

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ СИСТЕМ: ОБЗОР СВОЙСТВ, МОНИТОРИНГА И НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ*

POLYMER COMPOSITE PIPELINES FOR ARCTIC OIL FIELD SYSTEMS: REVIEW OF PROPERTIES, MONITORING AND REGULATORY FRAMEWORK

Высотин Ю.А., магистр, инженер, Научно-технологический комплекс «Новые технологии и материалы», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

Карпов И.Д., аспирант, инженер-исследователь, Научно-технологический комплекс «Новые технологии и материалы», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

В статье рассматривается проблема замены стальных промышленных трубопроводов на аналоги из полимерных композиционных материалов (ПКМ) применительно к условиям Крайнего Севера. На основе анализа публикаций систематизированы данные о механических свойствах стеклопластиков (GFRP/GRE) и термопластичных композитных труб (TCP) при температурах до -60°C . Принципиальное преимущество ПКМ перед углеродистыми сталями – отсутствие вязко-хрупкого перехода – делает их особенно ценными для арктических условий. Выполнен сравнительный анализ по критериям коррозионной стойкости, массы, теплопроводности и стоимости жизненного цикла (LCC): расчеты показывают экономию 30–52% за 30-летний горизонт. Рассмотрены перспективные системы структурного мониторинга SHM на основе FBG-датчиков, акустической эмиссии и распределенных оптических систем. Проведен анализ российской и международной нормативной базы; выявлено, что специализированного стандарта для ПКМ-трубопроводов в условиях Крайнего Севера в мировой практике не существует. Определены три ключевых исследовательских пробела, требующих первоочередного внимания.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, стеклопластиковые трубопроводы, Крайний Север, криогенные температуры, стоимость жизненного цикла, SHM.

Для цитирования: Высотин Ю.А., Карпов И.Д. Полимерные композиционные трубопроводы для арктических нефтепромысловых систем: обзор свойств, мониторинга и нормативной базы // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2026. № 4 (91). С. 72–78.

Vysotin Yu.A., M.Sc., engineer, Scientific and Technological Complex «New Technologies and Materials», Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)

Karpov I.D., postgraduate student, research engineer, Scientific and Technological Complex «New Technologies and Materials», Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)

The paper addresses the problem of replacing steel field pipelines with polymer composite material (PCM) analogues for Arctic and sub-Arctic oil field conditions. Based on a systematic literature review, data on the mechanical properties of glass-reinforced plastics (GFRP/GRE) and thermoplastic composite pipes (TCP) at temperatures down to -60°C are systematised. The key advantage of PCMs over carbon steels is the complete absence of a ductile-to-brittle transition, which makes them especially valuable in Arctic environments. A comparative analysis is carried out by corrosion resistance, weight, thermal conductivity, and life-cycle cost (LCC) criteria: estimates indicate cost savings of 30–52% over a 30-year horizon. Structural health monitoring (SHM) systems based on FBG sensors, acoustic emission, and distributed fibre-optic sensing are reviewed. An analysis of Russian and international regulatory frameworks reveals that no specialised standard for PCM pipelines in Arctic conditions currently exists worldwide. Three critical research gaps requiring priority attention are identified.

Keywords: polymer composite materials, glass-reinforced pipelines, Arctic, cryogenic temperatures, life-cycle cost, SHM.

For citation: Vysotin Yu.A., Karpov I.D. Polymer composite pipelines for arctic oil field systems: review of properties, monitoring and regulatory framework. Information and economic aspects of standardization and technical regulation. 2026;4(91):72–78. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Протяженность промышленных трубопроводов нефтегазовой отрасли России превышает 350 тыс. км, из которых значительная часть эксплуатируется при расчетной темпера-

туре ниже -40°C . Коррозия является причиной более 70% всех инцидентов на промышленных трубопроводах [1]. Сочетание коррозионной деградации с хладноломкостью конструкционных сталей формирует устойчивый паттерн аварийно-

* 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).

сти, влекущий экологический ущерб и финансовые потери, не сопоставимые со стоимостью самих конструкций.

