

УДК 621.791.46
DOI



CC BY 4.0

ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА НА ФОРМИРОВАНИЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ

¹Данзанова Е. В. ORCID ID 0000-0002-3445-0961,

²Куркина И. И. ORCID ID 0000-0002-1076-0631

¹*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр „Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук“», Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация, e-mail: dhv4071@mail.ru;*

²*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», Якутск,
Российская Федерация*

Сварка закладными нагревателями полиэтиленовых труб соединительными деталями является наиболее надежным способом соединения полимерных трубопроводов. Тем не менее ограничения по допустимой температуре окружающей среды, при которой разрешены сварочные работы, препятствуют широкому использованию полиэтиленовых трубопроводов в регионах с холодным климатом. Рекомендуемый способ сварки с использованием теплых укрытий требует больших временных затрат на соединение труб и непригоден для выполнения ремонтно-восстановительных работ на аварийных участках газопроводов в зимних условиях. Рассматривается технология сварки при низких температурах, позволяющая значительно ускорить строительство и ремонт трубопроводов из полимерных материалов. Суть рассматриваемого способа сварки заключается во внедрении дополнительных операций в виде предварительного подогрева труб и соединительной детали с последующим свободным охлаждением для стабилизации температур в сборке на открытом воздухе с низкой температурой. Далее сварка в стандартном режиме. После сварки проводится дополнительная операция, которая заключается в управлении скоростью охлаждения через закладной нагреватель. Приводятся результаты исследований надмолекулярной структуры материала сварных соединений, выполненных по различным режимам сварки, включая рассматриваемую технологию сварки при низких температурах окружающего воздуха. Снимки надмолекулярной структуры материала сварных соединений были получены с помощью сканирующей электронной микроскопии. Анализ полученных изображений показал схожесть в характере и размерах надмолекулярных образований в структуре материала сварных соединений, выполненных при допустимых для сварки температурах воздуха по стандартному режиму и при низких температурах с предварительным подогревом, выравниванием температур и управлением скорости охлаждения.

Ключевые слова: сварка закладными нагревателями, полиэтиленовая труба, подогрев, сварные соединения, надмолекулярная структура, сферолит

THE INFLUENCE OF LOW AMBIENT TEMPERATURES ON THE FORMATION OF THE SUPRAMOLECULAR STRUCTURE OF WELDED JOINTS IN POLYETHYLENE PIPE

¹Danzanova E. V. ORCID ID 0000-0002-3445-0961,

²Kurkina I. I. ORCID ID 0000-0002-1076-0631

¹*Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Center Yakutsk Scientific
Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»,
Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation, e-mail: dhv4071@mail.ru;*

²*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov", Yakutsk, Russian Federation*

Electrofusion welding is widely regarded as the most reliable technique for joining polyethylene pipelines. Nevertheless, limitations on permissible ambient temperatures restrict the use of this method in regions with cold climates. The conventional approach, which employs heated shelters, is time-consuming and unsuitable for emergency repair and restoration of gas pipelines during winter. This study presents a low-temperature welding technology designed to expedite the construction and repair of polymer pipelines. The proposed method introduces additional steps, including preheating pipes and fittings, followed by free cooling to stabilize assembly temperatures in open-air, low-temperature environments. Welding is then conducted under standard conditions. Subsequently, the cooling rate is controlled using an embedded heater. The paper reports on investigations of the supramolecular structure of welded joints produced under various welding modes, including the proposed low-temperature technology. Scanning electron microscopy was used to obtain images of the supramolecular structure of the welded joints. Analysis of these images demonstrated similarities in the nature and size of supramolecular formations between joints welded at standard ambient temperatures and those produced at low temperatures with preheating, temperature equalization, and controlled cooling.

