

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 541.64

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОРИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК,
ПЕН И ВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАЧЕСТВЕ СОРБЕНТОВ
НЕФТЕПРОДУКТОВ**

**Алена Юрьевна Ярышева, Алла Анатольевна Долгова,
Лариса Михайловна Ярышева, Александр Анатольевич Ярославов**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра высокомолекулярных соединений, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Алена Юрьевна Ярышева,
alyonusha@gmail.com

Аннотация. Проведен сравнительный анализ структуры и сорбционных свойств нано- и микропористых материалов на основе крупнотоннажных промышленных полимеров в виде пленок, волокон, нетканых и вспененных материалов, в том числе выпускаемых в качестве упаковочных материалов, геотекстиля, медицинских изделий. Показано, что сорбционная емкость, кинетика сорбции и плавучесть исследованных материалов определяются геометрическими размерами и формой сорбента, размером и объемом пор. Наиболее эффективными оказались вспененные материалы (пенополиуретан, пенополиэтилен), которые при высокой сорбционной емкости (17–39 г/г) сохраняют плавучесть. Продемонстрирована возможность использования пористых полимерных материалов в качестве носителей бактерий-биодеструкторов нефти и нефтепродуктов.

Ключевые слова: сорбенты нефтепродуктов, промышленные полимерные пленки, волокна, вспененные полимерные материалы, спанбонд, биодеструкторы

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2026-67-2-91-99

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова АААА А21-121011990022-4 «Современные проблемы химии и физико-химии высокомолекулярных соединений». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Для цитирования: Ярышева А.Ю., Долгова А.А., Ярышева Л.М., Ярославов А.А. Исследование эффективности применения промышленных пористых полимерных пленок, пен и волоконных материалов в качестве сорбентов нефтепродуктов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2026. Т. 67. № 2. С. 91–99.

ORIGINAL ARTICLE

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF USING INDUSTRIAL POROUS POLYMER FILMS, FOAMS AND FIBER MATERIALS AS SORBENTS FOR PETROLEUM PRODUCTS**Alena Yu. Yarysheva, Alla A. Dolgova, Larisa M. Yarysheva, Alexander A. Yaroslavov**

Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Division of High Molecular Compounds, Moscow, Russia

Corresponding author: Alena Yu. Yarysheva, alyonusha@gmail.com

Abstract. A comparative analysis of the structure and sorption properties of nano- and microporous materials based on large-capacity industrial polymers in the form of films, fibers, nonwoven and foam materials, including those manufactured as packaging materials, geotextiles, and medical devices, was carried out. It has been shown that the sorption capacity, sorption kinetics and buoyancy of the studied materials are determined by the geometric size and shape of the sorbent, the size and volume of the pores. The most effective were foam materials (polyurethane foam, polyethylene foam), which retain buoyancy at high sorption capacity (17–39 g/g). The possibility of using porous polymer materials as carriers of bacteria-biodegraders of oil and oil products has been demonstrated.

Keywords: petroleum product sorbents, industrial polymer films, fibers, foamed polymer materials, spunbond, biodegraders

Financial Support. The work was carried out within the framework of the state task of the Lomonosov Moscow State University AAAA A21-121011990022- 4 «Modern Problems of Chemistry and Physical Chemistry of Macromolecular Compounds». No additional grants were received to conduct or direct this particular study.

For citation: Yarysheva A. Yu., Dolgova A. A., Yarysheva L. M., Yaroslavov A. A. Study of the effectiveness of using industrial porous polymer films, foams and fiber materials as sorbents for petroleum products // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2026. T. 67. № 2. S. 91–99.

Мировая добыча нефти в 2023 г. по статистическим данным составила 4508,4 млн т. В списке производителей Россия занимает второе место, являясь одновременно крупным потребителем и экспортером [1]. Однако добыча, транспортировка и переработка нефти, а также использование нефтепродуктов зачастую сопряжены с аварийными разливами или сопровождаются сбросом маслянистых сточных вод, что приводит к тяжелым экологическим последствиям и большим экономическим потерям. Достаточно вспомнить крупную катастрофу, связанную с разливом нефти в Мексиканском заливе в 2010 г. или катастрофу с танкерами в Керченском проливе в 2024 г. В связи с этим утилизация нефти и нефтепродуктов является предметом большого числа патентов (около 200 в России) и публикаций, в которых рассмотрены химические, физические и биологи-

ческие методы решения проблемы [2–7]. Выбор методов зависит от нескольких факторов, таких как количество и тип нефтепродуктов, погодные условия и окружающая среда на месте разлива.

