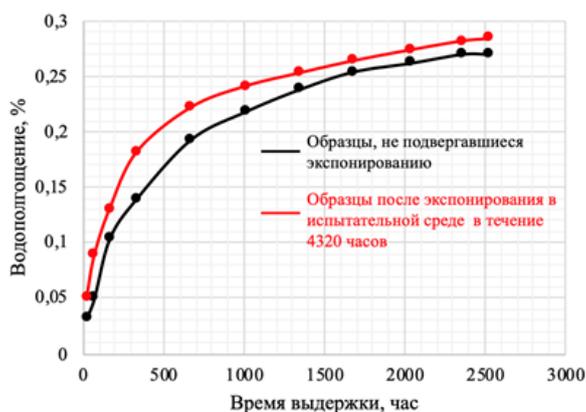


Рис. 6. Изменение водопоглощения после образования микротрещин от воздействия УФ-излучения, температуры и влаги

Fig. 6. Change in water absorption after the formation of microcracks due to exposure to UV radiation, temperature and moisture

На основании вышеизложенного выход из строя надземной части ПКМ-сваи, ориентированной на север, произойдет примерно через 30 лет, а ориентированной на юг — через 15 лет. При этом важно понимать, что испытательная среда, используемая в работе, обладала более жестким воздействием на опытные образцы ПКМ, нежели натурная, что положительно скажется на фактическом сроке эксплуатации изделия.

Таким образом, совместное воздействие УФ-облучения и термовлажностных режимов требует учета с точки зрения деградации структуры ПКМ и изменения механических свойств во время его эксплуатации и должно являться частью инженерных расчетов по проектированию элементов различных конструкций капитального строительства.

Заключение

В ходе проведения работы качественно и количественно оценили деградацию структуры и свойств свайных труб, изготовленных из стекло- и базальтопластика, под воздействием УФ-излучения и сделали следующие выводы:

1. Трубы из стекло- и базальтопластика имеют одинаковую стойкость к воздействию УФ-излучения. Однако за счет более высоких механических свойств и меньшей склонности к водопоглощению базальтопластиковые трубы, изготовленные методом мокрой перекрестной намотки, являются предпочтительным выбором для производства свайных труб.

2. Определено отсутствие изменений механических свойств (с учетом доверительных интервалов) при малом воздействии УФ-излучения, тепла и влаги (до 168 часов). Дальнейшая выдержка образцов в испытательной среде (4320 часов) приводит к падению предела прочности (на 7%) и относительного удлинения (на 12%). Упругие свойства, с учетом доверительных интервалов, не изменились. Однако ГОСТ 9.708–83 позволяет производить испытания с короткой выдержкой, что может привести к получению недостоверных результатов.

3. Причина деградации поверхности опытных образцов заключается в синергетическом эффекте эрозии, приводящей к микрорастрескиванию матрицы с последующим образованием объемных дефектов. Данные дефекты являются концентраторами напряжений, которые ускоряют рост и развитие трещин по всему сечению ПКМ при разрушении, что приводит к падению механических свойств. Кроме того, подобное нарушение сплошности поверхности может приводить к повышению уровня водопоглощения, что негативно скажется на работоспособности ПКМ в зимний период.

4. Полученные регрессионные уравнения снижения механических свойств позволяют прогнозировать поведение надземной части сваи из базальтопластика под воздействием на него УФ-излучения, температуры и влаги.

5. Исходя из расчетных данных показано, что выход из строя надземной части сваи из базальтопластика, расположенной вертикально и ориентированной на север, в условиях Ямало-Ненецкого АО произойдет примерно через 30 лет, а ориентированной на юг – через 15 лет.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Липенина Е.Е.** Техничко-экономическое обоснование освоения месторождений прибрежных зон акваторий северных морей с использованием технологии строительства насыпных островов // Экономика будущего: тренды, вызовы и возможности. 2023. С. 247–252.

[2] **Грузин А.В.** Аналитические исследования напряженно-деформированного состояния грунта в околосвайном пространстве фундаментов объектов нефтегазовой и нефтеперерабатывающей отраслей // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. 2020. С. 143.

