



ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-2-120-131

EDN: GOFPCF

УДК 574

Научная статья / Research article

Исследование сорбционных свойств углеродных волокнистых материалов

С.Я. Алибеков^{ID}, Е.В. Кутонова[✉], В.А. Севрюгин

*Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола,
Российская Федерация*
[✉]KutonovaEV@volgatech.net

Аннотация. В целях оценки возможности и эффективности использования волокнистых углеродных тканей при ликвидации разливов нефтепродуктов на водной поверхности проведено исследование сорбционных свойств различных видов углеродных тканей. Среди актуальных в условиях современности задач – принятие своевременных мер по ликвидации и утилизации разлитой нефти и нефтепродуктов. Цель исследования – определение нефтеемкости углеродных волокнистых материалов различных марок и структур. Для очистки воды от нефтепродуктов используются различные методы: механические, химические, физико-химические, биологические. Применение того или иного метода зависит от источника, степени загрязнения, объема загрязняющего вещества и др. Среди большого числа известных методов очистки сорбция представляет большой интерес как единственный из наиболее эффективных и недорогих методов. Для очистки воды до максимально допустимой концентрации сорбенты должны обладать высокой нефтеемкостью, гидрофобностью, а также обладать повышенной плавучестью. Проведен сравнительный анализ механического и термического способа реактивации углеродных тканей после их использования в качестве сорбента нефти.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, сорбция, углеродные ткани, ЯМР-эксперимент, нефтеемкость



Благодарности. Авторы выражают благодарность кафедре физики молекулярных систем Казанского (Приволжского) федерального университета за помощь в проведении экспериментов.

Вклад авторов. *Алибеков С.Я.* – концептуализация, научное руководство исследованием; *Кутанова Е.В.* – проведение экспериментов, курирование данных, написание — подготовка черновика рукописи; *Севрюгин В.А.* – разработка методологии исследования, формальный анализ данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 14.11.2024; доработана после рецензирования 10.01.2025; принята к публикации 20.02.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: *Алибеков С.Я., Кутанова Е.В., Севрюгин В.А.* Исследование сорбционных свойств углеродных волокнистых материалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 2. С. 120–131. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-2-120-131>

Study of sorption properties of carbon fiber materials

Sergei Ya. Alibekov^{ORCID}, Ekaterina V. Kutanova[✉], Vyacheslav A. Sevryugin

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russian Federation

[✉]KutanovaEV@volgatech.net

Abstract. In order to assess the possibility and effectiveness of using fibrous carbon fabrics in the elimination of oil spills on the water surface, a study of the sorption properties of various types of carbon fabrics was conducted. The current task is to take timely measures to eliminate and utilize spilled oil and oil products. The purpose of this work is to determine the oil capacity of carbon fibrous materials of various grades and structures. To purify water from oil products, various purification methods are used: mechanical, chemical, physical-chemical, biological. The use of a particular method depends on the source, degree of pollution, volume of pollutant and other circumstances. Among the large number of known cleaning methods, sorption is of great interest as the only one of the most effective and inexpensive cleaning methods. To purify water to the maximum permissible concentration, sorbents must have high oil capacity, hydrophobicity, and also have increased buoyancy. A comparative analysis of the mechanical and thermal methods of reactivation of carbon fabrics after their use as an oil sorbent has been carried out.

Keywords: oil, petroleum products, sorption, carbon fabrics, NMR experiment, oil capacity

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the Department of Molecular Systems Physics of the Kazan (Volga Region) Federal University for their assistance in conducting experiments.

Authors' contribution. *Alibekov S.Ya.* – conceptualisation, scientific supervision of the study; *Kutonova E.V.* – conducting experiments, data curation, writing – draft manuscript preparation; *Sevryugin V.A.* – development of the research methodology, formal data analysis. All authors were familiarised with the final version of the article and approved it.