Наиболее широко используемым методом очистки является использование сорбентов с микро- и нанопорами на основе природных (торф, хлопок, шерсть, сизаль и др.), синтетических полимерных (полипропилен, полиуретан и др.) и неорганических (цеолит, вермикулит, перлит, кремнезем) материалов. На основе последних был получен новый класс так называемых биосорбентов, т.е. сорбентов-носителей биологически активных добавок бактерий-деструкторов, способных включать в метаболические процессы разные классы углеводов [8].

Сорбенты нефтепродуктов могут использоваться в различных формах, например, в виде

дисперсных частиц, пленок, вспененных материалов. Эффективность их оценивается по сорбционной емкости, стабильности, плавучести, экологичности, способности к регенерации, утилизации и себестоимости. В настоящее время в мире более 300 компаний производят нефтесорбенты, из них около 50 являются российскими [9]. Однако у всех сорбентов есть свои достоинства и недостатки. Например, технология получения биосорбентов заключается в механическом смешении сорбента-носителя с сухой или жидкой формой биодобавки, поэтому при контакте с водой большая ее часть смывается с поверхности сорбента и не участвует в биодеградации нефтепродуктов, особенно в плохих метеорологических условиях. К недостаткам многих сорбентов относятся трудности их сбора (иногда в реальных условиях удается собрать только 25%) и утилизации. Таким образом, несмотря на большое разнообразие существующих путей решения проблемы, и в России, и в мире продолжается дальнейший поиск эффективных сорбентов и способов их модификации, например, поверхностно-активными веществами или коагулянтами.

Сорбенты на основе синтетических полимеров имеют ряд преимуществ по сравнению с другими материалами благодаря их дешевизне и возможности удалять нефть путем отжима. Важно, что используемые для ограждения аварийного разлива боны можно сразу наполнять полимерными сорбентами в целях увеличения их эффективности.

Настоящее исследование посвящено сравнительному анализу структуры и сорбционных свойств нано- и микропористых материалов на основе дешевых крупнотоннажных промышленных полимеров (полиэтилена, полипропилена, полиэтилентерефталата, полиуретана) в виде пленок, волокон, нетканых, вспененных и губчатых материалов, в том числе выпускаемых в качестве упаковочных материалов, геотекстиля, медицинских изделий. Интерес к подобным полимерным материалам обусловлен перспективой вторичного использования (рециклинга). Кроме того, предлагаемый в данной работе подход позволяет объединить методы биоремедиации и сорбции при «заселении» пористых полимерных сорбентов бактериями-деструкторами.

Экспериментальная часть

Объекты исследования. В качестве сорбентов исследовали неориентированные волокна аморфного стеклообразного полиэтилентерефталата (ПЭТФ) в виде комплексной нити, состоящей

из 25 отдельных волокон диаметром 35–38 мкм; неориентированные волокна полипропилена (ПП) в виде комплексной нити, состоящей из 100 волокон диаметром 30 мкм; экструдированные пленки изотактического ПП толщиной 30 мкм со степенью кристалличности 47%; пленки ПП (жестко-эластичные). Исследованы также промышленные широко используемые материалы с пористой структурой: геотекстиль – дорнит 200 г/м² (GeoSM, Россия), нетканое полотно (спанбонд, составные части медицинской маски и пеленок) 20–25 г/м² (ООО «Профпленка», Россия), пенопласт (вспененная упаковка на основе полиэтилена низкой плотности), синтепух 100 г/м² (ООО «Сантекс», Россия), мебельный поролон из пенополиуретана 22 кг/м³ (ООО «ФомЛайн», Россия). В качестве сорбируемых веществ использовали нефть, плотность 0,87–0,91 г/см³ (ООО «Компания Нефтемаркет», Россия); масло моторное, плотность 0,8744 г/см³ (REPSOL injection 10W-40, Испания). Сорбционную емкость (г/г) определяли гравиметрическим методом на сериях из пяти образцов. Расчет проводили по формуле:

$$\frac{m_t - m_0}{m_0},$$

где m_t – масса сорбента с сорбатом, m_0 – масса сорбента; ошибка измерений не превышала 10%. В качестве активной биодобавки микроорганизмов-деструкторов использовали препарат Bionex Oil Solvent из 8 видов анаэробных бактерий (ООО «Зеленая планета», Россия). Препарат готовили согласно инструкции производителя. Смачивание оценивали методом сидячей капли (объем капли деионизированной воды 4 мкл).

