

УДК 502.51:504.5:665.6
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4311
Шифр специальности ВАК 1.4.4

Гидрофобные сорбенты на основе ультратонких полимерных волокон для улавливания нефтепродуктов

И.А. Лысак[✉], Г.В. Лысак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ doc@tpu.ru

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена увеличением негативных последствий добычи углеводородов на водные экосистемы и ужесточением законодательных норм по сбросу загрязненных нефтью и нефтепродуктами вод в морские акватории. Среди различных способов, применяемых для удаления нефти из водных растворов, самым целесообразным является адсорбционный метод из-за высокой степени очистки, безопасности, доступности, технологичности, универсальности применения. Синтетические материалы на основе ультратонких волокон обладают оптимальными характеристиками для изготовления на их основе сорбентов для удаления нефти. Однако широкомасштабное применение данных материалов ограничивается их высокой стоимостью, сложностью изготовления, при котором исключается вторичное использование полимеров в качестве исходного сырья. В связи с этим растет потребность в экономически и экологически эффективных гидрофобных материалах для сорбционной очистки водных сред от нефти и нефтепродуктов. **Цель:** установить сорбционные свойства гидрофобных волокнистых материалов, полученных способом пневматического формирования, для их применения в качестве эффективных сорбентов углеводородов для ликвидации разливов нефти в море и очистки воды на нефтедобывающих платформах. **Объекты:** сорбенты на основе полипропиленовых и полиэтилентерефталатных ультратонких волокон. **Методы:** гравиметрический, спектральный анализ, просвечивающая электронная микроскопия, газовая хроматография. **Результаты.** Представлены результаты исследования сорбционных свойств необработанных ультратонких волокон, полученных методом пневматического распыления и модифицированных микроволновым излучением. Проведен сравнительный анализ водопоглощения и влияния на степень сорбции времени контакта и кислотности среды образцов, полученных из гидрофобных полимеров. Выявлена перспективность применения сорбентов на основе полипропиленовых ультратонких волокон для извлечения нефтепродуктов из водных сред. Установлено что модификация снижает водопоглощение полипропиленовых сорбентов и приводит к незначительному снижению сорбционных свойств вследствие изменения надмолекулярной структуры образцов полипропиленовых волокон.

Ключевые слова: Ультратонкие волокна, синтетические сорбенты, адсорбция нефти, адсорбция воды, кинетические зависимости.

Для цитирования: Лысак И.А., Лысак Г.В. Гидрофобные сорбенты на основе ультратонких полимерных волокон для улавливания нефтепродуктов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 143–151. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4311

UDC 502.51:504.5:665.6
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4311

Hydrophobic sorbents based on ultrathin polymer fibers for trapping oil products

I.A. Lysak[✉], G.V. Lysak

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ doc@tpu.ru

Abstract

Relevance. Increasing negative effects of hydrocarbon production on aquatic ecosystems and tightening of legislative norms on discharge of oil and oil product contaminated water into marine waters. Among various methods used to remove oil from aqueous solutions the most appropriate one is adsorption. It is explained by its high degree of purification, safety, availability, manufacturability, universality of application. Synthetic materials based on ultrafine fibers have optimal characteristics for manufacturing sorbents for oil removal on their basis. However, the large-scale application of these materials is limited by their high cost, complexity of manufacturing, which excludes the secondary use of polymers as feedstock. In this regard, there is a growing need for economically and environmentally effective hydrophobic materials for sorptive treatment of aqueous media from oil and petroleum products. **Aim.** To determine sorption properties of hydrophobic fibrous materials produced via pneumatic formation for use as effective hydrocarbon sorbents for liquidation of oil spills in sea and water treatment on oil production platforms. **Objects.** Sorbents based on polypropylene and polyethylene terephthalate ultrafine fibers. **Methods.** Gravimetric, spectral analysis, transmission electron microscopy, gas chromatography. **Results.** The paper introduces the results of investigation of sorption properties of untreated ultrafine fibers obtained by pneumatic atomization and modified by microwave radiation. The authors have carried out the comparative analysis of water absorption and the influence of contact time and acidity of the medium on the degree of sorption of samples obtained from hydrophobic polymers. Promising application of sorbents based on polypropylene ultrathin fibers for oil products extraction from aqueous media was revealed. It is established that modification reduces water absorption of polypropylene sorbents and leads to an insignificant decrease in sorption properties due to changes in the supramolecular structure of polypropylene fiber samples.

Keywords: Ultrathin fibers, synthetic sorbents, oil adsorption, water adsorption, kinetic dependences.

For citation: Lysak I.A., Lysak G.V. Hydrophobic sorbents based on ultrathin polymer fibers for trapping oil products. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 143–151. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4311

Введение

В последние годы угроза отрицательных экологических последствий добычи углеводородов растет. Аварийные разливы нефти в морских акваториях отрицательно влияют на окружающую среду [1, 2]. Сброс загрязненных нефтью и нефтепродуктами вод в морские акватории регулируются международными правовыми актами и разрешен только после их очистки [3]. Ликвидация разлива нефти в море и очистка воды на нефтедобывающих платформах является сложной и актуальной проблемой. Использование непригодных мер и материалов может нанести серьезный ущерб окружающей среде. Среди различных способов, применяемых для удаления нефти из водных растворов, наиболее целесообразным является адсорбционный метод из-за высокой степени очистки, безопасности, доступности, технологичности, универсальности применения [4–6]. Материалы, которые используются для удаления углеводородов из водных сред [7], должны обладать нефтеемкостью, гидрофобностью, влагостойкостью, плавучестью. В качестве сорбентов применяются различные органические, неорганические, искусственные и синтетические материалы [8–12]. Неорганические на минеральной основе сорбенты (глина, перлит и др.) имеют небольшую нефтеемкость, низкую механическую прочность и плавучесть. Повторное их использование практически невозможно из-за деструкции материалов при извлечении нефти путем отжимания или других процедур с применением давления. Использование природных органических сорбентов, в том числе сельскохозяйственных отходов и побоч-

ных продуктов лесоперерабатывающей, пищевой отрасли, ограничено их гидрофильностью и низкой плавучестью. Искусственные сорбенты, полученные путем модификации природных веществ, лишены недостатков прекурсоров. Однако для их производства зачастую необходимы токсичные реагенты и сложное аппаратное оформление процесса.