Article history: received 14.11.2024; revised 10.01.2025; accepted 20.02.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Alibekov SYa, Kutonova EV, Sevryugin VA. Study of sorption properties of carbon fiber materials. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(2):120–131. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-2-120-131>

Введение

Нефть и ее производные уже несколько веков являются одним из основных энергоресурсов человечества. Однако интенсификация потребления нефтепродуктов и, как следствие, интенсификация нефтедобычи выводит на более актуальный уровень проблему снижения отрицательных последствий этих процессов на природную среду существования самого человечества. Вполне очевидно, что остаточные отходы нефтепроизводств и разливы нефтепродуктов крайне критичны для существования экологических сообществ растительного и биологического происхождения [1]. Если загрязнение нефтепродуктами почвы носит локальный характер и может быть купировано, то разливы нефтепродуктов наводной поверхности приводят к глобальным последствиям, поскольку их ликвидация требует значительных затрат и ресурсов, очень трудна и ресурс пресной и морской воды является для человечества крайне важным и жизненно необходимым. Технологические аварии, приводящие к разливу нефтепродуктов на водной поверхности, имеют катастрофические последствия не только для самой водной среды, но и обширных территорий прилегающей суши, а также жизни социальных сообществ на этой территории. Поиск и разработка эффективных методов локализации и устранения разливов нефтепродуктов на водной поверхности является актуальнейшей задачей. В настоящее время для ее решения используются механические, биологические, термические, физико-химические методы, а также их комбинация. У этих методов есть как свои достоинства, так и множество недостатков [2; 3].

Материалы и методы

Одним из достаточно эффективных методов локализации и ликвидации разливов нефтепродуктов является метод, использующий явление сорбции нефтепродукта пористыми сорбентами. Такие сорбенты при контакте с нефтепродуктами на водной поверхности сорбируют углеводороды и механически убираются с поверхности воды. В настоящее время используют сорбенты как природного происхождения, так и синтетические. С точки зрения экологии сорбенты из природных материалов: торфа, мха, древесных

опилок и т. д. – наиболее безопасны. Эти сорбенты, являясь доступными и относительно дешевыми, однако имеют невысокие сорбционные свойства, также возникают трудности при их сборе с водной поверхности. Синтетические сорбенты имеют достаточно высокую сорбционную нефтеемкость, но при этом, поскольку сами сорбенты являются результатом химических производств, могут вызывать негативные экологические последствия. Более того, при использовании как природных, так и синтетических сорбентов имеются проблемы их утилизации. Таким образом, необходим поиск новых сорбентов и разработка способов их применения для сбора нефтепродуктов с водной поверхности.

В патентной заявке¹ в качестве сорбирующего элемента для ликвидации разливов на водной поверхности нефти и нефтепродуктов предлагается использовать углеродное волокно. Особенностью способа применения, предлагаемого авторами² сорбента, является термическая утилизация сорбированных нефтепродуктов путем отжига углеродной ткани, пропитанной собранными с поверхности воды нефтепродуктами в специальной печи. По утверждению авторов³, натурная реализация предложенного способа показала высокую его техническую и экономическую эффективность. Однако физико-химические свойства углеродной ткани как сорбента нефтепродуктов из водной среды, а также изменение этих свойств при термическом воздействии не исследовались. Далее представлены некоторые результаты таких исследований.

Результаты и обсуждение

Важнейшим физико-химическим свойством сорбентов, используемых для сбора нефтепродуктов с водной поверхности, является их гидрофобность и лиофильность, то есть свойство избирательного смачивания.

Независимо от технологии производства и марок углеродная ткань, как тканая, так и в виде войлока, представляет собой капиллярно-пористую систему с углеродным каркасом. Очевидно, что физико-химической природой сорбционных свойств такой пористой системы по отношению к компоненте жидкофазной смеси является капиллярная сорбция, селективность которой определяется явлением избирательного смачивания волокон углеродной ткани. Поскольку микроструктура углеродных волокон тканей графитоподобна, можно полагать что углеродные материалы гидрофобны, как и графит.

¹ Патент № 2686173 С1, Российская Федерация, МПК C02F 1/28. Способ очистки поверхности воды от нефти и нефтепродуктов : заявл. 27.11.2018; опубл. 24.04.2019 / Алибеков С.Я., Кутонова Е.В., Сютова А.И., Батанов Б.С., Шестакова Т.В. ; патентообладатель : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет».

² Там же.

³ Там же.

Это утверждение подтверждается простым наблюдением краевого угла жидкости на поверхности графита, частично погруженного в воду и в нефть. На рис. 1 показаны фотографии краевых углов жидкости на поверхности графитовой пластины, вертикально погруженной в воду (а) и нефть (б).

