УДК 628.147.22
DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-33-40

РАЗРАБОТКА БИТУМНО-ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЗАЩИТЫ И РЕМОНТА НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ОТ КОРРОЗИОННЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Т. В. АТВИНОВСКАЯ[1], В. П. ДУБОДЕЛ[2], И. И. ЗЛОТНИКОВ[1], В. М. ШАПОВАЛОВ[3]

[1]Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

[2]Учреждение образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина», Республика Беларусь

[3]Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель

Коррозия металлических трубопроводов и оборудования наносит большой материальный и экономический ущерб всей нефтегазовой промышленности. Она приводит к преждевременному износу линейной части трубопроводов, агрегатов, установок, сокращает межремонтные сроки оборудования, вызывает дополнительные потери транспортируемого продукта. Поэтому защита от коррозионного разрушения стальных трубопроводов и нефтепромыслового оборудования является важной задачей современной нефтяной промышленности. В настоящее время разработано и применяется большое количество материалов, обеспечивающих противокоррозионную защиту. Одним из наиболее экономичных и эффективных вариантов таких материалов для предотвращения коррозионного повреждения трубопроводов является использование битумно-полимерных композиций, что связано с простой технологией их изготовления и дешевизной компонентов. В статье рассмотрено модифицирующее влияние вторичного полиэтилена и нефтяного шлама на битумы. Показано, что такие битумно-полимерные композиции могут совмещать в себе качества, присущие полимерам (высокая эластичность в сочетании с механической прочностью) и битумам. Особенно эффективным разработанный материал может быть при проведении выборочного ремонта поврежденных участков трубопроводов и оборудования для восстановления защитных свойств изоляционных покрытий.

Ключевые слова: защита от коррозии, трубопровод, битумно-полимерное покрытие, вторичные полимеры, нефтешлам, температура размягчения, адгезия.

Для цитирования. Разработка битумно-полимерного композиционного материала для защиты и ремонта нефтепромысловых трубопроводов и оборудования от коррозионных и механических повреждений / Т. В. Атвиновская, В. П. Дубодел, И. И. Злотников, В. М. Шаповалов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 2 (101). – С. 33–40. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-33-40

DEVELOPMENT OF A BITUMEN-POLYMER COMPOSITE MATERIAL FOR THE PROTECTION AND REPAIR OF OIL FIELD PIPELINES AND EQUIPMENT FROM CORROSION AND MECHANICAL DAMAGE

T. V. ATVINOVSKAYA[1], V. P. DUBODEL[2], I. I. ZLOTNIKOV[1], V. M. SHAPOVALOV[3]

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

[2]Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, the Republic of Belarus

[3]V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel

Corrosion of metal pipelines and equipment causes great material and economic damage to the entire oil and gas industry. It leads to premature wear of the linear portion of pipelines, units, installations, reduces the time between equipment repairs, and causes additional losses of the transported product. Therefore, protection against corrosion of steel pipelines and oilfield equipment is an important task of the modern oil industry. Currently, a large number of materials have been developed and are used that provide anti-corrosion protection. One of the most economical and effective options for such materials to prevent corrosion damage to pipelines is the use of bitumen-polymer compositions, which is associated with the simple technology of their manufacture and the cheapness of the components. The article considers the modifying effect of secondary polyethylene and oil sludge on bitumen. It is shown that such bitumen-polymer compositions can combine the qualities inherent in polymers (high elasticity in combination with mechanical strength) and bitumen. The developed material can be especially effective when carrying out selective repairs of damaged sections of pipelines and equipment to restore the protective properties of insulating coatings.

Keywords: corrosion protection, pipeline, bitumen-polymer coating, secondary polymers, oil sludge, softening temperature, adhesion.