Наиболее часто применяются синтетические сорбенты на основе полистирола, полипропилена, полиэфиров и пенопластов. Они обладают высокими гидрофобными и олеофильными свойствами, а также могут подвергаться многократной регенерации. Большой потенциал имеют сорбенты на основе ультрадисперсных материалов [13, 14]. В настоящее время в России и в мире проводятся исследования возможности использования в качестве сорбентов материалов, полученных электроформированием [15, 16], аэродинамическим формированием [17], сшитых криогелей, получаемых при замораживании и сушке полимерных гелей [18], пористых полимерных систем [19]. Использование ультратонких волокон (УВ) для удаления нефти из водных сред значительно повышает эффективность и скорость очистки благодаря их большой удельной площади поверхности, высокой пористости и непрерывной матричной структуре. Кроме того, сорбенты на основе волокон можно регенерировать после очистки и использовать повторно. Электроформование является единственной хорошо разработанной технологией изготовления ультратонких волокон [20–24]. Однако этот метод требует опасных условий эксплуатации, таких как высокое

напряжение, а также очень чувствителен к локальным изменениям окружающей среды, таким как температура или влажность. Производство волокон включает в себя сложную технологию приготовления прядильных растворов с применением большого числа технологических добавок и специальных приемов для достижения требуемого комплекса свойств готового материала. Полученные ультратонкие волокна могут быть токсичными из-за остатков растворителя [25]. Для изготовления волокон методом аэродинамического формирования используются полимеры с очень высоким показателем текучести расплава 800–1500 г/10 мин. Стоимость сырья составляет около 70 т. р./25 кг. Кроме того, данный метод не подходит для использования вторичного сырья [26, 27]. Поэтому одним из приоритетных направлений в решении проблем загрязнения водных сред нефтепродуктами является поиск и разработка новых сорбционных материалов. Одним из наиболее простых и эффективных способов изготовления УВ является распыление расплава полимера в эжекторных устройствах [28, 29]. Этот метод не требует использования сложного оборудования, приготовления прядильных растворов и позволяет изготавливать волокна из крупнотоннажных недорогих полимеров и вторичного сырья.

Целью данной работы является выявление основных сорбционных характеристик гидрофобных волокнистых материалов, полученных способом распыления, и возможности применения исходных и модифицированных материалов на основе УВ в качестве эффективных сорбентов углеводородов для ликвидации разливов нефти в море и очистки воды на нефтедобывающих платформах.

Материалы и методы

В качестве сорбентов использовались исходные и модифицированные волокнистые материалы, полученные из расплавов гидрофобных полимеров и продуктов их утилизации. Формирование серии образцов сорбционных материалов осуществлялось авторами статьи методом распыления расплава полимера на лабораторной установке в Сибирском физико-техническом институте им. В.Д. Кузнецова Томского государственного университета, лаборатория оптических материалов и покрытий (2018–2020). Ключевым элементом установки являлось эжекторное устройство с габаритными размерами 76 и 48 мм, состоящее из двух частей, с регулируемой площадью первичного кольцевого сопла, в которое подается высокоскоростной поток воздуха для распыления расплава, и вторичного сопла для транспорта в зону формирования волокон исходного сырья [30]. Для изготовления волокон в качестве исходных материалов использовали полипропилен

(ПП) марки PP H080 GP (Россия) общего назначения, выпущенный согласно ТУ 2211-103-70353562-2013 изм. 3 (СИБУР Холдинг, 2017), а также продукт переработки тары из полиэтилентерефталата в виде хлопьев (ПЭТФ) (Россия). Отбор проб образцов волокнистых материалов для исследований осуществляли по ГОСТ 10213.0-73.

В качестве исходных полимеров для ликвидации загрязнений водных сред углеводородами были выбраны распространенные экологически безопасные гидрофобные полимеры: полипропилен (ПП) и полиэтилентерефталат (ПЭТФ), которые обладают высокой химической стойкостью и биологической инертностью. Полипропилен относится к группе полиолефинов, является неполярным и частично кристаллическим. Полипропилен является вторым по объему производства пластиком после полиэтилена, однако, по сравнению с последним, обладает несколько большей плотностью и термостойкостью. Кроме того, ПП может подвергаться физической модификации при воздействии СВЧ излучения. Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) является наиболее распространенным полимерным материалом из группы полиэфинов. Наличие ароматического кольца в повторяющихся звеньях ПЭТФ придает полимеру значительную прочность, жесткость и износостойкость. Все образцы сорбционных материалов представляют собой гетерогенную систему, состоящую из переплетенных между собой элементарных волокон и промежутков между ними. Подготовлена серия образцов сорбента на основе полипропиленового волокнистого материала (СПП), сорбента на основе волокнистого материала из полиэтилентерефталата (СПЭТФ) и сорбента на основе модифицированного полипропиленового волокнистого материала (СМПП).