На фотографиях видно, что краевой угол воды больше 90° , а нефти – заметно меньше 90° . Эффект избирательного смачивания углеродной ткани иллюстрируется результатом сорбционного эксперимента в водонефтяной эмульсионной смеси. Эмульсионная смесь была получена из водонефтяной смеси в пропорции 50/50 по объему ультразвуковым смешением до получения устойчивой эмульсии. После выдержки войлочной углеродной ткани в готовой эмульсии производился тщательный механический отжим ткани со сбором продукта отжима. Длительное отстаивание продукта отжима не обнаружило в нем заметных следов воды.

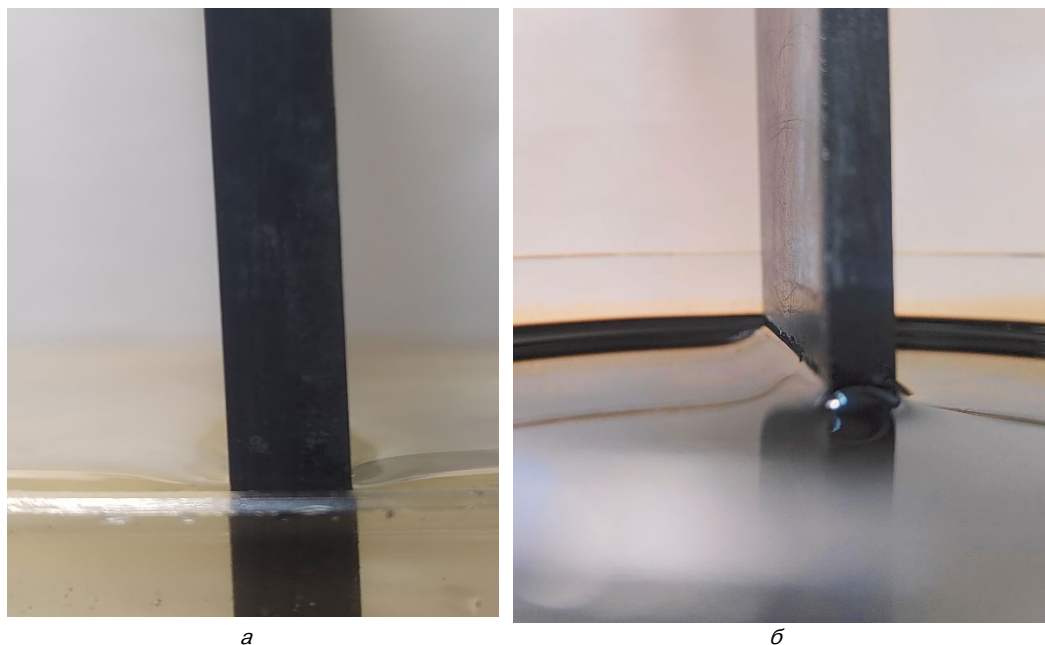


Рис. 1. Краевые углы воды (а) и нефти (б) на поверхности графитовых пластин
 Источник: составлено С.Я. Алибековым, Е.В. Кутоновой, В.А. Севрюгиным.
Figure 1. The marginal angles of water (а) and oil (б) on the surface of graphite plates
 Source: compiled by S.Ya. Alibekov, E.V. Kutonova, V.A. Sevryugin.

Основная характеристика сорбционной способности сорбентов любой природы – их сорбционная емкость. Поэтому важной характеристикой углеродных тканей, используемых в качестве сорбентов нефти, является их нефтеемкость. Для определения нефтеемкости войлочной и тканых углеродных тканей различных марок использовался весовой метод. Образцы испытуемых тканей взвешивались на электронных весах до и после насыщения их нефтью в течение 24 ч. Нефтеемкость определялась по формуле

$$q = \frac{m - m_o}{m_o},$$

где q – нефтеемкость сорбента; m – масса образца после сорбции нефти; m_o – масса образца сухой углеродной ткани. Результаты этих исследований приведены в табл. 1.

Из приведенных в табл. 1 величин следует, что в качестве сорбирующего нефть материала наибольшей эффективностью обладает войлочная углеродная ткань.