Получение пористых полимеров. Пористые образцы получали путем деформирования волокон и пленок по механизму крейзинга со скоростью 2 мм/мин в гептане по методике, описанной в работе [10]. Степень деформации составляла 100–200%. Температура деформирования 22 °С.

Исследование структуры. Структуру исходных и пористых полимерных материалов исследовали с помощью методов оптической микроскопии на микроскопе МЕТАМ-2 (Россия) и сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JEOL JSM-6390 LA (Япония).

Результаты и их обсуждение

В таблице представлены данные по сорбционной емкости нефти/масла для различных

Характеристики исходных и пористых полимерных материалов

Образец	Сорбционная емкость*, г/г		Объем пор см ³ /г сорбента	Плавуемость	Водо- поглощение, г/г (24 ч)
	по нефти до/после отжима	по маслу до/после отжима			
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)					
Волокно исходное	3,6 / 0,3	5 / 0,4	0,08	–	0
Волокно, крейзинг 100%	6 / 0,4	10 / 1,8	0,19	–	0
Синтепух	21 / 1	33 / 1,2	5,5	+	0,8
Геотекстиль	8,6 / 0,3	10 / 0,7	1,9	–	2,2
Полипропилен (ПП)					
Волокно исходное	1,6 / 0,1	5 / 0,2	0,1	–	0
Волокно, крейзинг 100% гептан	5 / 0,5	7 / 0,6	0,33	+	0,8
Пленка исходная	2,7 / 0,04	5 / 0,1	0	+	0
Пленка, крейзинг 200%	5 / 0,3	8 / 0,4	0,11	+	0
Пленка (жестко-эластичная)	8 / 1	15 / 2	0,67	+	0,2
Пленка (жестко-эла- стичная) рулон	12 / 1,5	–	–	+	0,9
Спанбонд из медицин- ских изделий	10 / 0,1	19 / 0,2	1,95	+	1,2
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)					
Вспененная упаковка	16 / 0,34	17 / 1	3,77	+	2
полиуретан (ПУ)					
Вспененный (поролон)	38 / 0,6	39 / 1,3	4,3	+	12

* Приведены максимальные значения.

исходных и полученных в работе пористых полимерных материалов. Очевидно, что сорбционная емкость прежде всего зависит от природы (гидрофобности, олеофильности) полимера для реализации хорошего смачивания нефтепродуктами, поэтому для работы были выбраны пленочные и волоконные материалы на основе гидрофобных полимеров (полиолефины, полиэтилентерефталат, полиуретан). Необходимо отметить, что все исследованные материалы хорошо отжимаются с небольшим остаточным содержа-

нием нефти/масла. Из данных таблицы видно, что исходные пленки и волокна ПП и ПЭТФ не отличаются высокими показателями сорбции нефтепродуктов (1,6–3,6 г/г). Для увеличения сорбционной емкости была проведена модификация волокон ПЭТФ и ПП методом крейзинга (рис. 1, а, б). Крейзинг – особый вид деформации полимеров в физически активных жидких средах, при котором происходит самодиспергирование полимера на фибриллярные агрегаты, разделенные наноразмерными порами [10–13]. Формирование