Модификация образцов материалов из полипропилена была проведена с целью улучшения физико-механических свойств сорбентов. Модифицирование образцов полипропиленового сорбента осуществлялось кратковременным воздействием сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения на волокнистый материал. Как показано в работе [31], микроволновый нагрев волокон приводит к образованию однородной кристаллической структуры и способствует увеличению прочности при растяжении и твердости при незначительном снижении ударной вязкости. Нагрев образцов проводили в лабораторной микроволновой установке с выходной мощностью 1 кВт, частотой 2,45 ГГц с рабочей камерой – прямоугольным резонатором со стоячей волной и вращающимся держателем образцов, непрерывно поворачивающимся на 360° в течение 3 мин, производитель Samsung (Южная Корея). Морфологические характеристики УВ устанавливались на основе анализа не менее

20 изображений каждого образца, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), микроскоп Quanta 200 3D, производитель FEI Company (США). Для каждого образца средний диаметр элементарных волокон определяли методом микроскопии по ГОСТ 6943.2-79.

Для приготовления модельных систем использовалась нефть Чкаловского месторождения Томской области. Нефть относится к марке «Light» с удельным весом 0,77–0,80, содержит до 18 % твердых парафинов, состоит в основном из бензинокеросиновых фракций, малосернистая [32].

Начальная концентрация нефтепродуктов (НП) в воде составляла 36 г/л. Кинетику сорбции НП исследовали в статических условиях при перемешивании при различной длительности взаимодействия раствора объемом 50 мл с навеской сорбента массой 0,05 г. Методика определения степени сорбции основывалась на извлечении нефтепродуктов из воды хлороформом и спектральном исследовании данного раствора. Оптическую плотность определяли при длине волны 275 нм.

Степень сорбции R (%) рассчитывали по формуле (1):

$$R = \frac{c_{исх} - c}{c_{исх}} 100 \%, \quad (1)$$

где $c_{исх}$ – концентрация НП в исходном модельном растворе, мг/л; c – концентрация НП в модельном растворе после сорбции, мг/л.

Влияние значения водородного показателя кислотности среды на сорбционные свойства образцов материалов определяли в интервале от 4 до 9 рН среды и поддерживали добавлением аммиачно-ацетатных буферных растворов с шагом 1. Требуемую рН создавали в модельном растворе «вода–нефть». Затем добавляли навеску образца волокнистого материала и выдерживали 20 мин. Далее раствор спектрально исследовали на сканирующем спектрофотометре СФ-56 (Россия) и строили зависимость степени сорбции НП (R , %) от рН.

Для оценки степени сорбции растворимых НП использовался метод газовой хроматографии. Анализировался модельный раствор до и после сорбции. Экстракцию НП из воды осуществляли хлороформом, экстракт очищали оксидом алюминия и анализировали на газовом хроматографе МАЭСТРО 7820, производитель Agilent Technologies (США). Разделение НП проводили на капиллярной колонке НР-5 (жидкая фаза – 5 % метилфенилсилоксан) длиной 30 м, диаметром 320 мкм, толщина фазы 250 мкм. Оценку степени сорбции проводили используя суммарные площади пиков экстрактов модельного раствора до и после сорбции по формуле (2).

$$R = \frac{S_{\Sigma исх} - S_{\Sigma ПВМ}}{S_{\Sigma исх}} 100 \%, \quad (2)$$

где $S_{\Sigma исх}$ – площадь всех пиков исходного модельного раствора; $S_{\Sigma ПВМ}$ – площадь всех пиков модельного раствора после сорбции.

Водопоглощение образцов определяли гравиметрическим методом на весах лабораторных ВК-600, производитель МАССА-К (Россия) с дискретностью 0,02 г. Испытуемые образцы предварительно подвергали сушке при 50 °С в течение 24 часов, охлаждали до комнатной температуры и взвешивали перед тем, как погрузить в воду. Образцы помещали в сосуд с дистиллированной водой при температуре 23 °С. Через 24 часа образцы осушали и взвешивали.

Результаты и обсуждение

После проведения модификации структура и цвет образцов полипропиленовых материалов визуально не изменились. В результате анализа серии микрофотографий партий образцов рассчитаны основные статистические показатели распределения диаметров волокон. Также одним из значительных факторов целесообразного использования сорбентов для поглощения нефти из водных сред является низкое поглощение материалами воды. Результаты исследований показали, что наиболее гидрофобными являются образцы модифицированного сорбента, у которого значение показателя влагопоглощения составило 0,1 % за 24 ч. Влагопоглощение СПП и СПЭФТ за такой же промежуток времени составляет 3 и 12 % соответственно. Характеристики образцов волокнистых сорбционных материалов приведены в таблице.

Таблица. Характеристики волокнистых материалов
Table. Characteristics of fibrous materials

Материал Material	Сорбент Sorbent	Средний диаметр волокон, мкм Average fibers diameter, μm	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Влагопоглощение, % Moisture absorption, %
Полипропилен Polypropylene	СПП SPP	2	76	3
Вторичный поли-этилентерефталат Recycled polyethylene terephthalate	СПЭТФ SPET	8	66	12
Модифицированный полипропилен Modified polypropylene	СМПП SMPP	2	76	3

Здесь SPP – Sorbent based on Polypropylene; SPET – Sorbent based on recycled Polyethylene Terephthalate; SMPP – Sorbent based on Modified Polypropylene.

Полученные данные свидетельствуют о возможности использования кратковременного воздействия СВЧ-излучения для модификации полипропиленовых волокнистых материалов, а также создания на их основе сорбентов и фильтрующих элементов для очистки воды от НП, которые могут эффективно применяться в изделиях без армирующей оболочки – бонах, матах, салфетках и др.

Для ликвидации разливов нефти в морских акваториях и очистки воды на буровых платформах необходимо проведение процессов сорбции с высокой скоростью. Так как волокнистые сорбенты имеют объёмную структуру, образованную матрицей в виде волокон, расположенных хаотически в сочетании с пространством между ними, и их пористость обусловлена, прежде всего, пустотами структуры, поглощение нефти и нефтепродуктов происходит в результате начального смачивания ими поверхности сорбента. Затем нефть и НП проникают в пористую структуру материала, заполняя пустоты под действием капиллярных сил. Кинетические кривые сорбции для образцов материалов показаны на рис. 1.