Таблица 1. Результаты сорбционного эксперимента различных марок углеродных тканей

Углеродные материалы	m_o , г	m , г	q , г/г
Войлочная ткань	1,00	9,20	8,20
ТМ-4	1,05	3,20	2,00
ЛТ1-22/40	1,10	3,74	2,40
Бусофит Т-055	0,15	0,95	5,40

Источник: составлено С.Я. Алибековым, Е.В. Кутоновой, В.А. Севрюгиным.

Table 1. Results of sorption experiment of different grades of carbon fabrics

Carbon materials	m_o , g	m , g	q , g/g
Felt fabric	1.00	9.20	8.20
TM-4	1.05	3.20	2.00
LT 1-22/40	1.10	3.74	2.40
Busofit T-055	0.15	0.95	5.40

Source: compiled by S.Ya. Alibekov, E.V. Kutonova, V.A. Sevryugin.

Поскольку нефтепродукты, как и сама нефть, имеют сложный состав, то кроме рассмотренных макроскопических сорбционных свойств углеродных тканей важными являются и детали сорбции по отношению к компонентам нефтепродуктов.

Одной из основных характеристик сорбентов из волокнистых углеродных материалов является их способность к регенерации без значительной потери сорбционной емкости и массы сорбента при повторном их применении. Для регенерации углеродной ткани, насыщенной сорбированной нефтью, предлагаются методы отжима и отжига⁴.

Использование отжима сорбированной нефти из углеродных тканей показало, что восстановить полностью сорбционные свойства исследуемых материалов не удастся, поскольку даже путем простого наблюдения в тканях обнаруживается остаточная масса нефтепродуктов. Более того, при многократных механических воздействиях разрушается структура волокон ткани, приводя их в негодность для многократного использования. После 2–3 процессов «сорбция – регенерация» ткань теряет механическую устойчивость формы и структуры.

⁴ Патент № 2686173 С1, Российская Федерация, МПК C02F 1/28. Способ очистки поверхности воды от нефти и нефтепродуктов : заявл. 27.11.2018; опубл. 24.04.2019 / Алибеков С.Я., Кутонова Е.В., Сютова А.И., Батанов Б.С., Шестакова Т.В. ; патентообладатель : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет».

Применение для регенерации углеродной ткани отжига показало, что после пятикратного повторения процесса, «сорбция – обжиг» нефтеемкость практически не меняется. Однако углеродная ткань становится жестче. По-видимому, причиной этого является накопление остаточных продуктов пиролиза сорбированной нефти.

Поскольку нефтепродукты, как и сама нефть, имеют сложный состав, то кроме рассмотренных макроскопических сорбционных свойств углеродных тканей важными являются и детали сорбции по отношению к компонентам нефтепродуктов.

Так как методы ЯМР широко используются для определения компонентного состава нефти [4], то они, очевидно, будут достаточно информативны при исследовании деталей сорбции нефтепродуктов углеродными тканями. Однако углеродные ткани являются хорошими электрическими проводниками, что накладывает определенные ограничения на использование ряда ЯМР-методик [5]. Нами использовались методики исследования спин-спиновой релаксации, а именно методики Кара – Парселла – Мейбума – Гилла (КПМГ) и Solid-Echo [3]. ЯМР-эксперимент проводился на лабораторном ЯМР-релаксметре с резонансной частотой протонов 60 МГц.

На рис. 2 представлен спад поперечной ядерной намагниченности, полученный методикой КПМГ в углеродной войлочной ткани (УВТ), предельно насыщенной сырой нефтью (кривая 1) и в ткани после однократного механического отжима (кривая 2). Для сравнения на этом же рисунке представлен релаксационный спад поперечной намагниченности в образце сырой нефти (кривая 3).