Keywords: electrofusion welding, polyethylene pipe, preheating, welded joints, supramolecular structure, spherulite

Введение

Технология сварки закладным нагревателем (ЗН) с использованием соединительных деталей широко применяется при монтаже полиэтиленовых трубопроводов. Этот метод часто является единственным эффективным способом формирования сложных узлов и применяется в ремонтных и восстановительных работах. Суть сварки закладным нагревателем заключается в соединении полимерных труб посредством нагрева, который осуществляется путём подачи электрического напряжения через металлическую спираль внутри сварочной электромуфты. Согласно нормативным документам, электромуфтовую сварку допускается выполнять при температуре окружающей среды не ниже минус 10 °С или при использовании защитных укрытий [1; 2]. Установка защитных укрытий и достижение в стенках труб и сварной детали требуемых для проведения сварки температур занимает продолжительное время [3]. В зимний период остановка подачи газа потребителям может привести к серьезным последствиям. Поэтому в Институте проблем нефти и газа СО РАН были разработаны способы сварки, которые позволяют быстро проводить ремонтные работы на полимерных трубопроводах при низких температурах окружающей среды без необходимости установки защитных укрытий [4; 5]. В отличие от стандартного способа сварки, предлагаемые технологии содержат операции предварительного подогрева свариваемых деталей и замедление процесса охлаждения сварного шва. Параметры предварительного подогрева, такие как мощность закладного нагревателя, продолжительность подогрева и выравнивания температур, рассчитываются с использованием численных методов решения задач теплопроводности [6; 7]. Эти параметры выбираются на основе условия обеспечения подходящих температурных распределений в зонах сварного шва и его термического влияния, которые должны находиться в пределах, допустимых для сварки. Замедление скорости охлаждения достигается изменением мощности нагревателя по расчетной временной зависимости. Зависимая от времени функция мощности нагревателя обеспечивает изменение температурного поля в сварном соединении, как при стандартной сварке. Требуемая функция мощности определяется решением обратной задачи теплопроводности. Задавая температурные данные стандартной сварки в качестве дополнительной информации, обратная задача теплопроводности по определению мощности нагревателя решалась градиентным

методом минимизации функционала, характеризующего меру отклонения расчетных и заданных температур [8; 9]. Рассчитанные параметры и функции управления охлаждением использовались для реализации режимов сварки изготовленным прототипом сварочного аппарата при температурах воздуха ниже минус 10 °С [10]. При проверке эффективности разработанных технологий сварки необходимо уделить внимание не только контролю качества полученных соединений разрушающими методами испытаний, но и исследованию надмолекулярной структуры сформированного материала сварных соединений. В связи с этим **целью работы** является установление влияния различных режимов сварки на структурообразование в материале сварных электромуфтовых соединений полиэтиленовых труб. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- проведение сварочных работ полиэтиленовых труб при различных условиях и температурах окружающего воздуха;
- исследование надмолекулярной структуры материала полученных сварных соединений.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые были выявлены размеры и количество надмолекулярных структур в материале сварных соединений, а также установлена зависимость этих параметров от режима сварки. Результаты работы могут быть использованы в разработке новых технологий сварки полимерных труб, в том числе при температурах окружающего воздуха ниже допустимых нормативными документами без строительства защитных укрытий.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели были проведены сварочные работы полиэтиленовых труб марки ПЭ100 и диаметром Ø 110 при температурах ОВ около минус 40 °С в натуральных условиях г. Якутска. За эталонные образцы сварных соединений брались соединения, изготовленные при комнатной температуре (23 °С). Сварка при минус 40 °С производилась двумя способами: по предложенной в ИПНГ СО РАН технологии изготовленным прототипом сварочного аппарата и технологией без предварительного подогрева стандартным оборудованием. Для упрощения изложения статьи предлагаются названия режимов сварки и их описание. Первый режим обозначим как «Прототип». При режиме «Прототип» сварка осуществлялась следующим образом: использовалась разработанная установка для сварки, с помощью которой при низких температурах ОВ (минус 40 °С)

производились предварительный подогрев, свободное охлаждение для стабилизации температур, сварка и управление скоростью охлаждения сварного соединения. Второй режим обозначим как «Стандарт». При режиме «Стандарт» сварка производилась на стандартном сварочном аппарате при температуре ОВ 23 °С с соблюдением всех требований. В данном режиме использовался сварочный аппарат HURNER HCU 300 (Германия). Третий режим обозначим как «Нарушение», т.к. при этом режиме сварка производилась при низких температурах (минус 40 °С) по режиму стандартной сварки. При этом режиме также использовался сварочный аппарат HURNER HCU 300. В современных сварочных аппаратах имеются температурные датчики, которые фиксируют температуру ОВ. При понижении допустимой температуры сварочный аппарат настроен на отключение. Для того чтобы произвести сварку при температуре ОВ минус 40 °С, для датчика температуры принудительно обеспечивалось требуемое допустимое значение (от минус 10 °С до минус 40 °С).