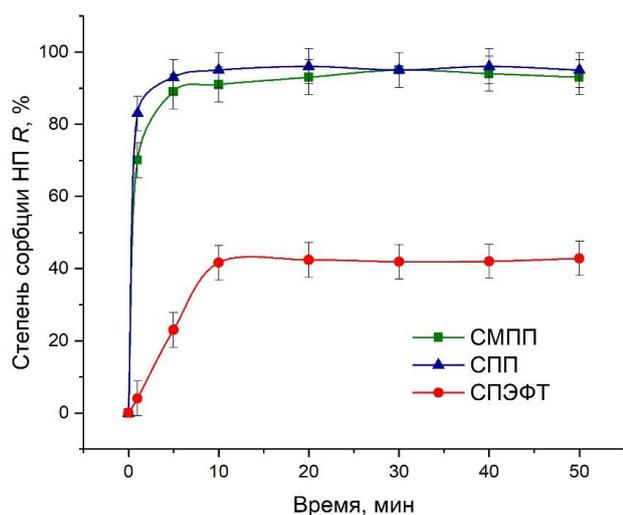


Рис. 1. Зависимость степени сорбции нефтепродуктов (R , %) от времени контакта образцов с модельным раствором

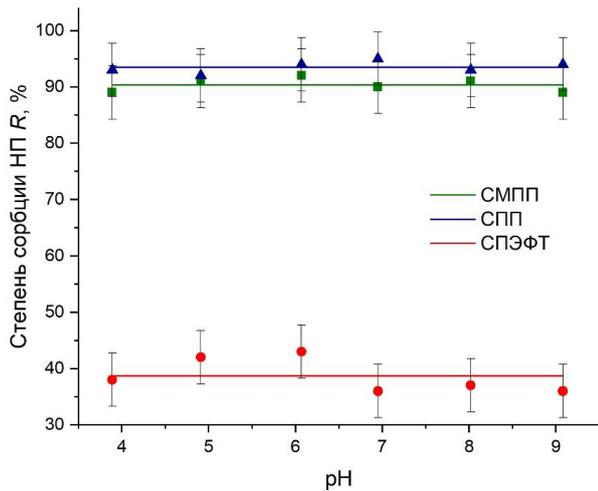
Fig. 1. Dependence of sorption degree of oil products (R , %) on the contact time of the samples with the model solution

Анализ кинетических кривых показал, что процесс поглощения НП полипропиленовыми материалами протекает с высокой скоростью, сорбционное равновесие устанавливается в течение 5 мин. В течение первой минуты взаимодействия образцов с модельным раствором степень сорбции углеводородов достигает значения 85 % для СПП и 75 % для СМПП. Это связано, вероятно, с тем, что материа-

лы на основе УВ, полученные методом распыления расплава ПП, с диаметром от нескольких микрометров до их десятых долей, имеют большую удельную поверхность, контролируемую пористость, непрерывную матричную структуру, состоящую из небольших пор. Эти структурные параметры полимерных волокнистых сорбентов являются благоприятными для протекания капиллярных явлений, процессов адгезии и адсорбции и заполнения за счет этого свободного пространства волокнистого материала нефтепродуктом, обеспечивая тем самым эффективное поглощение нефти и нефтепродуктов. Однако сорбционные характеристики образцов СМПП немного снижены по сравнению с не модифицированными образцами, возможно, из-за образования однородной кристаллической структуры волокна становятся менее эластичными и заполнение пор сорбента НП протекает менее эффективно. Процесс сорбции в системе «СПЭТФ–раствор» протекает недостаточно быстро, и степень сорбции составляет 40 %. Сорбционное равновесие устанавливается в течение 20 мин. Образцы СПП и СМПП продемонстрировали высокую сорбционную способность по отношению к НП. Лучшие характеристики образцов на основе полипропилена, по-видимому, обусловлены большей площадью контакта между фазами, так как состоят из более тонких волокон. Полипропиленовые образцы продемонстрировали сорбционную емкость и рекуперацию нефти, сопоставимую с промышленно выпускаемыми марками сорбентов «Мегасорб» [33] и «SoSystem» [34]. Однако образцы СПЭТФ изготовлены из пластиковых отходов, что делает производство сорбентов на их основе экономически выгодным и решает глобальную проблему утилизации пластика.

Кислотность среды является важным фактором, способным оказывать влияние на процесс сорбции из растворов. Полученные результаты влияния pH на сорбцию НП волокнистыми полимерными материалами показаны на рис. 2.

Результаты свидетельствуют о минимальном влиянии кислотности среды на сорбцию нефти СПЭТФ, СПП и СМПП. Нивелирование воздействия водородного показателя воды на извлечение НП из растворов вызвано, вероятно, гидрофобностью образцов, а также свидетельствует об отсутствии деструкции исходных полимеров в процессе изготовления волокон. При водородном показателе модельных растворов от 6,5–8,5, который соответствует кислотности морской воды, степень сорбции НП полипропиленовыми сорбентами варьируется в диапазоне 90–95 %. Таким образом, сорбенты на основе гидрофобных УВ можно применять для ликвидации разливов нефти в море и очистки воды на нефтедобывающих платформах.



В отличие от методов флуориметрии, спектрофотометрии и гравиметрии, газовая хроматография позволяет получить дифференцированную информацию о содержании неполярных и малополярных углеводородов нефтяного происхождения. На рис. 3 представлены хроматограммы экстрактов исходных растворов и растворов после сорбции НП полипропиленовыми материалами.

