



Научная статья

Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории

Ж.В.ВАСИЛЬЕВА , М.В.ВАСЕХА, В.С.ТЮЛЯЕВ

Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия

Как цитировать эту статью: Васильева Ж.В., Васеха М.В., Тюляев В.С. Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 856-864. EDN NVFPPM. DOI: 10.31897/PMI.2023.14

Аннотация. Разработка и эксплуатация новых нефтяных месторождений на арктическом шельфе увеличивает риски нефтяных разливов, что требует использования эффективных в суровых климатических условиях средств и материалов для ликвидации аварийных разливов нефти. Актуальным является вопрос фактической эффективности сорбентов для снижения уровня нефтяного загрязнения в условиях арктических и субарктических акваторий. Работа направлена на сравнительное исследование эффективности действия сорбентов минерального и органического происхождения, используемых береговыми предприятиями Кольского залива, а также сорбента на основе хитина в модельных системах, имитирующих реальные условия морской акватории. Характеристики сорбирующих материалов определялись по методике ASTM F716-18. Сорбционная емкость оценивалась в отношении нефти сорта ARCO, дизельного топлива и масла судового. Эффективность сорбентов оценена в модельных системах «морская вода – нефть» при температуре воды, соответствующей среднегодовой температуре поверхности Баренцева моря. Получены фактические данные сорбционной емкости коммерческих сорбентов «Лессорб», «Новосорб», сорбента на основе вермикулита и полученного сорбента хитина в отношении потенциальных загрязнителей акватории. Установлена динамика насыщения морской воды нефтепродуктами при $-0,5 (\pm 1)$ и $10 (\pm 1) ^\circ\text{C}$. Показано, что при более высокой температуре концентрация нефтепродуктов в толще морской воды (при наличии нефтяной пленки на поверхности) в среднем в четыре раза выше, чем при низкой температуре. Получены кинетические зависимости, описывающие содержание нефтепродуктов в толще и приповерхностном слое морской воды в присутствии исследуемых сорбентов при $5 (\pm 1) ^\circ\text{C}$, соответствующей среднегодовой температуре Кольского залива Баренцева моря. Предложен способ оценки эффективности работы сорбентов по значениям коэффициентов регрессии, характеризующих зависимость содержания нефтепродуктов в морской воде в зависимости от природы сорбента и времени его действия.

Ключевые слова: разливы нефти и нефтепродуктов; сорбенты; Баренцево море; хитин; оценка эффективности действия сорбентов

Благодарность. Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

Поступила: 11.11.2022

Принята: 19.01.2023

Онлайн: 23.03.2023

Опубликована: 25.12.2023

Введение. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений на арктическом шельфе сопряжена с тяжелыми климатическими условиями, низкими температурами, полярной ночью, дрейфом льда и др. [1]. Эти факторы увеличивают риски возникновения аварийных ситуаций и, как следствие, загрязнения морской акватории [2]. Наибольшая вероятность аварийных разливов арктической нефти существует при ее отгрузке на танкеры-челноки (платформа Приразломная, стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал «Варандей», терминал беспричальной отгрузки нефти «Ворота Арктики»), а также при ее перевалке в Кольском заливе Баренцева моря на танкеры-накопители «Умба» и «Кола». Активно увеличиваются объемы и количество перевозок по Северному морскому пути, что потенциально повышает риски аварийных ситуаций в сложных навигационных условиях [3-5].



При этом меры по ликвидации разливов нефти в арктических и субарктических акваториях более сложные, чем в морях с умеренным климатом [6-9]. В публикации [10] указано, что меры реагирования в арктических и субарктических водах, как и при ликвидации разливов нефти в акваториях с умеренным климатом, направлены на быструю локализацию¹ и удаление разлитой нефти из морской воды, минимизацию ущерба экологическим и социально-экономическим ресурсам и сокращение времени восстановления пострадавших ресурсов за счет достижения приемлемого уровня очистки. Однако, в отличие от мер реагирования на разливы нефти в странах с умеренным климатом, меры реагирования в хрупких, но суровых условиях Арктики требуют принятия специальных мер по предотвращению стихийных бедствий [11-13].

Арктические климатические факторы изменяют эффективность действия средств и технологий по ликвидации аварийных разливов нефти. В публикации [14] указана необходимость установления эффективности каждого метода ликвидации последствий разливов нефти в различных погодных условиях, в том числе учитывая резкие изменения климата, происходящие в Арктике и прогнозируемые на будущее.