Полимерные композиционные материалы – стеклопластики GRE/GFRP и термопластичные композитные трубы TCP – принципиально лишены коррозионных уязвимостей. Российские производители сертифицировали свою продукцию до -65°C согласно ГОСТ Р 56277–2014¹. Работы группы НТК «Новые технологии и материалы» совместно с Газпром нефтью подтверждают актуальность задачи: в отрасли до сих пор отсутствует единая нормативно-техническая база, регламентирующая применение ПКМ в условиях холодного климата [2]. Оценка надежности и целостности ПКМ-трубопроводов в нефтегазовом секторе является одним из наиболее активно развивающихся направлений материаловедения [3].

Цель настоящего обзора – систематизировать накопленные знания о поведении ПКМ-трубопроводов в арктических условиях и определить приоритетные направления для дальнейших исследований.

СВОЙСТВА ПКМ-ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Применяемые для арктических трубопроводов ПКМ делятся на три класса. Наиболее зрелой технологией являются терморезистивные трубы GRE/GFRP на основе стекловолокна и эпоксидной матрицы с рабочим диапазоном от -65 до $+110^{\circ}\text{C}$ [4]. Углепластиковые трубы CFRP наиболее чувствительны к термически индуцированному микротрещинообразованию вследствие значительного несоответствия коэффициентов теплового расширения волокна ($\sim 0,8 \cdot 10^{-6}/\text{K}$) и эпоксидной матрицы ($\sim 55 \cdot 10^{-6}/\text{K}$). Третий класс – термопластичные TCP на матрицах PEEK или PVDF – сочетает гибкость монтажа с высокой вязкостью разрушения при криогенных температурах [5].

Охлаждение GFRP-труб до арктических температур сопровождается двумя конкурирующими эффектами. С одной стороны, прочность стекловолокна при -60°C возрастает на 10–25% [6]. С другой – полимерная матрица охрупчивается: деформация при разрушении снижается на 15–30%, а межслоевая сдвиговая прочность (ILSS) – на 5–20% [7]. В работе [8] CFRP-образцы выдержаны при -80°C в течение 60 суток без потери прочностных характеристик, тогда как при $+100^{\circ}\text{C}$ прочность при сжатии снизилась на 92,89%, что подтверждает пригодность углепластика именно для арктических условий.

Принципиальное отличие ПКМ от углеродистых сталей состоит в отсутствии вязко-хрупкого перехода. Сталь Ст20 при температурах ниже -40°C резко теряет ударную вязкость; ПКМ-ламинаты лишены этого эффекта [9]. Экспериментально установлено [10], что зона ударного повреждения намотанных $\pm 55^{\circ}$ GFRP-труб при 77 К уменьшается по сравнению с комнатной температурой, а признаки микротрещинообразования после криогенного кондиционирования отсутствуют.

При водонасыщении 300 циклов замораживания–оттаивания снижают изгибную прочность GFRP с полиэфирной матрицей на 29%, тогда как с винилэфирной – лишь на 8% [7]. Установлено [11], что термоциклирование в диапазоне $-20 \dots +20^{\circ}\text{C}$ снижает модуль упругости пултрудированного GFRP примерно на 12 % после 300 циклов. Исследования [12] показали снижение прочности на 47,65% при воздействии агрессивных жидкостей и повышенных температурах, при этом при низких температурах скорость деградации значительно замедляется. Для арктических условий приоритет следует отдавать винилэфирным и эпоксидным системам с пониженным водопоглощением.

Зависимость прочностных свойств от температуры показана на рис. 1. Сводное сравнение ключевых характеристик материалов приведено в табл. 1 и на рис. 2.

¹ ГОСТ Р 56277–2014. Трубы и фитинги композитные полимерные для внутрипромысловых трубопроводов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.