Рис. 2. Влияние водородного показателя воды на сорбцию нефтепродуктов образцами волокнистых материалов

Fig. 2. Influence of water hydrogen index on oil products sorption by samples of fibrous materials

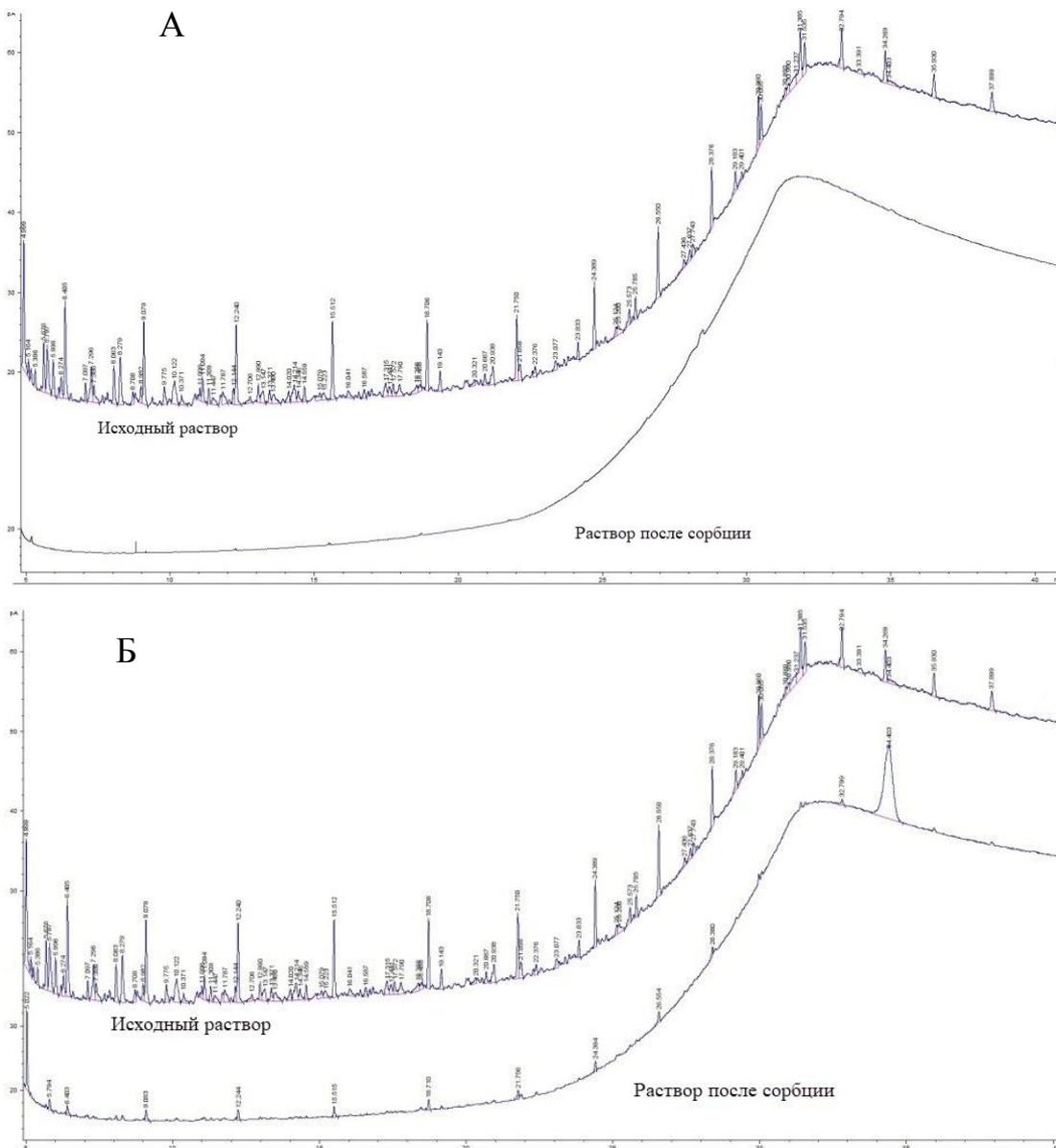


Рис. 3. Хроматограммы хлороформных экстрактов: модельный раствор до и после сорбции: (А) с СПП; (Б) с СМПП
Fig. 3. Chromatograms of chloroform extracts: model solution before and after sorption: (A) with SPP; (B) with SMPP

На хроматограмме экстракта модельного раствора нефтепродуктов в интервале времени удерживания 5–40 мин отмечено 38 основных пиков, которые принадлежат нормальным углеводородам. На хроматограмме экстракта модельного раствора после сорбции НП на волокне СПП пики практически отсутствуют, что указывает на 100%-е поглощение образцом растворенных углеводородов. На хроматограмме экстракта раствора после сорбции НП на образце СМПП присутствуют несколько слабовыраженных пиков, которые свидетельствуют об очень малой остаточной концентрации НП. Степень сорбции растворенных НП образцами СПП и СМПП составляет 100 и 70 %, соответственно. Образцы не модифицированных материалов демонстрируют высокую сорбционную способность к НП, обусловленную, вероятно, особенностями надмолекулярной структуры волокон.

Заключение

Проведенные исследования процессов адсорбции воды и нефтепродуктов из водных растворов ультратонкими волокнами, полученными способом пневматического распыления, выявили возможность применения модифицированных и исходных гидрофобных материалов на их основе в качестве эффективных сорбентов углеводородов для ликви-

дации разливов нефти в море и очистки воды на нефтедобывающих платформах.

Установлено что, более целесообразным является применение в сорбционных процессах полипропиленовых волокнистых сорбентов. Для улучшения эксплуатационных характеристик волокнистых материалов перспективно использовать кратковременное воздействие сверхвысокочастотного излучения, так как микроволновый нагрев ультратонких волокон приводит к образованию стабильной однородной кристаллической структуры, что способствует увеличению прочности при растяжении и твердости при незначительном снижении ударной вязкости, а также значительному уменьшению водопоглощения.