Процедуры подготовки и сборки свариваемых деталей проводились согласно действующим нормативным документам. После сварки соединения выдерживались 24 часа на месте проведения сварки.

Исследование надмолекулярной структуры. Одним из ключевых этапов оценивания качества сварных соединений полиэтиленовых труб является изучение надмолекулярной структуры его сформированного материала. Процесс формирования надмолекулярной структуры и размер образований в зоне сварки напрямую влияют на механическую прочность сварного шва. Надмолекулярная структура материала сварных соединений исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F (Япония).

Для начала исследований образцы сварных соединений подвергались шлифовке с помощью абразивных брусков разной зер-

нистости по классификации JIS, варьирующей от 1000 до 8000. Для предотвращения перегрева исследуемых образцов шлифовка проводилась в емкости с водой. После шлифовки поверхности образцов обрабатывались травлением с использованием паров кипящего толуола в течение 3 минут [11]. Пары кипящего толуола способствуют быстрому растворению межсферолитных областей в полимере. За счет этого на исследуемой поверхности образцов границы кристаллических образований визуализируются четче [12]. Для исследований были выбраны 3 участка, расположенных в зоне термического влияния (ЗТВ) со стороны электромuffты (рис. 1). Сканирование исследуемых поверхностей образцов проводилось при увеличении $\times 1000$.

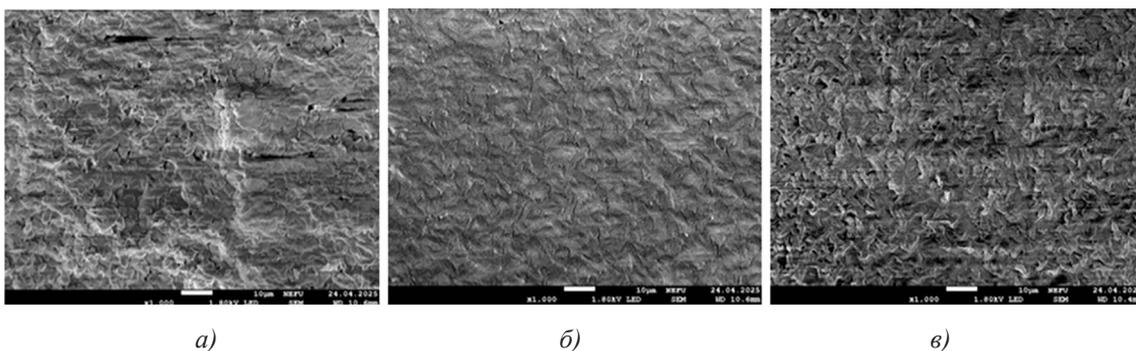
Результаты исследования и их обсуждение

Во время анализа снимков структуры акцентировалось внимание на размеры надмолекулярных образований, которые были распознаны как сферолиты [13]. Были выделены наиболее типичные участки и получено примерное распределение количества сферолитов по их различным размерам (рис. 2-4).