For citation. Atvinovskaya T. V., Dubodel V. P., Zlotnikov I. I., Shapovalov V. M. Development of a bitumen-polymer composite material for the protection and repair of oil field pipelines and equipment from corrosion and mechanical damage. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 2 (101), pp. 33–40 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-33-40

Введение

Важной задачей современной нефтедобывающей промышленности и нефтепромыслового машиностроения является защита от коррозионного разрушения стальных трубопроводов, изделий и оборудования, применяемого на различных этапах добычи, транспортировки и переработки нефти. Большинство промысловых трубопроводов и оборудования эксплуатируются в условиях воздействия коррозионно-активных веществ, атмосферных и климатических факторов и поэтому легко подвергаются различным видам коррозии. Большие объемы металлозатрат, а также жесткие условия эксплуатации нефтегазопромыслового оборудования делают эту проблему одной из центральных, определяющих технико-экономическую эффективность всей нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отрасли. Кроме того, коррозионное разрушение нефтяных трубопроводов создает аварийные ситуации, которые несут за собой и экологические проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды. Все эти факторы в совокупности приводят к увеличению себестоимости добычи нефти [1–4]. Надежность как магистральных трубопроводов, так и нефтепромыслового оборудования в целом можно обеспечить своевременным и качественным проведением их профилактического, капитального и выборочного ремонта путем восстановления защитных свойств изоляционных покрытий [5].

Защитные и изоляционные покрытия, применяемые в нефтегазовой промышленности, должны обладать высокой механической прочностью и эластичностью, а также хорошей адгезией к металлу, быть водонепроницаемыми, иметь высокие диэлектрические свойства и стабильность свойств при изменении температуры (не терять механической прочности при высоких температурах и не охрупчиваться при низких). Кроме того, материалы, входящие в состав покрытия, должны быть недефицитными, недорогими, обладать высокой биостойкостью и долговечностью [3–5].

На сегодняшний день разработано и применяется много материалов, обеспечивающих противокоррозионную защиту магистральных трубопроводов и оборудования. Это полимерные ленты и обертки, полимерные липкие ленты, ленты и пленки термоусаживающиеся на основе радиационно-модифицированных термопластов, полимерно-битумные ленты, битумные и битумно-полимерные грунтовки и мастики, битумные и термореактивные полимерные материалы для изоляции стыков, колен и отводов трубопроводов и изоляции внутренней поверхности труб [3, 5, 6].

Несмотря на большое количество применяемых полимерных и битумно-полимерных материалов, обеспечивающих противокоррозионную защиту трубопроводов нефтепромыслового оборудования, в процессе эксплуатации проявляются локальные дефекты, связанные как с изменением свойств защитных материалов под воздействием атмосферных и климатических факторов и механических повреждений, так и нарушением технологии при изготовлении и ремонтах защитных покрытий. Поэтому для обеспечения высокого качества ремонтных работ возникает необходимость разработки защитно-изоляционного материала многофункционального назначения с повышенной стойкостью к воздействию агрессивных веществ и внешних факторов и сравнительно низкой стоимостью. Одним из наиболее экономичных и эффективных вариантов такого материала для предотвращения коррозионного повреждения трубопроводов является использование битумно-полимерных композиций, что связано с простотой технологии их изготовления, дешевизной и недефицитностью компонентов.

Цель работы – изучение перспектив использования вторичных полимеров и отходов нефтяной промышленности (нефтешлама) для изготовления битумно-полимерного композиционного материала с высокими коррозионно-механическими и технико-экономическими свойствами.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использовали битум нефтяной строительный марки БН 70/30 по ГОСТ 6617-76 и вторичный полиэтилен высокого давления (ПЭВД) гранулированный марки А1, который изготавливается из измельченных отходов пленочных изделий на ОАО Белвторполимер (г. Гродно). Выбор ПЭВД основан на том, что из всех вторичных термопластичных полимеров, достаточно широко представленных на рынке Республики Беларусь (полиэтилен низкого давления, полипропилен, политетрафторэтилен, полиамид), ПЭВД имеет самую низкую температуру плавления, что способствует более легкому совмещению с битумом, а также самую высокую эластичность (относительное удлинение при разрыве) и более низкую стоимость. Содержание ПЭВД в исследуемых битумно-полимерных композиционных материалах варьировали в пределах от 0 до 20 мас. %. При более высоком содержании полимера возникают технологические трудности при изготовлении и применении материала, так как увеличение содержания ПЭВД приводит к значительному повышению вязкости. Для снижения вязкости и увеличения эластичности битумно-полимерного материала использовали нефтяные шламы Мозырского нефтеперерабатывающего завода в количестве до 14 мас. %.