Образцы СПЭТФ уступают полипропиленовым сорбентам, так как имеют меньшую удельную поверхность. Однако эти материалы получены из пластиковых отходов, что делает производство сорбентов на их основе экономически выгодным и решает глобальную проблему утилизации пластиков. Так как морфологические свойства ультратонких волокон во многом зависят от режимов распыления, в дальнейшем целесообразно усовершенствовать параметры процесса изготовления для формирования оптимальных структурных характеристик сорбентов из полиэтилентерефталата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marine oil spills – oil pollution, sources and effects / B. Zhang, E. Matchinski, B. Chen, X. Ye, L. Jing, K. Lee // *World Seas: an Environmental Evaluation*. 2nd ed. – 2019. – V. III: Ecological Issues and Environmental Impacts. – P. 391–406.
2. Bhattacharjee S., Dutta T. An overview of oil pollution and oil-spilling incidents / Eds. P. Das, S. Manna, J.K. Pandey. – Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2022. – Ch. 1. – P. 3–15.
3. Свецкий А.В. Правовая охрана морской среды при транспортировке нефти и нефтепродуктов: международно-правовые аспекты // *Международное право и международные организации*. – 2022. – № 4. – С. 22–33.
4. Адсорбция органических веществ из воды / А.М. Когановский, А.А. Клименко, Т.М. Левченко, И.Г. Рода. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
5. Сорбционный метод ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Н.А. Самойлов, Р.Н. Хлесткин, А.В. Шеметов, А.А. Шаммазов. – М.: Химия, 2001. – 189 с.
6. Sorption as a rapidly response for oil spill accidents. A material and mechanistic approach / L.M.T.M. Oliveira, J. Saleem, A. Bazargan, J.L.D.S. Duarte, G. McKay, L. Meili // *J Hazard Mater*. – 2021. – V. 407. – art. 124842.
7. Барахнина В.Б., Киреев И.Р., Гилязов А.А. Критерии выбора адсорбентов для сбора нефти и нефтепродуктов с поверхности воды // *Экологический вестник России*. – 2018. – № 9. – С. 27–35.
8. Protection of ground and water areas with use natural adsorbents / A. Kutchin, V. Demin, E. Shubnitcina, M. Sazonov. – London: Thomas Telford, 2000. – V. 2. – 1486 p.
9. Адсорбция нефтепродуктов и неорганических ионов на минеральном сорбенте / Т.А. Юрмазова, Н.Б. Шахова, Чан Туан Хоанг, М.В. Планкина // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329 – № 5. – С. 125–134.
10. Oil spill cleanup by raw cellulose-based absorbents: a green and sustainable approach / Q.C. Minh, T.T. Tan, T.H. Anh, H.L. Tri // *Energy Sources*. P. A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2021. DOI: 10.1080/15567036.2021.1928798.
11. Sabir S. Approach of cost-effective adsorbents for oil removal from oily water // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2015. – V. 45. – № 17. – P. 1916–1945.
12. Topuz F., Oldal D.G., Szekely G. Valorization of Polyethylene Terephthalate (PET) plastic wastes as nanofibrous membranes for oil removal: sustainable solution for plastic waste and oil pollution // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2022. – V. 61. – P. 9077–9086.
13. Gote M.G., Dhila H.H., Muley S.R. Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends // *Nature Environment and Pollution Technology*. – 2023. – V. 22. – № 1. – P. 39–61.
14. Morikawa K., Green M., Naraghi M. A novel approach for melt electrospinning of polymer fibers // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – V. 26. – P. 205–208.
15. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites / Z.-M. Huang, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna // *Compos. Sci. Technol*. – 2003. – V. 63. – P. 2223–2253.