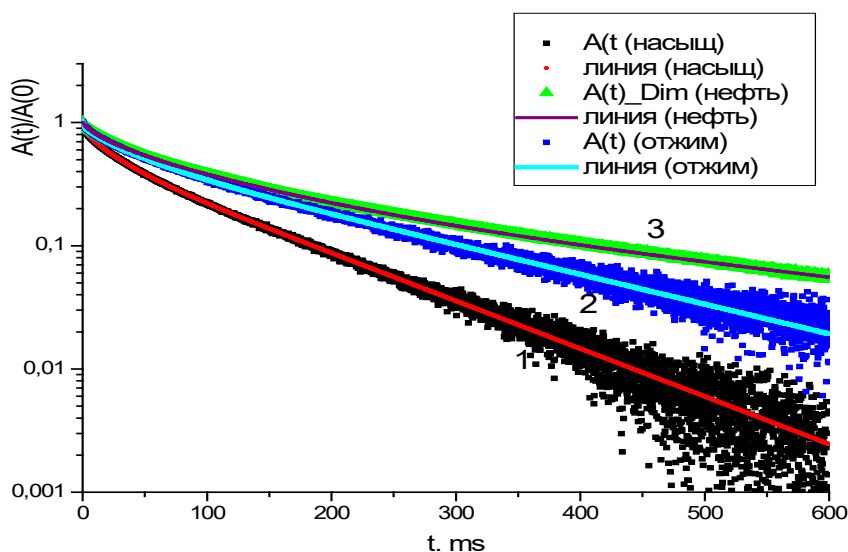


Рис. 2. Спад поперечной ядерной намагниченности в предельно насыщенной нефтью войлочной углеродной ткани (кривая 1), после механического отжима (кривая 2), в сырой нефти (кривая 3)

Источник: составлено С.Я. Алибековым, Е.В. Кутоновой, В.А. Севрюгиным.

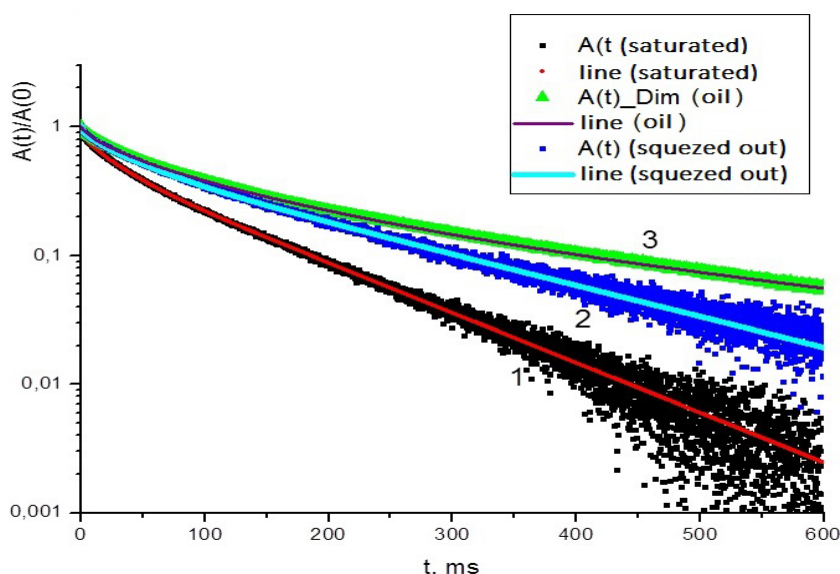


Figure 2. The decline of transverse nuclear magnetization in extremely oil-saturated felt carbon fabric (curve 1), after mechanical squeezed out (curve 2), in crude oil (curve 3)

Source: compiled by S.Ya. Alibekov, E.V. Kutonova, V.A. Sevryugin.

Сплошными линиями на рис. 2 представлены кривые аппроксимации представленных спадов поперечной ядерной намагниченности в виде суммы экспоненциальных составляющих в виде

$$A(t)/A(0) = \sum_{i=1}^n p_i \exp(-t/T_{2i}),$$

где p_i – населенность как доля от общего сигнала ЯМР i -й релаксационной компоненты с временем релаксации T_{2i} . Величины времен релаксации T_{2i} и соответствующих населенностей p_i , рассчитанные путем аппроксимации экспериментальных релаксационных спадов, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Времена T_{2i} и соответствующие населенности p_i для спадов поперечной намагниченности УВТ в состояниях насыщения нефтью и после отжима

Образец	T_{2a1} , мс	p_a	T_{2b1} , мс	p_b	T_{2c1} , мс	p_c	T_{2d1} , мс	p_d
Сырая нефть	390	0,25	110	0,45	27,0	0,2	5	0,8
УВТ с нефтью	112	0,52	28	0,30	5,4	0,1	1	0,1
УВТ после отжима	180	0,54	45	0,30	12,4	0,1	1	0,1

Источник: составлено С.Я. Алибековым, Е.В. Кутоновой, В.А. Севрюгиным.