Модельные битумно-полимерные композиции изготавливали по следующей технологии. В обогреваемую металлическую емкость загружали битум и разогревали до температуры 170–180 °С. В полученный расплав вводили отмеренное количество ПЭВД и перемешивали до полной гомогенизации смеси. Затем смесь охлаждали до температуры 150–160 °С и использовали для приготовления образцов путем свободной заливки в кюветы различного размера, изготовленные из алюминиевой фольги.

Определяли следующие показатели: температуру размягчения по ГОСТ 32054-2013, глубину проникания иглы по ГОСТ 11501-78 при 25 °С и нагрузке 100 г, растяжимость при 25 °С по ГОСТ 11505-75 и прочность сцепления со сталью (адгезию к стали). Прочность сцепления определяли при температуре 20 °С на универсальном измерительном комплексе INSTRON 8801 методом нормального отрыва стальных цилиндрических образцов диаметром 20 мм, склеенных основаниями расплавом исследуемого состава и выдержанных в течение трех суток при температуре 20 ± 5 °С.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена зависимость температуры размягчения битума, а на рис. 2 – зависимость адгезии битума к стали от содержания в нем вторичного ПЭВД.

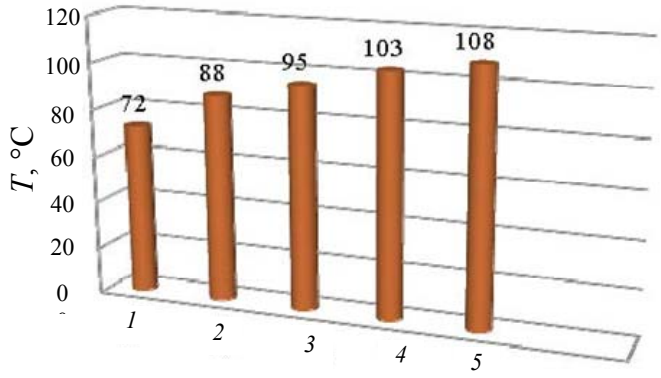


Рис. 1. Зависимость температуры размягчения битума от содержания в нем ПЭВД, мас. %:
1 – битум исходный; *2* – 5; *3* – 10; *4* – 15; *5* – 20

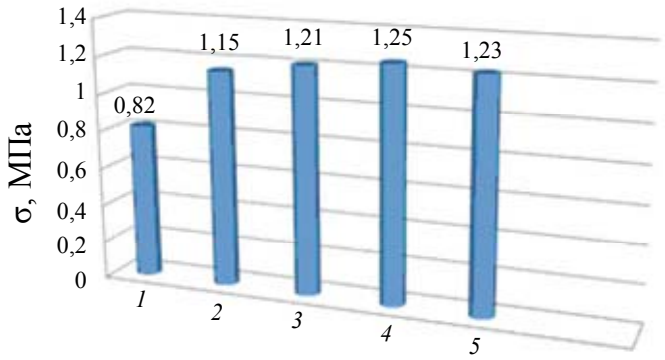


Рис. 2. Зависимость адгезии битума к стали от процентного содержания в нем ПЭВД, мас. %:
1 – битум исходный; *2* – 5; *3* – 10; *4* – 15; *5* – 20

Как следует из представленных данных, повышать содержание ПЭВД в битуме свыше 15 мас. % нецелесообразно, так как адгезионная прочность начинает снижаться, а температура размягчения композиционного материала не может быть выше тем-

пературы начала плавления ПЭВД (около 110 °С). Поэтому содержание ПЭВД в битуме в пределах 10–15 мас. % обеспечивает оптимальное сочетание прочностных и адгезионных свойств.

В табл. 1 приведены основные свойства полученного битумно-полимерного материала при содержании в нем 15 мас. % ПЭВД.