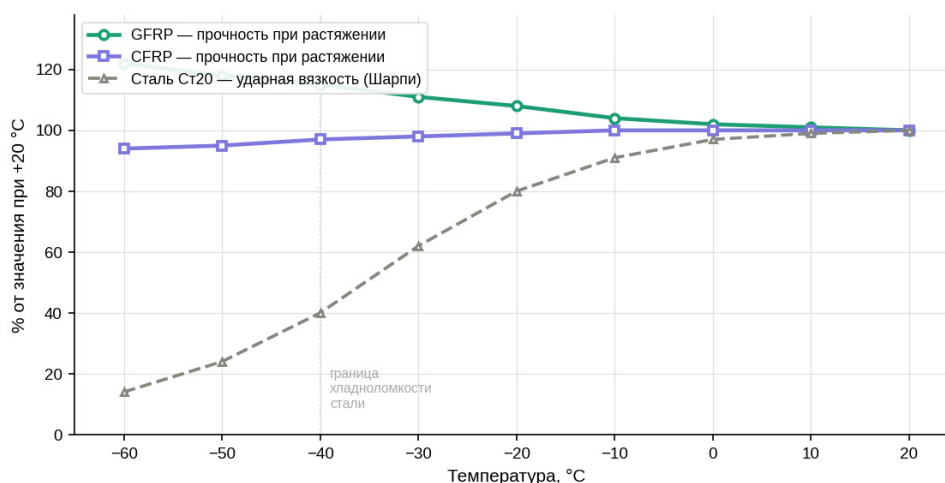


Рис. 1. Изменение прочностных свойств ПКМ и ударной вязкости стали в зависимости от температуры (% от значения при $+20^{\circ}\text{C}$)

Таблица 1

Сравнительные характеристики ПКМ-трубопроводов и стальных при низких температурах

Параметр	GFRP (GRE)	CFRP	TCP (PEEK)	Сталь (API 5L X52)
Плотность, кг/м³	1800–2000	1500–1600	1500–1800	7850
↑ модуля при –60 °С	10–20%	5–10%	умеренно	незначительно
Хрупкий переход	отсутствует	отсутствует	отсутствует	критич. < –40 °С
Коррозия	нет	нет	нет	нет
Теплопров., Вт/(м·К)	0,3–0,6	0,5–1,0	0,5–3,0	43–50
Масса DN200 PN16, кг/м	5–8	3–5	4–7	31–42
Срок службы, лет	50–100	30–50	50+	15–30 (агресс. среда)
Рабочая темп-ра, °С	–65...+110	–60...+150	–40...+130	–60...+450

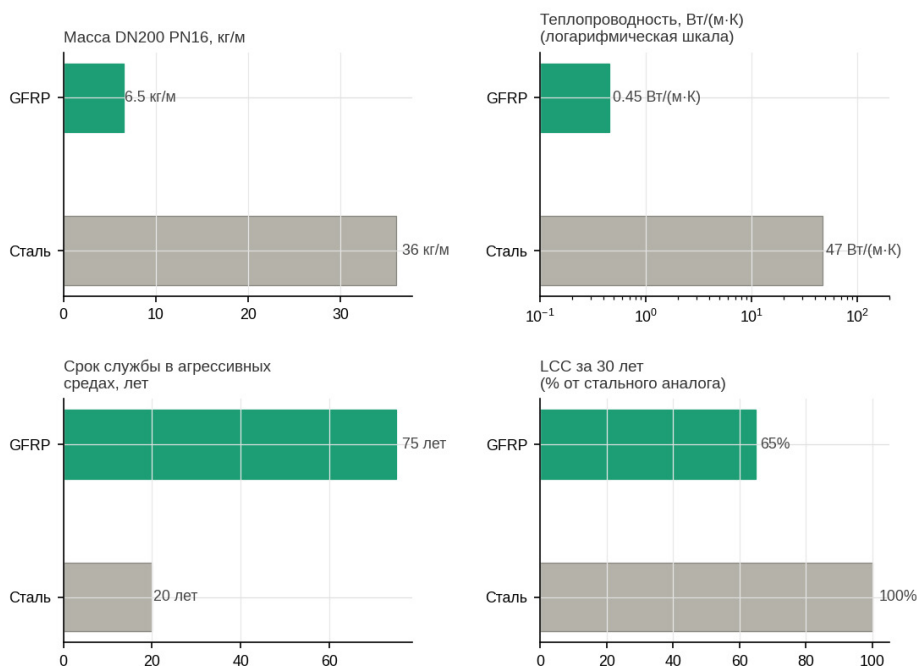


Рис. 2. Сравнение ключевых эксплуатационных параметров GFRP-трубопровода и стального аналога

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПКМ- И СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Ключевым преимуществом ПКМ-трубопроводов является полное отсутствие коррозии – как внутренней (CO_2 -коррозия, сероводородное растрескивание SSC), так и наружной (электрохимическая коррозия). Это исключает необходимость в электрохимической защите (ЭХЗ), ингибиторах и защитных покрытиях, которые составляют 15–35% операционных расходов на стальные трубопроводы в арктических условиях [13].