[3] **Ширманов К.С., Михайлов Ю.И.** Проблемы логистики капитального строительства газотранспортной системы в восточных регионах РФ и пути их решения // Международный программный комитет. 2023. С. 203–206.

[4] **Ялыгин С.А., Ермаков Б.С., Столяров А.В., Койнов Е.Г., Швецов О.В., Шапошников Н.О., Токарев В.О., Голиков Н.И.** Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буроопускных свай // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024. Т. 9, № 1 (31). С. 173–182. DOI: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-1-173-182>

[5] **Щербанин Ю.А.** Освоение новых нефтегазовых месторождений: логистика снабжения // Экономическая политика России в межотраслевом и пространственном измерении. 2020. С. 141–143.

[6] **Акулышина А.А., Федоркова М.В.** Особенности строительства в условиях мерзлых и вечномерзлых грунтов // Современные перспективы развития гибких производственных систем в промышленном гражданском строительстве и агропромышленном комплексе. 2023. С. 131–134.

[7] **Hewage S.A., Tang C.-S., Mehta Y., Zhu C.** Investigating cracking behavior of saline clayey soil under cyclic freezing-thawing effects, *Engineering Geology*, 326 (2023) 107319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107319>

[8] **Горелик Я.Б., Земеров И.В.** Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6, № 1 (21). С. 10–40. DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40>

[9] **Ермаков Б.С., Швецов О.В., Вологжанина С.А., Нечаев Д.В., Карпов И.Д.** Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур // Горная промышленность. 2024. № 5S. С. 198–203. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>

[10] **Кудрявцев С.А., Сахаров И.И., Парамонов В.Н.** Создание условий нормативного состояния деградирующих многолетнемерзлых оснований зданий и сооружений Дальневосточного федерального округа и Арктики // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году. 2022. Т. 2. С. 157–164.

[11] **Boyarintsev A.V.** Polymer and Composite Piles. *International and Russian Experience, Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 57 (2020) 415–421. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09686-9>

- [12] **Дориомедов М.С.** Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. Т. 89, № 6–7. С. 29–37. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37>
- [13] **Riahinezhad M., Hallman M., Masson J.-F.** Critical review of polymeric building envelope materials: Degradation, durability and service life prediction, *Buildings*, 11 (7) (2021) 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11070299>
- [14] **Ратнер С.Б., Ярцев В.П.** Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность. М.: Химия, 1992. 319 с.
- [15] **Лебедев М.П., Старцев О.В., Петров М.Г., Копырин М.М.** Образование микротрещин при климатическом старении полимерных композиционных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 4. С. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2022-0-4-2-11>
- [16] **Kumar B.G., Singh R.P., Nakamura T.** Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation, *Journal of Composite Materials*, 36 (24) (2002) 2713–2733. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998027616755>
- [17] **Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y.-B., Kumosa M.** Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites, *Polymer Degradation and Stability*, 131 (2016) 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025>
- [18] **Гусев Е.Л., Черных В.Д.** Перспективные подходы и методы к решению проблемы прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата. 2024. С. 253–256. DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-253-256>
- [19] **Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chailan J.F.** Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano-to macro-scale, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68 (2015) 235–241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.028>
- [20] **Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Polyakov V.V.** Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate, *Procedia Structural Integrity*, 30 (2020) 71–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.012>
- [21] **Вапиров Ю.М., Дзюба А.С., Голован В.И.** Накопление повреждений в ПКМ авиационных конструкций под воздействием климатических факторов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. № 3. С. 9.
- [22] **Корецкая Л., Александрова Т.** Структурные изменения неизбежны. Влияние воды на свойства стеклопластиков // Вода Magazine. 2007. № 2.
- [23] **Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б.** Особенности применения полимерных композиционных материалов при обустройстве нефтегазовых месторождений Арктического пояса // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 112–121. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31108>
- [24] **Awaja F., Nguyen M.-T., Zhang S., Arhatari B.** The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (4) (2011) 408–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.015>
- [25] **Awaja F., Zhang S., Tripathi M., Nikiforov A., Pugno N.** Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, *Progress in Materials Science*, 83 (2016) 536–573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.07.007>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НЕЧАЕВ Даниил Валерьевич – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>

ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: ermakov55@bk.ru

ШВЕЦОВ Олег Викторович – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: shvec_off@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

REFERENCES

[1] **E.E. Lipenina**, Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie osvoeniia mestorozhdenii pribrezhnykh zon akvatorii severnykh morei s ispol'zovaniem tekhnologii stroitel'stva nasypanykh ostrovov [Feasibility study for the development of deposits in coastal zones of the northern seas using the technology of building artificial islands], *Ekonomika budushchego: trendy, vyzovy i vozmozhnosti* [Economy of the Future: Trends, Challenges and Opportunities], (2023) 247–252.

[2] **A.V. Gruzin**, Analiticheskie issledovaniia napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia grunta v okolovainom prostranstve fundamentov ob'ektov neftegazovoi i neftepererabatyvaiushchei otraslei [Analytical studies of the stress-strain state of soil in the near-pile space of foundations of oil and gas and oil refining industries], *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva* [Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production], (2020) 143.

[3] **K.S. Shirmanov, Iu.I. Mikhailov**, Problemy logistiki kapital'nogo stroitel'stva gazotransportnoi sistemy v vostochnykh regionakh RF i puti ikh resheniia [Problems of logistics of capital construction of gas transportation system in the eastern regions of the Russian Federation and ways of their solution], *Mezhdunarodnyi programmnyi komitet* [International Program Committee], (2023) 203–206.

[4] **S.A. Yalygin, B.S. Ermakov, A.V. Stolyarov, E.G. Koinov, O.V. Shvetsov, N.O. Shaposhnikov, V.O. Tokarev, N.I. Golikov**, The influence of heat treatment after high-frequency welding on the operational properties of steel 09G2S used for the manufacturing of drilled piles, *PRONEFT. Professionally about Oil*, 9 (1 (31)) (2024) 173–182. DOI: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-1-173-182>

[5] **Iu.A. Shcherbanin**, Osvoenie novykh neftegazovykh mestorozhdenii: logistika snabzheniia [Development of new oil and gas fields: supply logistics], *Ekonomicheskaiia politika Rossii v mezhotraslevom i prostranstvennom izmerenii* [Economic policy of Russia in inter-sectoral and spatial dimensions], (2020) 141–143.

[6] **A.A. Akul'shina, M.V. Fedorkova**, Osobennosti stroitel'stva v usloviakh merzlykh i vechnomerzlykh gruntov [Features of construction in frozen and permafrost soils], *Sovremennye perspektivy razvitiia gibkikh proizvodstvennykh sistem v promyshlennom grazhdanskom stroitel'stve i agropromyshlennom komplekse* [Modern prospects for the development of flexible manufacturing systems in industrial civil construction and the agro-industrial complex], (2023) 131–134.

[7] **S.A. Hewage, C.-S. Tang, Y. Mehta, C. Zhu**, Investigating cracking behavior of saline clayey soil under cyclic freezing-thawing effects, *Engineering Geology*, 326 (2023) 107319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107319>

[8] **Ja.B. Gorelik, I.V. Zemerov**, Influence of the surface water reservoir to the thermal regime of frozen ground, *TYUMEN STATE UNIVERSITY HERALD. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 6 (1 (21)) (2020) 10–40. DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40>

[9] **B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov, S.A. Vologzhanina, D.V. Nechaev, I.D. Karpov**, The influence of water-repellent coating on the performance of structures made of polymer composite materials in conditions of extremely low temperatures, *Russian Mining Industry*, 5S (2024) 198–203. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>