Таблица 1

Свойства битумно-полимерного материала

Показатель	Значение	
	Разработанный материал	Битум исходный
Температура размягчения, °С	103	72
Адгезия к стали, МПа	1,25	0,82
Глубина проникания иглы при 25 °С, мм	2,2	3,1
Растяжимость при 25 °С, см	3,4	6,0

Как следует из полученных данных, введение в нефтяной битум вторичного ПЭВД в количестве 15 мас. % приводит к повышению теплостойкости на 43 %, адгезии к стали на 52 % и механической прочности (глубина проникания иглы снижается на 30 %), но при этом значительно снижается эластичность материала (растяжимость уменьшается почти в два раза), что может приводить к повышенной хрупкости готовых защитных покрытий, особенно при низких температурах.

В связи с этим была поставлена задача повышения эластичности битумно-полимерного материала. Основываясь на литературных данных [8] и ранее проведенных исследованиях [9], для повышения эластичности битумно-полимерного материала использовали нефтяные шламы Мозырского нефтеперерабатывающего завода, которые образуются в процессе дренирования и пропарки нефтепроводов и резервуаров для хранения и транспортирования нефти.

Нефтяные шламы представляют собой сложную многокомпонентную смесь нефтепродуктов, воды и механических примесей. Твердые механические примеси в исследуемых образцах нефтешлама состоят из оксидов металлов (в основном железа) с небольшим содержанием глинисто-песчаных пород. В нефтепродуктах кроме летучих фракций присутствует небольшое количество асфальтосмолопарафиновых веществ. С точки зрения физической химии нефтешлам является агрегативно-устойчивой водно-нефтяной эмульсией с дисперсной минеральной фазой, образованной частицами оксидов металлов. Нефтяные шламы собирают в нефтешламонакопителях на нефтеперерабатывающих заводах и промывочно-пропарочных станциях локомотивных и вагонных депо, поэтому они представляют большую проблему для нефтеперерабатывающей и железнодорожной отрасли. Нефтешламонакопители являются долговременными источниками загрязнения окружающей среды нефтепродуктами вследствие их испарения с открытых поверхностей и их миграции в грунтовые воды. Такие отходы слабо подвержены естественному метаболизму (биоразложение, окисление, фотохимические реакции), поэтому их захоронение, как и сжигание значительно загрязняет окружающую среду. В связи с этим поиск путей рационального использования и утилизации нефтешламов является важной экологической и социально значимой задачей [10].

Средний состав и свойства используемого нефтешлама Мозырского нефтеперерабатывающего завода приведены в табл. 2.

Таблица 2

Состав и свойства нефтешлама

Показатель	Значение показателя
Плотность при 20 °С, кг/м^3	880–910
Вода, мас. %	15–20
Механические примеси, мас. %	8–14
Нефтепродукты, мас. %	Остальное

При использовании нефтешлама материал изготавливали по следующей технологии. В обогреваемую металлическую емкость загружали битум и нефтешлам, разогревали до температуры 80–90 °С и выдерживали до полного удаления воды. Затем температуру повышали до 170–180 °С и в полученный расплав вводили отмеренное количество ПЭВД. Смесь перемешивали до полной гомогенизации, охлаждали до 150–160 °С и использовали для изготовления образцов.

В табл. 3 приведены свойства битумно-полимерного материала, содержащего 15 мас. % ПЭВД, в зависимости от содержания в нем нефтешлама.

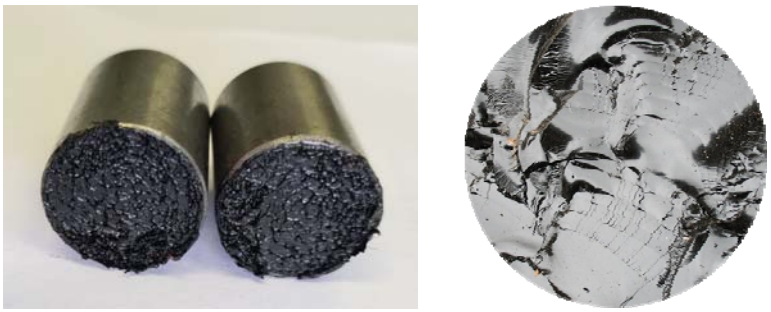
Таблица 3

Влияние нефтешлама на свойства битумно-полимерного материала

Показатель	Содержание нефтешлама, мас. %					
	0	2	4	8	12	14
Температура размягчения, °С	103	98	94	90	87	80
Адгезия к стали, МПа	1,25	1,25	1,20	1,20	1,16	1,05
Глубина проникания иглы при 25 °С, мм	2,2	2,2	2,4	2,7	3,0	4,7
Растяжимость при 25 °С, см	3,4	4,0	4,8	6,2	7,4	8,6