Экономическое обоснование замены формализуется через сравнение стоимости жизненного цикла (LCC) по методу чистой приведенной стоимости (ISO 15686-5:2017). Интегральные затраты за расчетный период n лет:

$$LCC = C_{CAP} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{OP}(t) + C_M(t) + C_R(t)}{(1+r)^t} + \frac{C_D}{(1+r)^n} - \frac{V_S}{(1+r)^n} \quad (1)$$

где C_{CAP} – капитальные затраты; $C_{OP}(t)$ – операционные затраты; $C_M(t)$ – техническое обслуживание и ремонт; $C_R(t)$ – реабилитация; C_D – демонтаж; V_S – ликвидационная стоимость; r – ставка дисконтирования; n – период анализа.

Для ПКМ слагаемое СМ фактически равно нулю на весь расчетный срок – отсутствуют затраты на ЭХЗ и антикоррозионные мероприятия. По данным работы [14], при горизонте 60 лет суммарный LCC GRP-трубопровода на 16,3% ниже стального аналога; в арктических условиях экономия достигает 30–52% [15]. Структура затрат за 30 лет ($r = 5\%$, $n = 30$) представлена в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Сравнительная структура LCC стального и GFRP-трубопровода DN200 за 30 лет

Статья затрат	Сталь, % LCC	GFRP, % LCC	Примечание
Капитальные затраты	30	43	CAPEX GFRP выше на ~40%
Монтаж	8	9	Сопоставимы
Эксплуатация	20	31	Больше доля при меньшей базе
ЭХЗ и антикоррозионная защита	22	0	Ключевое преимущество ПКМ
ТО и ремонт	14	11	Ниже частота аварий
Ликвидация	6	6	Сопоставимы
Итого LCC	100%	~65%	Экономия ~35%

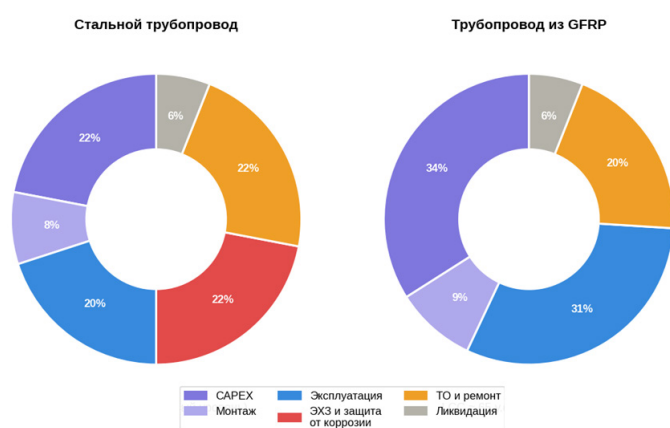


Рис. 3. Структура стоимости жизненного цикла (LCC) стального и GFRP-трубопровода за 30 лет

Теплопроводность GFRP (0,3–0,6 Вт/(м·К)) в 80–100 раз ниже углеродистой стали (43–50 Вт/(м·К)), что снижает теплопотери при транспортировке горячих сред и уменьшает тепловое воздействие трубопровода на вечномёрзлые

грунты. Снижение массы в 4–7 раз критически важно для логистики в труднодоступных арктических районах. Сварка стали при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ без обогреваемых укрытий практически невозможна; соединения ПКМ выполняются муфтовым способом без нагрева, что обеспечивает скорость монтажа DN200 до 1200 м/сутки – в 3–4 раза выше. Опыт применения бандажных ремонтных систем показал экономию 24% по сравнению со сварными муфтами [15].

СИСТЕМЫ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА И НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

ПКМ-трубопроводы не поддаются диагностике традиционными внутритрубными инспекционными снарядами, что обуславливает первостепенную роль систем структурного мониторинга (Structural Health Monitoring, SHM). Концептуальная архитектура предлагаемой мультимодальной SHM-системы показана на рис. 4. Обзор методов неразрушающего контроля для ПКМ-трубопроводов [16] подтверждает, что ни одна из существующих технологий в полной мере не решает задачу комплексного мониторинга.