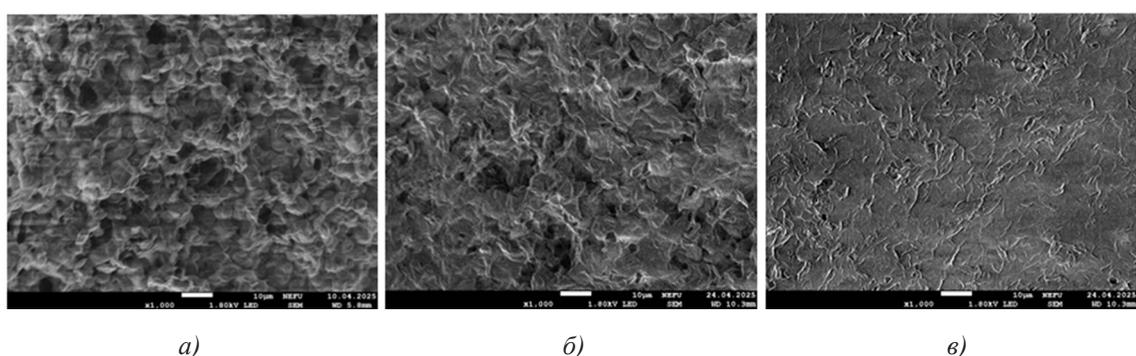
На рис. 5 приведено распределение размеров надмолекулярных образований на исследованных участках 1-3 относительно режимов сварки, в процентах. Несмотря на предварительный подогрев и управление скоростью охлаждения при режиме «Прототип», на сварной шов продолжает воздействовать низкая температура. Об этом свидетельствует наличие большего количества мелкокристаллической структуры, чем при стандартной сварке. Из графиков следует, что при режиме «Прототип» размеры сферолитов близки к размерам режима «Стандарт». На изображениях видно, что в случае режима «Нарушение» распределение размеров сферолитов значительно отличается от остальных образцов.



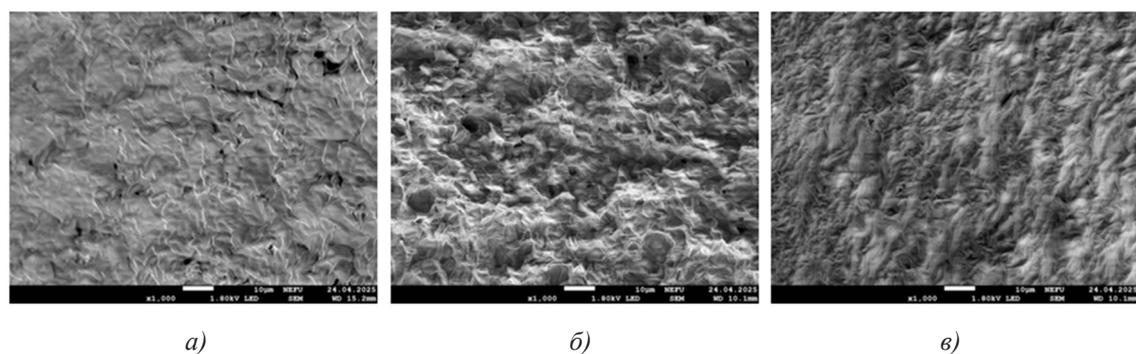
Рис. 1. Схема расположения исследуемых участков в сварном соединении
Примечание: изображение получено авторами в рамках выполнения данного исследования



*Рис. 2. Изображение структуры материала сварного соединения, произведенного при температуре -40°C в режиме «Прототип» на исследуемых участках, $\times 1000$: а) 1-й участок; б) 2-й участок; в) 3-й участок
Примечание: изображения получены авторами в рамках выполнения исследования*



*Рис. 3. Изображение структуры материала сварного соединения, произведенного при температуре $+23^{\circ}\text{C}$ в режиме «Стандарт» на исследуемых участках, $\times 1000$: а) 1-й участок; б) 2-й участок; в) 3-й участок
Примечание: изображения получены авторами в рамках выполнения исследования*



*Рис. 4. Надмолекулярная структура материала сварного соединения, произведенного при температуре $T_{\text{ов}} = -40^{\circ}\text{C}$ в режиме «Нарушение», $\times 1000$: а) 1-й участок; б) 2-й участок; в) 3-й участок
Примечание: изображения получены авторами в рамках выполнения исследования*

Таблица демонстрирует распределение надмолекулярных образований различного размера в областях 1–3 образцов сварных соединений. Интерпретация полученных экспериментальных результатов показывает, что в режиме «Нарушение», за счет ускоренного охлаждения, доля мел-

кокристаллической структуры достигает практически половины суммарного количества сформировавшихся образований. Сравнительный анализ образцов режимов «Прототип» и «Стандарт» выявил преобладание доли средне- и крупноразмерных сферолитов.