Как следует из приведенных в табл. 3 данных, введение нефтешлама в битумно-полимерный материал в количестве до 12 мас. % незначительно снижает его температуру размягчения, адгезию к стали и прочность (глубину проникновения иглы), но заметно увеличивает эластичность материала. Увеличение содержания нефтешлама свыше 12 мас. % приводит к более резкому падению всех показателей, поэтому оптимальным количеством нефтешлама в материале следует считать 10–12 мас. %.

На рис. 3, *а* приведена фотография адгезионного разрушения стальных образцов, склеенных основаниями битумно-полимерным материалом, содержащим 15 мас. % ПЭВД и 8 мас. % нефтешлама.



а) *б*)

Рис. 3. Вид адгезионного разрушения образцов, склеенных разработанным битумно-полимерным материалом (*а*) и чистым битумом (*б*). Увеличение ×30

На фотографии хорошо видно, что разрушение имеет вязкоупругий характер, что свидетельствует о высокой эластичности полученного битумно-полимерного композиционного материала, а разрушение чистого битума всегда носит хрупкий характер (рис. 3, *б*) [9].

Достоинство разработанного материала для антикоррозионной защиты нефтепроводов и нефтепромыслового оборудования заключается в том, что он изготавливается на основе местного сырья и отходов производства, не требует сложного оборудования и может успешно применяться при проведении выборочного ремонта поврежденных участков ручным способом.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что использование отходов нефтеперерабатывающего производства (нефтешлама) и вторичного ПЭВД в качестве компонентов битумно-полимерных материалов позволяет получать материалы, пригодные для защиты нефтепромысловых трубопроводов и оборудования от коррозионных и механических повреждений. Особенно эффективным материал может быть при проведении выборочного ремонта поврежденных участков оборудования для восстановления защитных свойств изоляционных покрытий ручным способом. Также материал можно успешно использовать в строительстве для защиты бетонных и металлических конструкций от атмосферного воздействия и почвенной коррозии. Разработанный материал относится к составам горячего нанесения с рабочей температурой 150–160 °С. Для его изготовления и применения не требуется специальное и сложное оборудование, необходимо наличие только обычного битумоварочного котла. Достоинством материала является невысокая температура плавления и отсутствие хрупкости. Кроме того, использование рассмотренных отходов позволит частично решить проблему их утилизации и существенно снизить себестоимость готовой продукции.

Литература

1. Конев, А. В. Противокоррозионная защита магистральных трубопроводов и промысловых объектов : учеб.-практ. пособие по вопросам теории и расчета / А. В. Конев, Л. М. Маркова, В. А. Иванов. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2003. – 211 с.
2. Мустафин, Ф. М. Защита трубопроводов от коррозии / Ф. М. Мустафин, Л. И. Быков, А. Г. Гумеров. – СПб. : Недра, 2007. – 708 с.
3. Поварова, Л. В. Причины коррозии нефтепромысловых трубопроводов и способы их защиты / Л. В. Поварова, М. А. Самарин, Р. А. Тараник // Булатовские чтения : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Краснодар, 31 марта 2021 г. : сб. ст. : в 2 т. Т. 2. – Краснодар : Юг, 2021. – С. 32–39.
4. Моисеева, Л. С. Факторы, влияющие на коррозионную повреждаемость и аварийность нефтепромысловых трубопроводов / Л. С. Моисеева, А. Е. Айсин, С. А. Гуров // Коррозия: металлы, защита. – 2007. – № 2. – С. 12–20.
5. Ревин, П. О. Исследование методов ремонта изоляционных покрытий магистральных нефтепроводов в полевых условиях / П. О. Ревин, А. В Макаренко, А. А. Губенков // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2021. – № 3–4. – С. 50–56.
6. Полимерные материалы для защиты нефтепроводов / В.А. Гольдаде, И. В. Царенко, М. П. Кульгейко, Е. Н. Волнянко // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2016. – Т. 11, № 1. – С. 75–80.
7. Защита трубопроводов от коррозии с использованием современных изоляционных покрытий. – URL: http://www.ankort.ru/story2.php (дата обращения: 22.01.2025).