Table 2. The times T_{2i} and corresponding populations p_i for decays of transverse magnetization in carbon felt fabric in oil-saturated and after squeezed out

Sample	T_{2a1} , ms	p_a	T_{2b1} , ms	p_b	T_{2c1} , ms	p_c	T_{2d1} , ms	p_d
Crude oil	390	0.25	110	0.45	27.0	0.2	5	0.8
CFF with oil	112	0.52	28	0.30	5.4	0.1	1	0.1
CFF after spin	180	0.54	45	0.30	12.4	0.1	1	0.1

Source: compiled by S.Ya. Alibekov, E.V. Kutonova, V.A. Sevryugin.

В проведенном ЯМР-эксперименте следует особо отметить факт увеличения времени T_{2i} релаксационных компонент остаточной нефти в углеродном волокне после его механического отжига относительно соответствующих компонент нефти до отжига ткани. Поскольку при механическом отжиге нефти изменения физико-химических свойств углеродной ткани не происходит, то, скорее всего, имеет место изменение параметров пористости углеродной ткани и возможное перераспределение в ней остаточной нефти. Это предположение вполне согласуется с наблюдаемым уменьшением предельной сорбционной емкости углеродной ткани после процедуры механического отжига, хотя визуально эти изменения незаметны.

При отжиге сорбированной углеродной тканью нефти совершенно очевидно, что остаточным продуктом отжига могут являться карбонизированные ее составляющие – асфальтены и смолы в твердотельном состоянии. Поэтому в ЯМР-эксперименте использовалась методика Solid-Echo, пригодная для исследования процессов ядерной магнитной релаксации образцов в твердотельном состоянии. На рис. 3 представлено релаксационное затухание поперечной ядерной намагниченности, полученное импульсной методикой Solid-Echo, в образце углеродной ткани после процедуры термического отжига сорбированной в ней нефти.

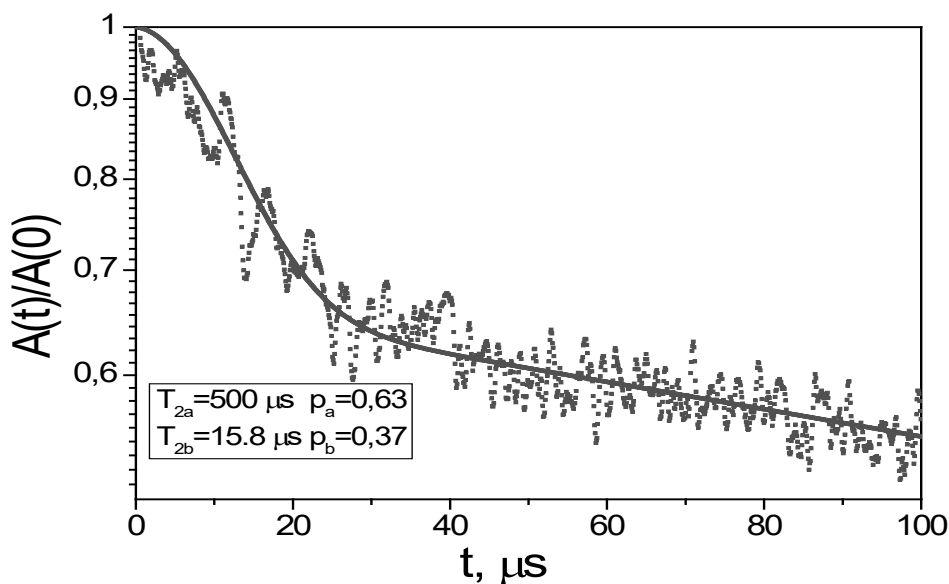


Рис. 3. Релаксационное затухание поперечной ядерной намагниченности в образце углеродной ткани после процедуры термического отжига нефти

Источник: составлено С.Я. Алибековым, Е.В. Кутоновой, В.А. Севрюгиным.

Figure 3. Relaxation attenuation of transverse nuclear magnetization in a carbon tissue sample after the thermal annealing of oil

Source: compiled by S.Ya. Alibekov, E.V. Kutonova, V.A. Sevryugin.