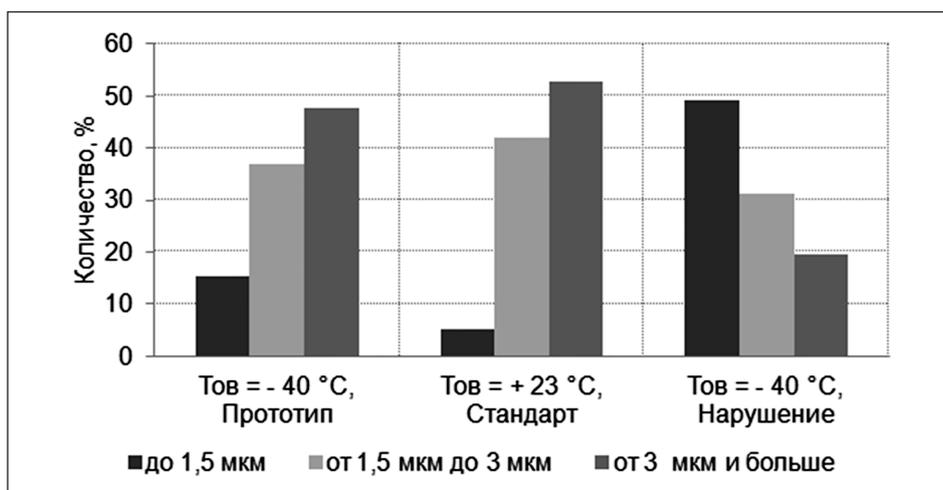


Рис. 5. Доля надмолекулярных образований в материале сварных соединений в процентном выражении
Примечание: составлено авторами в рамках выполнения исследования

Распределение количества надмолекулярных образований в исследуемых участках по их размерам в зависимости от режима сварки

Исследуемый участок	Тов= -40 °С, «Прототип»	Тов= +23 °С, «Стандарт»	Тов = -40 °С, «Нарушение»
Размеры образований до 1,5 мкм			
1	20,8	3,0	56,8
2	21,7	8,5	40,0
3	4,4	4,1	52,5
Размеры образований от 1,5 до 3 мкм			
1	40,3	43,0	30,5
2	43,5	41,9	33,6
3	27,5	41,2	29,5
Размеры образований от 3 мкм и больше			
1	39,0	54,0	12,6
2	34,8	49,6	26,4
3	68,1	54,7	18,0

Примечание: данные приведены в процентном соотношении. Таблица составлена авторами по результатам данного исследования.

При режиме «Прототип» при температуре минус 40 °С, за счет снижения скорости охлаждения сварного шва, структура участка 3 характеризуется снижением доли сферолитов меньшего размера и соответствующим увеличением крупнокристаллических образований до величины порядка 70% от совокупного объема микроструктурных элементов исследуемого образца. В то же время в сварных соединениях по режимам «Прототип» и «Стандарт» количество мелких сферолитов становится сопоставимым. В целом полученные дан-

ные по размерам сферолитов хорошо согласуются с утверждениями в работах ряда авторов [14; 15].

Заключение

Получены размеры и примерное количество надмолекулярных образований в материале в конкретных областях сварных соединений полиэтиленовых труб. Показано, что изменение условий сварки имеет решающее значение при формировании структуры материала. Так, при высокой скорости остывания в материале сварного соедине-

ния формируется значительное количество мелких сферолитов размерами до 1 мкм. При сварке в условиях естественно низких температур необходимо замедлить темп остывания, например подачей определенного напряжения через закладной нагреватель электромуфты. Исследованиями структуры материала показано, что предложенный режим сварки, разработанный для использования при низких температурах окружающего воздуха, устанавливает термический цикл в сварном соединении, как при стандартной сварке при комнатной температуре. Таким образом, при установлении температурного поля в сварном соединении при низких температурах путем подогрева и управляемого охлаждения, как при допустимых температурах (в данном случае при 23 °С), формируется практически идентичная надмолекулярная структура в материале полиэтилена сварного шва.