16. Superhydrophobic–superoleophilic electrospun nanofibrous membrane modified by the chemical vapor deposition of dimethyl dichlorosilane for efficient oil-water separation / P.F. Zareei, M.M. Sabzehmeidani, H. Karimi et al. // *J Appl Polym Sci.* – 2019. – V. 136 (24). – 47621 DOI: 10.1002/app.47621.
17. Using polypropylene needle punch nonwoven sorbents as the interceptor for oil in static and dynamic water experiments / A. Abeer, T. Huseein, R.I. Syed, H. Wanzhen, X. Guangbiao // *Environmental Technology.* – 2022. – V. 43 (25). – P. 3919–3934.
18. Пористые полимерные нанокпозиционные материалы для охраны окружающей среды / Г.С. Минаков, С.А. Широких, Д.Ю. Корнилов, М.Ю. Королева // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2022. – Т. 30. – № 1. – С. 56–67.
19. Controlling pore sizes in highly porous poly(styrene-divinylbenzene) sponges for preferable oil sorption / M.Y. Koroleva, S.A. Shirokikh, P.S. Zagoskin, E.V. Yurtov // *Polym. Test.* – 2019. – V. 77. – Art. 105931.
20. Electrospinning of cyclodextrin/linalool-inclusion complex nanofibers: Fast-dissolving nanofibrous web with prolonged release and antibacterial activity / Z. Aytac, Z.I. Yildiz, F. Kayaci-Senirmak, T. Tekinay, T. Uyar // *Food Chem.* – 2017. – V. 231. – P. 192–201.
21. Ali U. et al. Needleless electrospinning using sprocket wheel disk spinneret // *J. Mater. Sci.* – 2017. – V. 52. – P. 7567–7577.
22. Electrospinning biopolymers from ionic liquids requires control of different solution properties than volatile organic solvents / O. Zavgorodnya, J.L. Shamshina, J.R. Bonner, R.D. Rogers // *ACS Sustain. Chem. Eng.* – 2017. – V. 5. – P. 5512–5519.
23. LeCorre-Bordes D.S., Jaksons P., Hofman K. Mind the gap: ensuring laboratory-scale testing of an electrospinning product meets commercial-scale needs // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2017. – V. 134 (20). – 44836. DOI: 10.1002/app.44836.
24. Electrospinning for nano- to mesoscale photonic structures / J.L. Skinner, J.M. Andriolo, J.P. Murphy, B.M. Ross // *Nanophotonics.* – 2017. – V. 6. – P. 765–787.
25. Direct in vitro electrospinning with polymer melts / P. Dalton, K. Klinkhammer, J. Salber, D. Klee, M. Möller // *Biomacromolecules.* – 2006. – V. 7 (3). – P. 686–690.
26. Chen T., Wang X., Huang X. Effects of processing parameters on the fiber diameter of meltblown nonwoven fabrics // *Text Res J.* – 2005. – V. 75 (1). – P. 76–80.
27. Study on melt-blown processing, web structure of polypropylene nonwovens and its BTX adsorption / M. Guo, H. Liang, Z. Luo et al. // *Fibers Polym.* – 2016. – V. 17. – P. 257–265. URL: <https://doi.org/10.1007/s12221-016-5592-y> (дата обращения 15.06.2023).
28. Система очистки сточных вод с использованием полипропиленового тонковолокнистого материала / В.Р. Артюшин, Г.Г. Волокитин, Г.В. Лысак, И.А. Лысак, Т.Д. Малиновская, О.Н. Чайковская // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2011. – № 1 (30). – С. 170–177.
29. Efficiency optimization of an annular-nozzle air ejector under the influence of structural and operating parameters / I.A. Lysak, G.V. Lysak, V.Y. Konyukhov, A.A. Stupina, V.E. Gozbenko, A.S. Yamshchikov // *Mathematics.* – 2023. – V. 11. – 3039.
30. Устройство для получения волокнистых материалов из расплава термопластов: пат. Рос. Федерация № 2614087; заявл. 18.11.15; опубл. 22.03.17, Бюл. № 9. – 3 с.
31. The effect of microwave radiation on the supramolecular structure of polypropylene fiber materials / A.I. Potekaev, I.A. Lysak, T.D. Malinovskaya, G.V. Lysak, L.A. Egorova // *Russ Phys J.* – 2016. – V. 58. – P. 1741–1746.
32. Яценко И.Г. Экологические и социальные проблемы освоения углеводородных ресурсов северных территорий // *Булатовские чтения.* – 2017. – Т. 4. – С. 255–261.
33. Сорбент нефти «Мегасорб» // ООО «Восточно-Европейский Центр инноваций». URL: <https://sorbent-megasorb.ru/page/> (дата обращения: 29.04.2023).
34. Сорбирующие системы SoSystem® // Фабрика Нетканых Материалов «Весь Мир». URL: <https://wesmir.com/katalog/sosystem/> (дата обращения: 19.04.2023).

REFERENCES

1. Zhang B., Matchinski E., Chen B., Ye X., Jing L., Lee K. Marine oil spills – oil pollution, sources and effects. *World Seas: an Environmental Evaluation. 2nd ed.* 2019, vol. III: *Ecological Issues and Environmental Impacts*, pp. 391–406.
2. Bhattacharjee S., Dutta T. An overview of oil pollution and oil-spilling incidents. *Advances in Oil-Water Separation*. Eds. P. Das, S. Manna, J.K. Pandey. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier, 2022. Ch. 1, pp. 3–15.
3. Svetsky A.V. Legal protection of the marine environment during the transportation of oil and oil products: international legal aspects. *International Law and International Organizations*, 2022, vol. 4, pp. 22–33. In Rus.
4. Koganovsky A.M., Klimenko A.A., Levchenko T.M., Roda I.G. *Adsorbtsiya organicheskikh veshchestv iz vody* [Adsorption of organic substances from water]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 256 p.
5. Samoilov N.A., Khlestkin R.N., Shemetov A.V., Shammazov A.A. *Sorbtsionny metod likvidatsii avariynnykh razlivov nefii i nefteproduktov* [Sorption method for liquidation of emergency spills of oil and oil products]. Moscow, Khimiya Publ., 2001. 189 p.
6. Oliveira L.M.T.M., Saleem J., Bazargan A., Duarte J.L.D.S., McKay G., Meili L. Sorption as a rapidly response for oil spill accidents. A material and mechanistic approach. *J Hazard Mater*, 2021, vol. 407, art. 124842.
7. Barakhnina V.B., Kireev I.R., Gilyazov A.A. Criteria for the selection of adsorbents for the collection of oil and oil products from the surface of the water. *Ecological Bulletin of Russia*, 2018, no. 9, pp. 27–35. In Rus.
8. Kutchin A., Demin V., Shubnitcina E., Sazonov M. *Protection of ground and water areas with use natural adsorbents*. London, Thomas Telford, 2000. Vol. 2, 1486 p.
9. Yurmazova T.A., Shakhova N.B., Chan Tuan Hoang, Plankina M.V. Adsorption of oil products and inorganic ions on a mineral sorbent *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329 no. 5, pp. 125–134. In Rus.
10. Minh Q.C., Tan T.T., Anh T.H., Tri H.L. Oil spill cleanup by raw cellulose-based absorbents: a green and sustainable approach. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021. DOI: 10.1080/15567036.2021.1928798.
11. Sabir S. Approach of cost-effective adsorbents for oil removal from oily water. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, vol. 45, no. 17, pp. 1916–1945.
12. Topuz F., Oldal D.G., Szekely G. Valorization of Polyethylene Terephthalate (PET) plastic wastes as nanofibrous membranes for oil removal: sustainable solution for plastic waste and oil pollution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, vol. 61, pp. 9077–9086.