- [10] **S.A. Kudryavtsev, I.I. Sakharov, V.N. Paramonov**, Creating conditions for the regular state of degrading permafrost buildings and structures in the far eastern federal district and the Arctic, *Fundamental'nye, poiskovyie i prikladnye issledovaniia RAASN po nauchnomu obespecheniiu razvitiia arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noi otrasli Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu* [Fundamental, exploratory and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021], 2 (2022) 157–164.
- [11] **A.V. Boyarintsev**, Polymer and Composite Piles. International and Russian Experience, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 57 (2020) 415–421. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09686-9>
- [12] **M.S. Doriomedov**, Russian and world market of polymer composites (review), *Trudy VIAM (Proceedings of VIAM)*, 89 (6–7) (2020) 29–37. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37>
- [13] **M. Riahinezhad, M. Hallman, J.-F. Masson**, Critical review of polymeric building envelope materials: Degradation, durability and service life prediction, *Buildings*, 11 (7) (2021) 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11070299>
- [14] **S.B. Ratner, V.P. Iartsev**, *Fizicheskaiia mekhanika plastmass. Kak prognoziruuiut rabotosposobnost'* [Physical Mechanics of Plastics. How to Predict Performance]. Moscow: Khimiia, 1992. 319 p.
- [15] **M.P. Lebedev, O.V. Startsev, M.G. Petrov, M.M. Kopyrin**, Formation of microcracks during climatic aging of polymer composite materials, *Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik (All materials. Encyclopaedic reference manual)*, 4 (2022) 2–11. DOI: <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2022-0-4-2-11>
- [16] **B.G. Kumar, R.P. Singh, T. Nakamura**, Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation, *Journal of Composite Materials*, 36 (24) (2002) 2713–2733. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998027616755>
- [17] **T. Lu, E. Solis-Ramos, Y.-B. Yi, M. Kumosa**, Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites, *Polymer Degradation and Stability*, 131 (2016) 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2016.06.025>
- [18] **E.L. Gusev, V.D. Chernykh**, Perspektivnye podkhody i metody k resheniiu problemy prognozirovaniia opredeliiushchikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov [Promising approaches and methods for solving the problem of predicting the defining characteristics of composite materials], *Fiziko-tekhicheskie problemy dobychi, transporta i pererabotki organicheskogo syr'ia v usloviakh kholodnogo klimata* [Physical and technical problems of extraction, transportation and processing of organic raw materials in cold climate conditions], (2024) 253–256. DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-253-256>
- [19] **L. Belec, T.H. Nguyen, D.L. Nguyen, J.F. Chailan**, Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano-to macro-scale, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68 (2015) 235–241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.028>
- [20] **A.K. Kychkin, O.V. Startsev, M.P. Lebedev, V.V. Polyakov**, Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate, *Procedia Structural Integrity*, 30 (2020) 71–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.012>
- [21] **Iu.M. Vapirov, A.S. Dziuba, V.I. Golovan**, Nakoplenie povrezhdenii v PKM aviatsionnykh konstruksii pod vozdeistviem klimaticheskikh faktorov [Accumulation of damage in PCM of aircraft structures under the influence of climatic factors], *Novosti materialovedeniia. Nauka i tekhnika* [Materials Science News. Science and Technology], 3 (2013) 9.
- [22] **L. Koretskaia, T. Aleksandrova**, Strukturnye izmeneniia neizbezhny. Vliianie vody na svoistva stekloplastikov [Structural changes are inevitable. The effect of water on the properties of fiberglass], *Water Magazine*, 2 (2007).
- [23] **B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov, S.B. Ermakov**, Features of using polymer composite materials in the development of oil and gas fields in the Arctic belt, *Global Energy*, 31 (01) (2025) 112–121, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31108>
- [24] **F. Awaja, M.-T. Nguyen, S. Zhang, B. Arhatari**, The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (4) (2011) 408–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.015>

[25] F. Awaja, S. Zhang, M. Tripathi, A. Nikiforov, N. Pugno, Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, *Progress in Materials Science*, 83 (2016) 536–573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.07.007>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Daniil V. NECHAEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>

Boris S. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ermakov55@bk.ru

Oleg V. SHVETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: shvec_off@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

Поступила: 17.06.2025; Одобрена: 16.07.2025; Принята: 18.07.2025.

Submitted: 17.06.2025; Approved: 16.07.2025; Accepted: 18.07.2025.