Сплошной линией на рис. 3 представлена аппроксимация полученного релаксационного спада поперечной намагниченности суммой двух экспонент вида

$$p_a \cdot \exp(-t/T_{2a}) + p_b \cdot \exp(-t^2/T_{2b}^2).$$

В этом выражении так называемая гауссова релаксационная компонента $\exp(-t^2/T_{2b}^2)$ соответствует релаксации твердотельной компоненты, а лоренцова релаксационная компонента $\exp(-t/T_{2a})$ – аморфной компоненте молекулярной системы. Наличие твердотельной компоненты, образующейся в углеродном волокне, после отжига сорбированной нефти, непосредственно наблюдается методами оптической микроскопии. Микрофотографии углеродной ткани после отжига представлены на рис. 4.

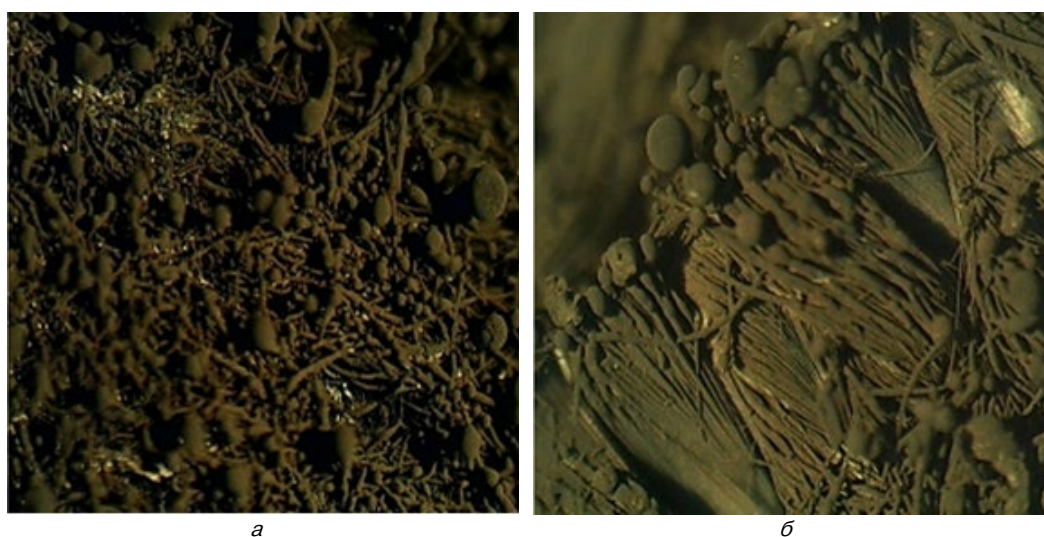


Рис. 4. Структуры углеродных волокнистых тканей после сжигания:

а – войлочная ткань; б – ТМ-4

Источник: составлено С.Я. Алибековым, Е.В. Кутоновой, В.А. Севрюгиным.

Figure 4. Structures of carbon fiber fabrics after combustion: a – felt fabric; б – TM-4

Source: compiled by S.Ya. Alibekov, E.V. Kutonova, V.A. Sevryugin.

На микрофотографиях можно видеть сферические образования, являющиеся, очевидно, остаточными твердотельными компонентами, которым соответствуют времена спин-спиновой релаксации $T_{2b} = 15,8\mu s$. Компонента с временем релаксации $T_{2a} = 500\mu s$ только частично соответствует карбонизированным молекулам асфальтенов, смол, распределенных по поверхности углеродных волокон. Наличие такой природы этой компоненты, скорее всего, и объясняет увеличение жесткости углеродного волокна после отжига нефти.

Заключение

Проведенное исследование определения нефтеемкости и регенерации углеродного сорбента показало, что углеродные ткани можно использовать

многократно для сорбции нефтепродуктов и их свойства не теряются. Таким образом, показана экономическая целесообразность применения этих материалов для сорбции и утилизации нефти и нефтепродуктов.

Исследование эффективности способов очистки углеродных тканей позволяет полагать, что углеродная ткань может эффективно пропитываться нефтью и удерживать ее в себе. Отжим углеродного волокна после сорбции удаляет практически только половину, порядка 47 %, от общего объема сорбированной нефти. Очистка углеродного волокна отжигом практически полностью регенерирует углеродную ткань. Эффективность термического способа регенерации составляет более 97 %. Установлено, что после механической очистки обожженных тканей они восстанавливают свои упругие свойства без изменения сорбционных свойств.