8. Сафин, С. Г. Битумно-полимерные гидроизоляционные материалы с использованием нефтешламов / С. Г. Сафин, А. Н. Черепанов, И. А. Шиганов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2020. – № 3 (294). – С. 51–54.
9. Дубодел, В. П. Гидроизоляционные битумные материалы с использованием отходов нефтеперерабатывающего и масложирового производства / В. П. Дубодел, И. И. Злотников, В. М. Шаповалов // Материалы, технологии, инструменты. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 54–57.
10. Бруева, О. Ю. Утилизация нефтесодержащих отходов, образующихся при зачистке резервуаров на нефтеперерабатывающих предприятиях / О. Ю. Бруева, М. В. Васина // Экологические проблемы региона и пути их разрешения : материалы XV Междунар. науч.-практ. конф., Омск, 13–14 мая 2021 г. / Ом. гос. техн. ун-т ; под общ. ред. Е. Ю. Тюменцевой. – Омск, 2021. – С. 105–109.

References

1. Konev A. V., Markova L. M., Ivanov V. A. *Corrosion protection of trunk pipelines and field facilities*. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2003. 211 p. (in Russian).
2. Mustafin F. M., Bykov L. I., Gumerov A. G. *Corrosion protection of pipelines.* Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2007. 708 p. (in Russian).
3. Povarova L. V., Samarin M. A., Taranik R. A. Causes of corrosion of oilfield pipelines and methods of their protection. *Bulatovskie chteniya: materialyi V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Krasnodar, 31 marta 2021 g.* [Bulatov readings: proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, March 31, 2021]. Krasnodar, Yug Publ., 2021, vol. 2, pp. 32–39 (in Russian).
4. Moiseeva L. S., Aysin A. E., Gurov S. A. Faktoryi, vliyayuschie na korrozionnuyu povrezhdaemost i ava-riynost neftepromyislovyih truboprovodov. *Korroziya: metallyi, zaschita*, 2007, no. 2, pp. 12–20 (in Russian).
5. Revin P. O., Makarenko A. V., Gubenkov A. A. Study of methods of repair of insulation coatings of trunk oil pipelines in field conditions. *Territoriya «NEFTEGAZ» = Territoriya "NEFTEGAS"*, 2021, no. 3–4, pp. 50–56 (in Russian).
6. Goldade V. A., Tsarenko I. V., Kulgeyko M. P., Volnyanko E. N. Polymeric materials for protection of oil pipelines. *Chrezvyichaynyie situatsii: obrazovanie i nauka*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 75–80 (in Russian).
7. Corrosion protection of pipelines using modern insulating coatings. URL: http//www.ankort.ru/story2.php (accessed 29.01.2025)
8. Safin S. G., Cherepanov A. N., Shiganov I. A. Bitumen-polymer waterproofing materials using oil sludge. *Zaschita okruzhayuschey sredyi v neftegazovom komplekse*, 2020, no. 3 (294), pp. 51–54 (in Russian).
9. Dubodel V. P., Zlotnikov I. I., Shapovalov V. M. Waterproofing bituminous materials with the use of oil refining and oil and fat production wastes. *Materialyi, tehnologii, instrumentyi*, 2012, vol. 17, no. 3, pp. 54–57 (in Russian).
10. Brueva O. Yu., Vasina M. V. Disposal of oily waste generated during tank cleaning at oil refineries. *Ekologicheskie problemy regiona i puti ikh razresheniya: materialy XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Omsk, 13–14 maya 2021 g.* [Environmental problems of the region and ways to solve them: materials of the XV International. scientific-practical. conf., Omsk, May 13–14, 2021]. Omsk, Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2021, pp. 105–109 (in Russian).

Поступила 20.01.2025 г.