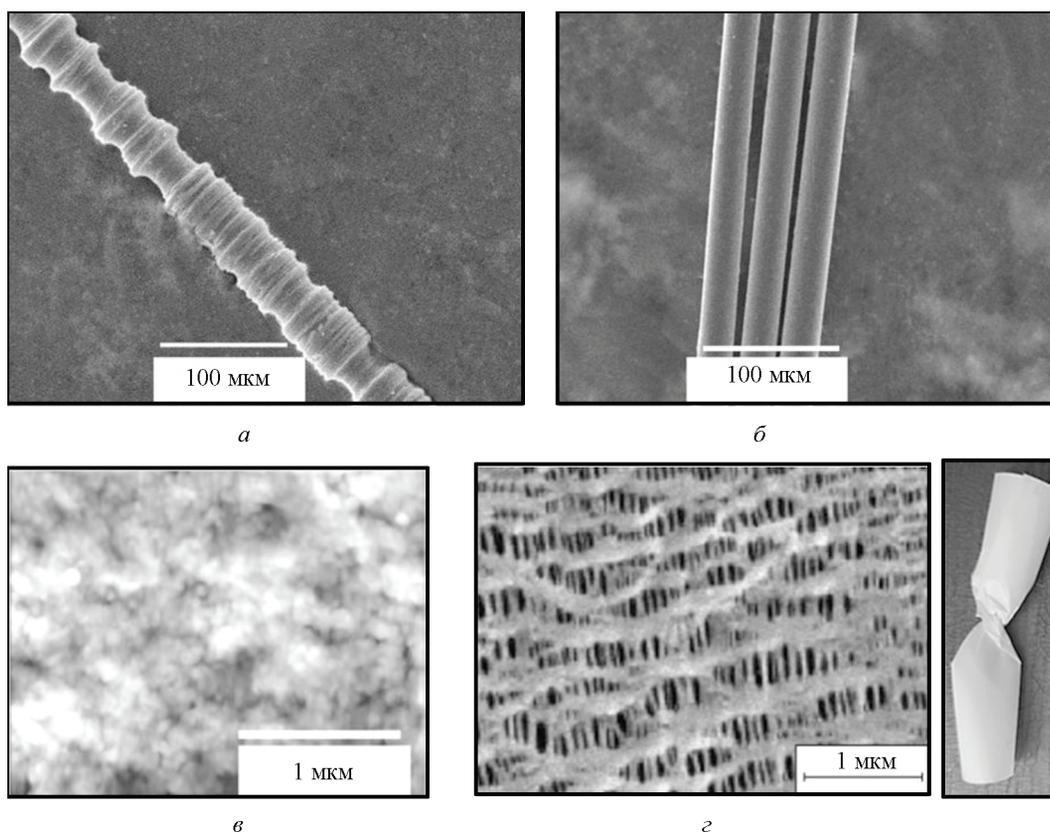


Рис. 1. СЭМ-изображения волокон: ПЭТФ (а) и ПП (б), деформированных в гептане на 100%; в - АСМ-изображение пленки ПП, деформированного в гептане по механизму крейзинга на 200%; г – СЭМ-изображение пленки жестко-эластичного ПП [14] – слева, фотография пленки ПП, свернутой в виде рулона – справа

нанопористой структуры позволило увеличить сорбционную емкость по нефти и маслу для волокон ПЭТФ в 1,7 и 2 раза, а для волокон ПП – в 1,4 и 3 раза соответственно. Однако под действием сил поверхностного натяжения исходные и модифицированные волокна в нефти/масле/воде слипаются и тонут (кроме крейзованных волокон ПП), что сильно снижает их сорбционные характеристики, которые не превышают 5–6 и 10 г/г по нефти и маслу соответственно.

Для волоконных материалов, у которых пористая структура фиксирована в узлах переплетения волокон (склейка или механическая сетка), сорбционная емкость ожидаемо оказалась выше (таблица): спанбонд – 10 г/г (нефть), 19 г/г (масло), геотекстиль – 8,6 г/г (нефть), 10 г/г (масло). Таким образом, более эффективными для сорбции нефтепродуктов оказались не нанопоры, а микро- и макропоры в пространстве между волокнами (рис. 2).

Самую высокую сорбционную емкость из волоконных материалов показал синтепух в виде распущенного волокна – 21 г/г (нефть), 33 г/г

(масло). Обнаруженные закономерности коррелируют с размером пористой структуры. Видно, что сорбционная емкость в ряду геотекстиль – спанбонд – синтепух возрастает в соответствии с увеличением размера пор от нескольких десятков до сотен микрометров (рис. 2, а–в).

Аналогичные данные были получены на полимерных пленках. Создание нанопористой структуры при деформации пленок ПП по механизму крейзинга с размером пор 4–8 нм (по методу проникновения жидкостей [14]), которые не разрешаются даже методом АСМ (рис. 1, в), привело к увеличению сорбции с 2,7 до 5 и с 5 до 8 г/г для нефти и масла соответственно. На жестко-эластичных пленках ПП с размером пор более 100 нм в ширину и микронного размера в длину (рис. 1, г) этот показатель увеличился до 8 и 15 г/г для нефти и масла соответственно. На пленках ПП было установлено влияние формы, в которой используется материал, на сорбционную емкость. Так, при переходе от развернутой формы к форме свернутого рулона (рис. 1, г справа) сорбция нефти увеличилась в 1,5 раза.