Список литературы

1. ГОСТ Р 71408-2024. Сварка термопластов. Процедуры сварки закладными нагревателями полиэтиленовых труб и соединительных деталей: национальный стандарт. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 24 с.
2. СП 42-103-2003. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. Свод правил. М.: Полимергаз, ФГУП ЦПП, 2004. 86 с.
3. Прокопьев Н. В., Кимельблат В. И. Практические проблемы сварки полиэтиленовых труб // Полимерные трубы. 2015. № 2 (48). С. 60-63. URL: https://journal.plastic-pipes.ru/sites/default/files/journal/2015/05/journal_pp_2015-2_60-63.pdf (дата обращения: 15.12.2025).
4. Старостин Н. П., Герасимов А. И., Данзанова Е. В., Аммосова О. А. Способ сварки полимерных труб соединительными деталями с закладным нагревателем // Патент РФ № 2744141. Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». 2019. МПК F16L 47/03 B29C 65/34; заявлено 13.05.2019; опубл. 03.03.2021 Бюл. № 7.
5. Старостин Н. П., Ботвин Г. В., Данзанова Е. В. Способ муфтовой сварки полимерных труб // Патент РФ № 2450202. Патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт проблем нефти и газа СО РАН. 2010. МПК F16L 47/03 B29C 65/34; заявлено 19.07.2010; опубл. 10.05.2012 Бюл. № 13.
6. Старостин Н. П., Аммосова О. А., Петров Д. Д. Управление охлаждением при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб при низких температурах с помощью закладного нагревателя // Сварка и диагностика. 2022. № 3. С. 51-55. DOI: 10.52177/2071-5234_2022_03_51.
7. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Управление тепловым процессом электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Сварка и диагностика. 2017. № 5. С. 21-25. EDN: ZNAFBP.
8. Старостин Н. П., Аммосова О. А., Петров Д. Д. Обратная задача определения мощности закладного нагревателя при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур // Сварка и диагностика. 2023. № 3. С. 27-32. DOI: 10.52177/2071-5234_2023_03_27.
9. Алифанов О. М., Будник С. А., Ненарокомов А. В., Титов Д. М. Обработка датчиков тепловых потоков на основе методологии обратных задач // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 4. С. 7-17. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-4-7-17.
10. Петров Д. Д. Прототип сварочного аппарата для электромуфтовой сварки полимерных труб при низких температурах окружающего воздуха: Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В. П. Ларионова (г. Якутск, 11-15 сентября 2023 г.). Киров: Издательство МЦИТО, 2023. С. 464-469. EDN: LYCZZS.
11. Каган Д. Ф., Попова Л. А. Применение метода травления при микроскопическом исследовании надмолекулярной структуры блоков полиэтилена высокой плотности // Высокомолекулярные соединения. 1970. Т. 12. № 12. С. 2774-2777. URL: http://polymsci.ru/static/Archive/1970/VMS_1970_T12_12/VMS_1970_T12_12_2774-2777.pdf (дата обращения: 15.11.2025).
12. Охлопкова Т. А. Триботехнические материалы на основе СВМПЭ, модифицированного наноразмерными оксидными керамиками: дис. ... канд. техн. наук. Томск: Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2018. 160 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54456902> (дата обращения: 15.12.2025).
13. Шишонков М. В. Химия высокомолекулярных соединений: учебное пособие. Минск: Вышэйшая школа. 2021. 624 с. URL: <https://www.gstu.by/sites/default/files/files/resources/2023/05/shishonok.pdf> (дата обращения: 20.11.2025). ISBN: 9789850633859.
14. Кайгородов Г. К., Каргин В. Ю. Влияние скорости охлаждения полиэтиленового сварного шва на его прочность // Трубопроводы и экология. 2001. № 2. С. 13-14. URL: https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=9863 (дата обращения: 20.11.2025).
15. Шурайц А. Л., Каргин В. Ю., Вольнов Ю. Н. Газопроводы из полимерных материалов: Пособие по проектированию, строительству и эксплуатации. Саратов: Журнал «Волга – XXI век». 2007. 612 с. URL: <https://scinet.ru/disk/file/23674> (дата обращения: 20.09.2025). ISBN: 978-5-91320-003-7.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. №122011100162-9).

Financing: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (reg. No. 122011100162-9).