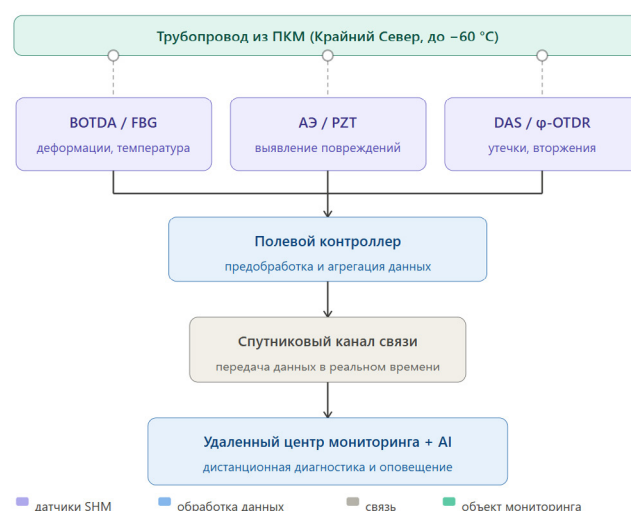


Рис. 4. Концептуальная архитектура мультимодальной SHM-системы для арктического ПКМ-трубопровода

FBG-датчики (волоконно-оптические решетки Брэгга) работоспособны при криогенных температурах вплоть до 4,2 К. В работе [17] разработана SHM-система для BFRP-трубопроводов на основе FBG и нейронной сети ECNN со средней ошибкой прогноза 0,093%; комплексный обзор применения FBG для мониторинга композитных конструкций [18] подтверждает применимость технологии в широком температурном диапазоне. Квазираспределенные FBG-массивы применены при замене стальных трубопроводов на CFRP [19]. PZT-датчики акустической эмиссии (АЭ) обеспечивают идентификацию механизмов разрушения и стабильны в арктическом диапазоне [20]. Для протяженных трубопроводов особенно перспективны распределенные системы BOTDA/BOTDR (дальность – до 100 км)

и DAS на основе ϕ -OTDR для мониторинга утечек – пассивное волокно не требует питания вдоль трассы, что критически важно для удаленных объектов Крайнего Севера.

В части нормативного регулирования: ГОСТ Р 56277–2014 устанавливает рабочий диапазон для композитных труб от -65 до $+90$ °С; ГОСТ Р 59411–2021² регламентирует проектирование стеклопластиковых трубопроводов DN 50–450 и давлением до 21 МПа. Международный стандарт ISO 14692:2017 регулирует GRP-трубопроводы нефтегазовой промышленности без арктической специфики; DNV-ST-F119 – единственный стандарт, явно требующий испытаний TCP при минимальной проектной температуре. ISO/TS 35105:2018 – арктический стандарт – ориентирован исключительно на металлы. По оценке авторов работы [2], отсутствие специализированного стандарта для ПКМ-трубопроводов в условиях Крайнего Севера является главным барьером для их массового внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПКМ-трубопроводы (GRE/GFRP и TCP) технологически готовы к широкому применению в условиях Крайнего Севера. Принципиальные преимущества перед сталью – отсутствие хрупкого перехода, защита от коррозии, масса в 4–7 раз меньше и теплопроводность на два порядка ниже – особенно ценны в арктических условиях. Оценка по фор-

муле (1) показывает снижение LCC на 30–52% за 30-летний горизонт.

Три наиболее критичных исследовательских пробела: (1) отсутствие данных о долгосрочном ресурсе GRE-труб при синергетическом воздействии «арктической триады» – давление, водонасыщение и термоциклирование одновременно; (2) неудовлетворительные эксплуатационные характеристики муфтовых и клеевых соединений при $-40 \dots -60$ °С остаются неизученными и ненормированными; (3) отсутствие комплексной SHM-системы, адаптированной к условиям удаленных арктических объектов.

Первоочередная задача технического регулирования – разработка отечественного стандарта «Полимерные комозитные трубопроводы для условий Крайнего Севера» по аналогии с ISO/TS 35105:2018. Исследования СПбПУ Петра Великого [2], [21] создают для этого необходимый научный задел.

Рецензент: Будкин Юрий Валерьевич, доктор технических наук, профессор, директор научного центра, ФГБУ «Институт стандартизации», Москва, Российская Федерация. E-mail: y.v.budkin@gostinfo.ru

² ГОСТ Р 59411–2021. Трубопроводы промышленные из стеклопластиковых труб. Правила проектирования и эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2021. 56 с.