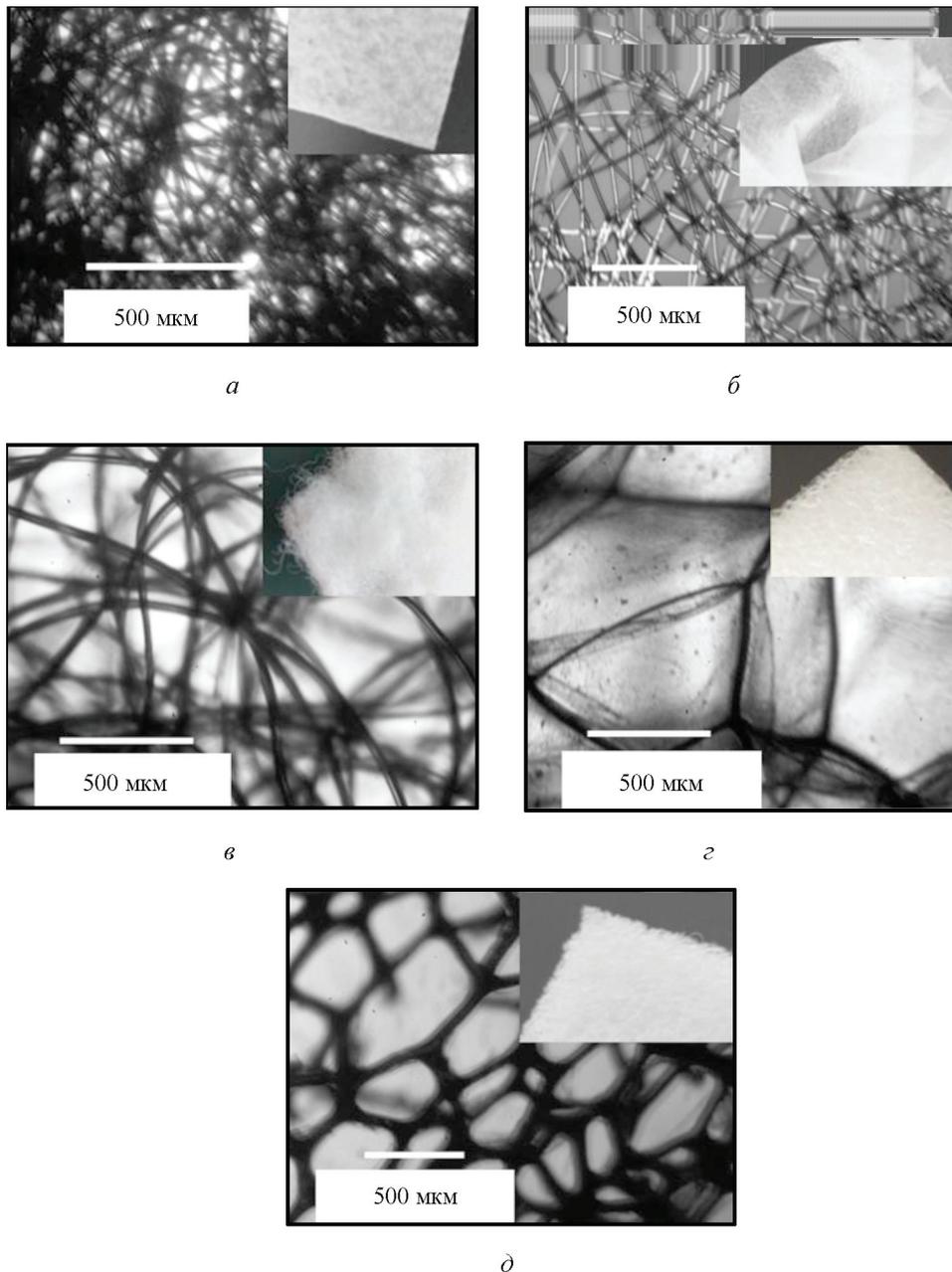


Рис. 2. Оптические изображения: *а* – геотекстиль, *б* – спанбонд медицинский, *в* – синтепух, *г* – пенополиэтилен, *д* – пенополиуретан. На вставках оптических изображений представлены фотографии полимерных изделий