13. Gote M.G., Dhila H.H., Muley S.R. Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2023, vol. 22, no. 1, pp. 39–61.
14. Morikawa K., Green M., Naraghi M. A novel approach for melt electrospinning of polymer fibers. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 205–208.
15. Huang Z.-M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna S. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Compos Sci Technol*, 2003, vol. 63, pp. 2223–2253.
16. Zareei P.F., Sabzehmeidani M.M., Karimi H. Superhydrophobic–superoleophilic electrospun nanofibrous membrane modified by the chemical vapor deposition of dimethyl dichlorosilane for efficient oil-water separation. *J Appl Polym Sci*, 2019, vol. 136, no. 24, 47621. DOI: 10.1002/app.47621.
17. Abeer A., Huseein T., Syed R.I., Wanzhen H., Guangbiao X. Using polypropylene needle punch nonwoven sorbents as the interceptor for oil in static and dynamic water experiments. *Environmental Technology*, 2022, vol. 43, no. 25, pp. 3919–3934.
18. Minakov G.S., Shirokikh S.A., Kornilov D.Yu., Koroleva M.Yu. Porous polymer nanocomposite materials for environmental protection. *Chemistry for Sustainable Development*, 2022, vol. 30, no. 1, pp. 52–63. In Rus.
19. Koroleva M.Y., Shirokikh S.A., Zagoskin P.S., Yurtov E.V. Controlling pore sizes in highly porous poly(styrene-divinylbenzene) sponges for preferable oil sorption. *Polym Test*, 2019, vol. 77, art. 105931.
20. Aytac Z., Yildiz Z.I., Kayaci-Senirmak F., Tekinay T., Uyar T. Electrospinning of cyclodextrin/linalool-inclusion complex nanofibers: fast-dissolving nanofibrous web with prolonged release and antibacterial activity. *Food Chem*, 2017, vol. 231, pp. 192–201.
21. Ali U. Needleless electrospinning using sprocket wheel disk spinneret. *J. Mater. Sci.*, 2017, vol. 52, pp. 7567–7577.
22. Zavgorodnya O., Shamshina J.L., Bonner J.R., Rogers R.D. Electrospinning biopolymers from ionic liquids requires control of different solution properties than volatile organic solvents. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 2017, vol. 5, pp. 5512–5519.
23. LeCorre-Bordes D.S., Jaksons P., Hofman K. Mind the gap: ensuring laboratory-scale testing of an electrospinning product meets commercial-scale needs. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2017, vol. 134, no. 20, 44836. DOI: 10.1002/app.44836.
24. Skinner J.L., Andriolo J.M., Murphy J.P., Ross B.M. Electrospinning for nano- to mesoscale photonic structures. *Nanophotonics*, 2017, vol. 6, pp. 765–787.
25. Dalton P., Klinkhammer K., Salber J., Klee D., Möller M. Direct in vitro electrospinning with polymer melts. *Biomacromolecules*, 2006, vol. 7 (3), pp. 686–690.
26. Chen T., Wang X., Huang X. Effects of processing parameters on the fiber diameter of meltblown nonwoven fabrics. *Text Res J*, 2005, vol. 75 (1), pp. 76–80.
27. Guo M., Liang H., Luo Z. Study on melt-blown processing, web structure of polypropylene nonwovens and its BTX adsorption. *Fibers Polym*, 2016, vol. 17, pp. 257–265. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12221-016-5592-y> (accessed 15 June 2023).
28. Artyushin V.R., Volokitin G.G., Lysak G.V., Lysak I.A., Malinovskaya T.D., Chaikovskaya O.N. Wastewater treatment system using polypropylene fine-fiber material. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2011, vol. 1 (30), pp. 170–177. In Rus.
29. Lysak I.A., Lysak G.V., Konyukhov V.Y., Stupina A.A., Gozbenko V.E., Yamshchikov A.S. Efficiency optimization of an annular-nozzle air ejector under the influence of structural and operating parameters. *Mathematics*, 2023, no. 11, art. 3039.
30. Lysak I.A., Lysak G.V., Malinovskaya T.D. *Ustroystvo dlya polucheniya voloknistykh materialov iz rasplava termoplastov* [Device for obtaining fibrous materials from thermoplastic melt]. Patent RF, no. 2614087, 2017.
31. Potekaev A.I., Lysak I.A., Malinovskaya T.D., Lysak G.V., Egorova L.A. The effect of microwave radiation on the supramolecular structure of polypropylene fiber materials. *Russ Phys J*, 2016, vol. 58, pp. 1741–1746.
32. Yashchenko I.G. Environmental and social problems of development of hydrocarbon resources of the north territories. In *Readings name of A.I. Bulatov*, 2017, vol. 4, pp. 255–261.
33. Sorbent nefiti «Megasorb» [“Megasorb” oil sorbent]. *ООО «Vostochno-Evropeysky Tsentri innovatsiy»*. Available at: <http://sorbent-megasorb.ru/megasorb> (accessed: 29 April 2023).
34. Sorbiruyushchie sistemy SoSystem® [SoSystem® sorbent systems]. *Fabrika Netkanykh Materialov «Ves Mir»* [Factory of Nonwoven Materials “Whole World”]. Available at: <https://wesmir.com/katalog/sosystem/> (accessed: 19 April 2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Илья Александрович Лысак, кандидат технических наук, доцент отделения машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. doc@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4252-0077>

Галина Владиленовна Лысак, магистрант отделения машиностроения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. gvl2@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2270-8902>

Поступила в редакцию: 09.07.2023

Поступила после рецензирования: 11.10.2023

Принята к публикации: 06.12.2023

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya A. Lysak, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. doc@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4252-0077>

Galina V. Lysak, Master Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gvl2@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2270-8902>

Received: 09.07.2023

Revised: 11.10.2023

Accepted: 06.12.2023