Список литературы

1. Ростехнадзор. Отчет о деятельности за 2022 год. – М., 2023. – 214 с.
2. Ровбо А.С., Ермаков С.Б., Карпов И.Д. и др. Оценка возможности замены стальных элементов обустройства на элементы обустройства из ПКМ для производственных процессов на объектах нефтедобычи // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2024. – Т. 9, № 2. – С. 130–135. – URL: <https://proneft.elpub.ru/jour/article/view/530>
3. Bahaman U.S.F. et al. Evaluating the reliability and integrity of composite pipelines in the oil and gas sector: A scientometric and systematic analysis // Ocean Engineering. – 2024. – Vol. 303. – Art. 117773. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117773>
4. Alabtah F.G., Mahdi E., Eliyan F.F. The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review // Composite Structures. – 2021. – Vol. 276. – P. 114595. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114595>
5. Okolie O. et al. Manufacturing Defects in Thermoplastic Composite Pipes and Their Effect on in-situ Performance // Applied Composite Materials. – 2023. – Vol. 30. – P. 231–260. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10443-022-10066-9>

References

1. Rostekhnadzor. Otchet o deyatel'nosti za 2022 god [Activity Report 2022]. Moscow, 2023, 214 p. (In Russian)
2. Rovbo A.S., Ermakov S.B., Karpov I.D. et al. Otsenka vozmozhnosti zameny stal'nykh elementov obustroystva na elementy iz PKM [Assessment of feasibility of replacing steel components with PCM]. PRONEFT'. Professional'no o nefti, 2024, vol. 9, no. 2, pp. 130–135, available at: <https://proneft.elpub.ru/jour/article/view/530>
3. Bahaman U.S.F. et al. Evaluating the reliability and integrity of composite pipelines in the oil and gas sector. Ocean Engineering, 2024, vol. 303, art. 117773. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117773>
4. Alabtah F.G., Mahdi E., Eliyan F.F. The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review. Composite Structures, 2021, vol. 276, p. 114595. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114595>
5. Okolie O. et al. Manufacturing Defects in Thermoplastic Composite Pipes. Applied Composite Materials, 2023, vol. 30, pp. 231–260. <https://doi.org/10.1007/s10443-022-10066-9>