Для всех материалов сорбционные показатели находятся в корреляции со свободным объемом (объемной пористостью). Этот параметр является ключевым для пористых сорбентов. Поскольку полимерная пена представляет собой пористый материал низкой плотности, созданный путем включения большого количества захваченного газа или пустот в полимерную матрицу, для вспененных материалов (губки) с большим размером пор не весь свободный объем заполняется нефтью/маслом, и остающийся

в порах воздух придает им плавучесть, которая сохранялась на протяжении всего времени наблюдения (30 дней). Таким образом, именно эти материалы оказались победителями в нашей турнирной таблице, показав как высокую сорбционную емкость (пенополиэтилен – 16 г/г (нефть), 17 г/г (масло), пенополиуретан – 38 г/г (нефть), 39 г/г (масло)), так и плавучесть (см. таблицу).

Для вспененных материалов в виду большой толщины характерна кинетика сорбции.

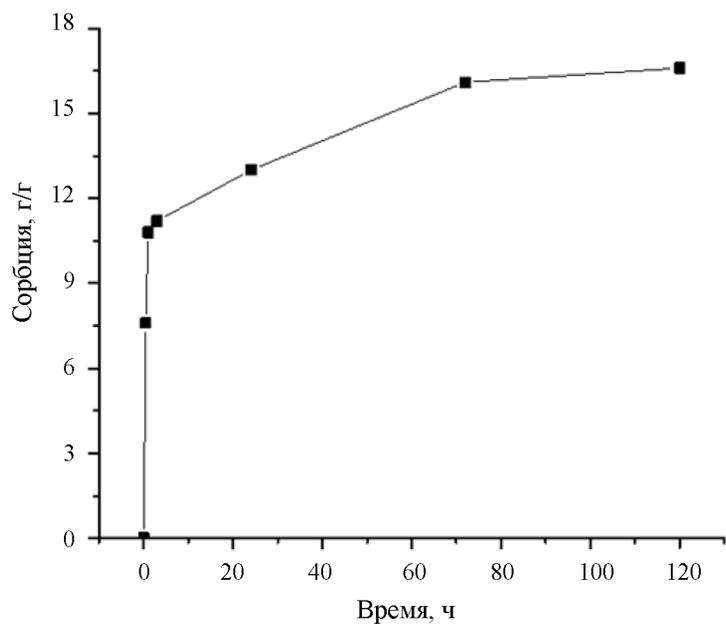


Рис. 3. Зависимость сорбции машинного масла пенополиэтиленом от времени

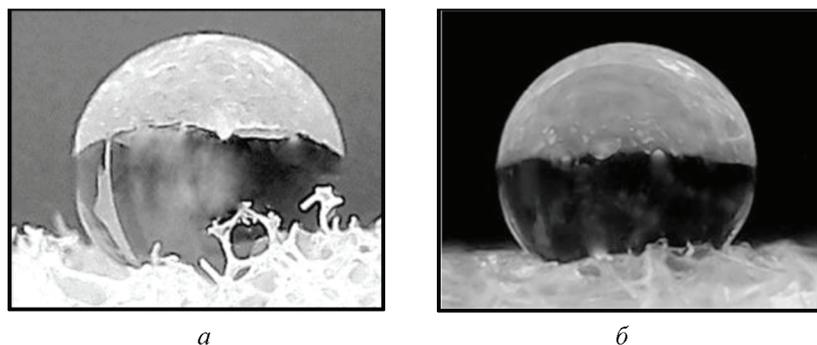


Рис. 4. Капля воды на поверхности пенополиуретана (а) и пенополиэтилена (б)