Список литературы

- [1] Демельханов М.Д., Оказова З.П., Чупанова И.М. Экологические последствия разливов нефти // Успехи современного естествознания. 2015. № 12. С. 91–94. EDN: VLCYPL
- [2] Сергиенко Т.Д., Шахпаронова Т.С. Методы очистки акваторий от разливов нефти и нефтепродуктов // Актуальные проблемы химического и экологического образования : 63 Всероссийская научно-практическая конференция химиков с международным участием, г. Санкт-Петербург, 14–16 апреля 2016 года : сборник научных трудов / М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «РГПУ им. А.И. Герцена», Учебно-методическое об-ние по направлениям пед. образования ; [редкол. : О. Г. Роговая и др.]. Санкт-Петербург : Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2016. С. 398–402. EDN: WBTPWZ
- [3] Фаррар Т., Беккер Э. Импульсная и фурье-спектроскопия ЯМР / пер. с англ. Б.А. Квасова ; под ред. [и с предисл.] д-ра физ.-мат. наук Э.И. Федина. Москва : Мир, 1973. 164 с.
- [4] Волков В.Я., Сахаров Б.В., Хасанова Н.М., Нургалиев Д.К. Анализ компонентного состава и свойств тяжёлых нефтей *in situ* методом ЯМР релаксации в низких магнитных полях // Георесурсы. 2018. Т. 20. № 4. Ч. 1. С. 308–323. EDN: YTDBDN
- [5] Дероум Э. Современные методы ЯМР для химических исследований / пер. с англ. Ю.М. Демина, В.А. Черткова; под ред. Ю.А. Устынюка. Москва : Мир, 1992.

References

- [1] Demelhanov MD, Okazova ZP, Chupanova IM. Environmental impacts of oil spills. *Advances in Current Natural Sciences*. 2015;(12):91–94. (In Russ.). EDN: VLCYPL
- [2] Sergienko TD, Shakhparonova TS. Methods of cleaning water areas from oil and petroleum product spills. *Actual problems of chemical and environmental education. Collection of scientific papers of the 63rd All-Russian Scientific and Practical Conference of Chemists with international participation. St. Petersburg, April 14-16, 2016. Collection of scientific papers*. St. Petersburg: A.I. Herzen Russian State Pedagogical University; 2016. p. 398–402. (In Russ.). EDN: WBTPWZ
- [3] Farrar T, Becker E. *Pulse and Fourier Transform NMR*. Translated from English. Moscow: Mir publ.; 1973. (In Russ.).

- [4] Volkov VYa, Sakharov BV, Khasanova NM, Nurgaliev DK. Analysis of the composition and properties of heavy oils in situ by low field NMR relaxation method. *Georesursy*. 2018;20(4), part 1:308-323. (In Russ.). EDN: YTDBDN
- [5] Derome AE. *Modern NMR methods for chemical research*. Ustynkzha YuA. (ed.). Moscow: Mir publ.; 1992. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Алибеков Сергей Якубович, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения и материаловедения, Институт механики и машиностроения, Поволжский государственный технологический университет, Российская Федерация, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3. ORCID: 0009-0009-8994-4481; eLIBRARY SPIN-код: 41420337. E-mail: AlibekovSY@volgatech.net

Кутонова Екатерина Васильевна, старший лаборант кафедры машиностроения и материаловедения, Институт механики и машиностроения, Поволжский государственный технологический университет, Российская Федерация, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3. E-mail: KutonovaEV@volgatech.net

Севрюгин Вячеслав Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры машиностроения и материаловедения, Институт механики и машиностроения, Поволжский государственный технологический университет, Российская Федерация, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3. AuthorID: 45071. E-mail: SevryuginVA@volgatech.net

Bio notes:

Sergei Ya. Alibekov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Volga State University of Technology, 3 Lenin Sq, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation. ORCID: 0009-0009-8994-4481; eLIBRARY SPIN-code: 41420337. E-mail: AlibekovSY@volgatech.net

Ekaterina V. Kutonova, Senior laboratory assistant of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Volga State University of Technology, 3 Lenin Sq, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation. E-mail: KutonovaEV@volgatech.net

Vyacheslav A. Sevryugin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Volga State University of Technology, 3 Lenin Sq, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation. AuthorID: 45071. E-mail: SevryuginVA@volgatech.net