6. Bazli M., Abolfazli M. Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymers under Elevated Temperatures: An Overview // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12(11), 2600. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym12112600>
7. Correia J.R. et al. Freeze-thaw durability of vacuum infused glass fibre composites with unsaturated polyester and vinyl ester matrices // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 455. – Art. 139125. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139125>
8. Tefera G., Adali S., Bright G. Mechanical behaviour of CFRP composite material at different temperatures // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1177/09673911221125072>
9. Ohaeri E.G., Szpunar J.A. An overview on pipeline steel development for cold climate applications // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 2. – P. 1–17. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.01.003>
10. Kara M., Arat M., Uyaner M. Low velocity impact response and damages of GFRP composite tubes under room and cryogenic temperatures // *Journal of Composite Materials*. – 2021. – Vol. 55(24). – P. 3567–3577. – URL: <https://doi.org/10.1177/00219983211029368>
11. Grammatikos S.A. et al. Thermal cycling effects on the durability of a pultruded GFRP material for off-shore civil engineering structures // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 153. – P. 297–310. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.037>
12. Portoacă A.-I. et al. Assessment of Environmental Impact on Glass-Fiber-Reinforced Polymer Pipes Mechanical and Thermal Properties // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16(13), 1779. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym16131779>
13. Prabhakar M.M. et al. An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 230, 111419. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111419>
14. Elsebaie I.H., Al-Khomairi A. Optimization of pipeline lifecycle cost using alternatives with different life spans // *Water Supply*. – 2022. – Vol. 22(2). – P. 1835–1847. – URL: <https://doi.org/10.2166/ws.2021.305>
15. Dumitrescu A. et al. Corrosion Repair of Pipelines Using Modern Composite Materials Systems // *Energies*. – 2021. – Vol. 14(3), 615. – URL: <https://doi.org/10.3390/en14030615>
16. Ibrahim M.E. et al. Composite Pipelines: Analyzing Defects and Advancements in Non-Destructive Testing Techniques // *Engineering Failure Analysis*. – 2024. – Vol. 157. – Art. 107917. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107917>
17. Altabey W.A. et al. Structural Health Monitoring of Composite Pipelines Utilizing Fiber Optic Sensors and an AI-Based Algorithm // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23(8), 3887. – URL: <https://doi.org/10.3390/s23083887>
18. Güemes A. et al. Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors // *Engineering Failure Analysis*. – 2024. – Vol. 157. – Art. 107917. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107917>
19. Wang H.-P. et al. Dynamic Performance Detection of CFRP Pipes via FBG Sensing. *Frontiers in Materials*, 2021, vol. 8, 683374. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683374>
20. Hasani S. et al. Acoustic Emission-Based Analysis of Damage in FRP Tubes. *Sensors*, 2023, vol. 23(15), 6994. <https://doi.org/10.3390/s23156994>
6. Bazli M., Abolfazli M. Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymers under Elevated Temperatures. *Polymers*, 2020, vol. 12(11), 2600. <https://doi.org/10.3390/polym12112600>
7. Correia J.R. et al. Freeze-thaw durability of vacuum infused glass fibre composites. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 455, art. 139125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139125>
8. Tefera G., Adali S., Bright G. Mechanical behaviour of CFRP at different temperatures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2022. <https://doi.org/10.1177/09673911221125072>
9. Ohaeri E.G., Szpunar J.A. An overview on pipeline steel development for cold climate applications. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2022, vol. 2, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.01.003>
10. Kara M., Arat M., Uyaner M. Low velocity impact response of GFRP tubes at cryogenic temperatures. *Journal of Composite Materials*, 2021, vol. 55(24), pp. 3567–3577. <https://doi.org/10.1177/00219983211029368>
11. Grammatikos S.A. et al. Thermal cycling effects on the durability of a pultruded GFRP material. *Composite Structures*, 2016, vol. 153, pp. 297–310. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.037>
12. Portoacă A.-I. et al. Assessment of Environmental Impact on GFRP Pipes Properties. *Polymers*, 2024, vol. 16(13), 1779. <https://doi.org/10.3390/polym16131779>
13. Prabhakar M.M. et al. An overview of burst, buckling, durability and corrosion of FRP pipes. *Composite Structures*, 2019, vol. 230, 111419. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111419>
14. Elsebaie I.H., Al-Khomairi A. Optimization of pipeline lifecycle cost. *Water Supply*, 2022, vol. 22(2), pp. 1835–1847. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.305>
15. Dumitrescu A. et al. Corrosion Repair of Pipelines Using Composite Materials Systems. *Energies*, 2021, vol. 14(3), 615. <https://doi.org/10.3390/en14030615>
16. Ibrahim M.E. et al. Composite Pipelines: Analyzing Defects and Advancements in NDT Techniques. *Engineering Failure Analysis*, 2024, vol. 157, art. 107917. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107917>
17. Altabey W.A. et al. SHM of Composite Pipelines Utilizing Fiber Optic Sensors and AI. *Sensors*, 2023, vol. 23(8), 3887. <https://doi.org/10.3390/s23083887>
18. Güemes A. et al. Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors. *Sensors*, 2018, vol. 18(4), art. 1094. <https://doi.org/10.3390/s18041094>
19. Wang H.-P. et al. Dynamic Performance Detection of CFRP Pipes via FBG Sensing. *Frontiers in Materials*, 2021, vol. 8, 683374. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683374>
20. Hasani S. et al. Acoustic Emission-Based Analysis of Damage in FRP Tubes. *Sensors*, 2023, vol. 23(15), 6994. <https://doi.org/10.3390/s23156994>

- Sensors. – 2018. – Vol.18(4). – Art.1094. – URL: <https://doi.org/10.3390/s18041094>
19. Wang H.-P. et al. Dynamic Performance Detection of CFRP Composite Pipes based on Quasi-Distributed Optical Fiber Sensing Techniques // *Frontiers in Materials*. – 2021. – Vol. 8, 683374. – URL: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683374>
20. Hasani S. et al. Acoustic Emission-Based Analysis of Damage Mechanisms in Filament Wound FRP Composite Tubes // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23(15), 6994. – URL: <https://doi.org/10.3390/s23156994>
21. Nekliudova E.A., Semenov A.S., Melnikov B.E., Semenov S.G. Experimental research and finite element analysis of elastic and strength properties of fiberglass composite material // *Magazine of Civil Engineering*. – 2014. – № 3(47). – P. 25–39. – URL: <https://doi.org/10.5862/MCE.47.3>
21. Nekliudova E.A., Semenov A.S., Melnikov B.E., Semenov S.G. Experimental research and FE analysis of fiberglass properties. *Magazine of Civil Engineering*, 2014, no. 3(47), pp. 25–39. <https://doi.org/10.5862/MCE.47.3>