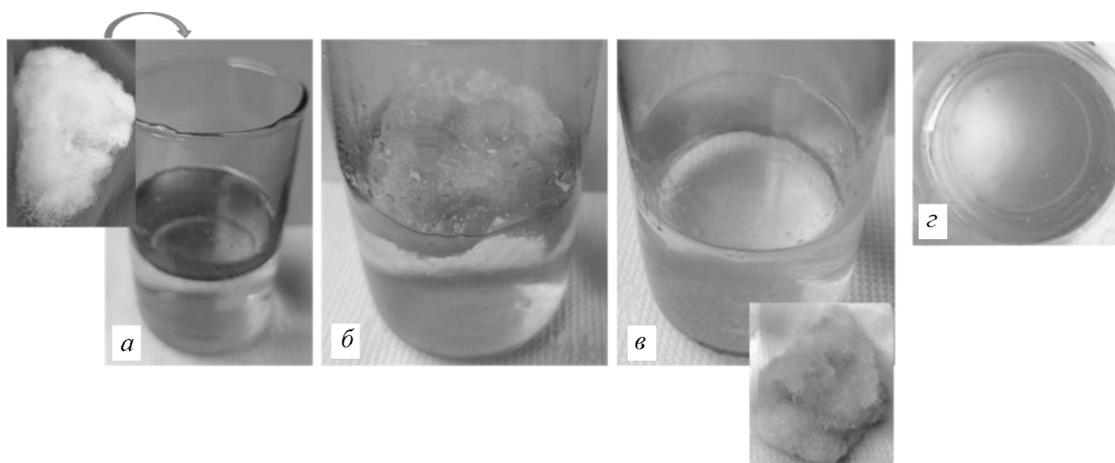


Рис. 5. Фотографии: а – вода с маслом и сорбент (синтепух), б – загрязненная вода с сорбентом, в – вода и синтепух после сорбции масла, г – вода после «работы» бактерий-деструкторов (пояснения в тексте)

На рис. 3 видно, что уже в течение 1 ч пенополиэтиленом сорбируется более 60% масла от максимально достижимых значений. В течение 3 суток наступает насыщение, и кривая сорбции выходит на плато.

Пористые полимерные материалы – это сорбенты, действие которых обусловлено физическими силами, они удаляют нефть и нефтепродукты путем адсорбции (поверхностное явление включает в себя адгезию молекул к поверхности сорбента) и абсорбции (включает в себя диффузию абсорбата по всему объему абсорбента). Механизм сорбции регулируется несколькими ключевыми параметрами и физическими явлениями. К основным движущим силам сорбции нефтепродуктов пористыми сорбентами относится капиллярная сила, которая, согласно уравнению Юнга–Лапласа [15], тем больше, чем меньше размер пор:

$$P_c = 2\gamma \frac{\cos\theta}{r}, \quad (1)$$

где γ – поверхностное натяжение масла, θ – угол контакта между маслом и поверхностью полимера, r – радиус поры. Однако это уравнение не учитывает многие важные факторы (например, вязкость среды и время сорбции). Более адекватное представление о сорбции нефтепродуктов пористыми материалами дает уравнение Уошберна для случая системы прямолинейных цилиндрических капилляров [16]:

$$h^2 = \frac{r\gamma \cos\theta}{4\eta} t, \quad (2)$$

где h – высота подъема масла, r – радиус пор, γ – поверхностное натяжение, θ – угол контакта, η – вязкость масла, t – время. Согласно этому уравнению, чем больше размер пор, тем больше высота подъема сорбируемой жидкости, т.е. повышенное поглощение свойственно именно сорбентам с более крупными порами.

Следует отметить, что несмотря на гидрофобность полиуретана с краевым углом (КУ) смачивания, равным 110 град. (рис. 4, а), для вспененного материала это правило действует даже в случае сорбции воды: в отличие от других исследованных материалов, для которых водопоглощение отсутствует или не превышает 0,1–2 г/г (КУ = 115 град., рис. 4, б), сорбция воды для пенополиуретана составила 12 г/г (таблица).

Очевидно, уравнение (2) действует до определенного предела, так как в слишком больших порах нефтепродукты задерживаться не будут и сорбент будет протекать.

Таким образом, хотя исследованные нами реальные пористые материалы обладают более сложными характеристиками (например, разной взаимосвязанностью и морфологией пор), полученные в работе результаты согласуются с вышеприведенными общими представлениями о факторах, определяющих эффективность сорбции.

В настоящей работе была исследована возможность использования пористых материалов-сорбентов в качестве носителей бактериального препарата – биодеструкторов нефтепродуктов. Как видно на рис. 5, а–в, пористые сорбенты являются эффективными материалами для разделения масла и воды благодаря своим гидрофобным и олеофильным свойствам, которые позволяют им избирательно поглощать масло.

При погружении в водную среду с пленкой масла сорбент на основе синтепуха мгновенно «берет на себя» масло и очищает воду (рис. 5, а–в). Если масло присутствует на поверхности в избытке (в данном эксперименте избыток масла добавили в воду после насыщения сорбента), то можно наблюдать действие сорбента, содержащего бактерии-деструкторы. Так, уже через 24 ч избыток масла в стакане с биосорбентом превращается в пенную эмульсию на поверхности, а еще через 48 ч вместо масла наблюдается желтоватый раствор с небольшим количеством маслянистых хлопьев, который хорошо смешивается с водой (рис. 5, г).

Таким образом, в работе установлено, что отходы (обрезки материалов) полимерного производства или вторсырье (упаковки, медицинские отходы) могут использоваться в качестве наполнителей бонов и сорбентов для эффективной утилизации и сбора нефтепродуктов. Сорбционная емкость и кинетика сорбции исследованных материалов определяются масштабным фактором (геометрическими размерами) и формой сорбента, а также размером и объемом пор. Самую высокую эффективность показали вспененные материалы (пенополиуретан, пенополиэтилен), которые при высокой сорбционной емкости (17–39 г/г) сохраняют плавучесть. Показана возможность и эффективность использования пористых полимерных материалов в качестве носителей бактерий-биодеструкторов нефти и нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_добыче_нефти
2. Saleem J., Riaz M.A., McKay G. // *Journal of Hazardous Materials*. 2018. Vol. 341 (5). P. 424 (DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.07.072).
3. Saleem J., Moghal Z.K.B., McKay G. // *Polymers*. 2024. Vol. 16 (1). P. 135 (DOI: 10.3390/polym16010135).
4. Байбурдов Т.А., Шмаков С.Л. // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2018. Т. 18. Вып. 1. С. 36 (DOI: 10.18500/1816-9775-2020-20-1-38-48).
5. Zhai W., Jiang J., Park C.B. // *Polymers Reviews*. 2021. Vol. 62 (1). P. 1 (DOI: 10.1080/15583724.2021.1897996).
6. Haridharan N., Sundar D., Kurrupasamy L., Anandan S., Liu C.H., Wu J.J. // *Polymers for Advanced Technologies*. 2022. Vol. 33 (5). P. 1353 (DOI: 10.1002/pat.5636).
7. Xu X., Liu W., Tian Sh., Wang W., Qi Q., Jiang P., Gao X., Li F., Li H., Yu H. // *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. P. 2885 (DOI: 10.3389/fmicb.2018.02885).
8. Биопрепараты - деструкторы нефти и нефтепродуктов. Курс лекций НП «Учебно-курсовой комбинат». г. Бузулук. 2014. URL: <http://www.npukk.ru/?q=node/252>.
9. Кулакова И.И., Лисичкин Г.В. Ликвидация аварийных разливов нефти. Сорбционная очистка поверхности акваторий от нефтяных загрязнений // Учебное пособие к спецкурсам кафедры химии нефти и органического катализа «Переработка нефти» и «Нефтехимия». М: МГУ. 2022 (<http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/oil/welcome.htm>).
10. Yarysheva A., Streletsov D., Malakhov S., Arzhakova O., Yarysheva L., Volynskii L. // *Polymer International*. 2020. Vol. 69 (7). P. 627 (DOI: 10.1002/pi.59980).
11. Yarysheva A.Y., Xue Y., Bolshakova A.V., Arzhakova O.V. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. Vol. 707. P. 135947 (DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.135947).
12. Yarysheva A.Y., Rukhlya E.G., Yarysheva L.M., Bagrov D.V., Volynskii A.L., Bakeev N.F. // *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 66. P. 458 (DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.03.003).
13. Волынский А.Л., Bakeev Н.Ф. Роль поверхностных явлений в структурно-механическом поведении твердых полимеров. М., 2014. 536 с.
14. Шматок Е. А., Аржакова О.В., Ярышева Л. М., Волынский А. Л., Bakeev Н. Ф. // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1990. Т. 32 (3). С. 577.
15. Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии. М., 2006. 240 с.
16. Washburn E.W. // *Physical Review*. 1921. Vol. 17 (3). P. 273 (DOI:10.1103/PhysRev.17.273).

Информация об авторах

Алена Юрьевна Ярышева – вед. науч. сотр. кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (alyonusha@gmail.com);

Алла Анатольевна Долгова – ст. науч. сотр. кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (dolgova2003@mail.ru);

Лариса Михайловна Ярышева – ст. науч. сотр. кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (yarieshev@gmail.com);

Александр Анатольевич Ярославов – зав. кафедрой высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук, профессор, чл.-корр. РАН (yaroslav@belozersky.msu.ru).

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 10.07.2025;
одобрена после рецензирования 06.08.2025;
принята к публикации 29.11.2025.