Для сбора нефти и нефтепродуктов (НП) с водной поверхности используется множество сорбентов минерального и органического происхождения [15, 16]. Сорбционный метод является одним из наиболее эффективных, экологически и экономически приемлемых методов борьбы с нефтяными загрязнениями; позволяет убрать пленку нефти, глубоко очистить воду от растворенных, эмульгированных НП [16, 17]. Минеральные сорбенты производятся из материалов с высокой удельной поверхностью на основе силикатов [18] и алюмосиликатов (цеолиты) [19], вермикулита [20], бентонита [21] и др. [15, 22, 23]. Перспективными и не наносящими дополнительный вред при ликвидации разливов нефти и НП считаются биоразлагаемые сорбенты органического происхождения на основе торфа, угля, древесных отходов, целлюлозы, зерновых продуктов и т.д. [24-26]. В то же время остается открытым вопрос об эффективности ликвидации разливов нефти и НП данными сорбентами в акваториях морей Арктики [27]. По мнению В.Е.Когана [28] вопрос устранения загрязнений нефти с водных поверхностей в Арктике пока не решен. В статье [4] указан недостаток эффективных и надежных с точки зрения получаемого результата методов и технологий для ликвидации аварийных разливов нефти в акваториях Крайнего Севера. Таким образом, актуальным является вопрос исследования эффективности применения существующих сорбционных материалов для снижения уровня нефтяного загрязнения в условиях арктических и субарктических акваторий.

В литературе широко распространены исследования, связанные с использованием хитозана в качестве сорбента НП в случае разливов нефти на почве, поверхности воды и для очистки сточных вод [29-31]. Однако хитозан имеет высокую стоимость, сложный процесс получения и востребованность в более высокотехнологичных отраслях медицины и пищевой промышленности [32, 33]. Ввиду экономической нецелесообразности он редко используется в промышленных масштабах как сорбционный материал для ликвидации аварийных разливов нефти. В отличие от хитозана хитин может быть получен по более простой технологической схеме и с меньшими экономическими затратами [34]. Он дешевый и может обладать аналогичными свойствами в отношении эффективности сорбции НП в условиях аварийных разливов нефти.

Цель работы – изучение сорбционной активности минеральных и органических сорбентов, применяемых для мероприятий по ликвидации аварийных разливов нефти и НП в акватории Баренцева моря. Изучены сорбционные свойства хитина, полученного из отходов переработки ракообразных, в условиях разлива НП в арктической акватории.

Методы. В качестве объектов исследования выбраны сорбирующие материалы органического происхождения – «Лессорб» и хитин, а также минерального происхождения – «Новосорб» и сорбент на основе термообработанного вермикулита. Выбранные в качестве объектов исследования сорбционные материалы «Лессорб», «Новосорб» и сорбент на основе вермикулита стоят на

¹ Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2451 «Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации, а также о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». URL: <https://base.garant.ru/400170332> (дата обращения 20.09.2022).

вооружении у береговых служб и предприятий, осуществляющих морехозяйственную деятельность в акватории Кольского залива Баренцева моря, в качестве средств, используемых при ликвидации аварийных разливов нефти и НП.

Сорбент «Лессорб» (ТУ 9010-002-35615057-99) производится в промышленных масштабах из сфагнового мха и торфа; «Новосорб» (ТУ 6418-001-57901390-02) относится к сорбентам на минеральной основе. Производимые промышленностью сорбенты на основе вспученного вермикулита представляют собой термообработанный, модифицированный минерал из группы гидрослюд. Хитин, применяемый для исследования, получен из отходов переработки промысловых ракообразных – краба *Paralithodes Camtschaticus* (кафедра техносферной безопасности Мурманского государственного технического университета). Получение хитина осуществлялось путем последовательной реализации стадий деминерализации и депротеинирования измельченного панциря головогруди (карапакса). Полученный хитин представляет собой хлопья бело-кремового цвета диаметром 2-5 мм.

Характеристики сорбирующих материалов определялись по методике ASTM F716-18². Сопоставление значений сорбционной емкости у коммерческих сорбентов со значениями, заявленными производителями, выполнено как в отношении нефти сорта ARCO (динамическая вязкость, $\eta = 29$ мПа·с), так и других НП, которые могут стать загрязнителями акватории: дизельного топлива судового маловязкого ($\eta = 2,0$ мПа·с), масла гидравлического судового ($\eta = 0,5$ мПа·с). Выбор НП в качестве загрязнителей обусловлен наиболее вероятными их разливами при бункеровке судов и перевалке арктической нефти в акватории Кольского залива.

Эффективность использования сорбентов для снижения концентрации НП в морской воде изучалась в модельных системах «морская вода – нефть» в статических условиях, где в качестве модельного загрязнителя использована нефть сорта ARCO. Нефть вносилась в объеме 10 мл в емкости с морской водой, отобранный в акватории Кольского залива. Площадь загрязнения водной поверхности во всех модельных системах составила 0,12 м². Температура воды в серии экспериментов выдерживалась 5 (±1) °C, имитируя среднегодовую температуру поверхности Баренцева моря у входа в Кольский залив. При моделировании процесса ликвидации аварийного разлива нефти сорбционный материал равномерно размещался на образцы загрязненной воды при массовом отношении сорбента к НП, равном 1:1. Отбор проб морской воды после обработки сорбентом осуществлялся через 1; 1,5; 2,5; 3; 4; 4,5 ч. Пробы отбирались из различных слоев воды – из приповерхностного слоя на расстоянии 2-3 см от поверхности с нефтяной пленкой и из толщи воды на глубине 20 см. Временные рамки проведения модельного эксперимента установлены исходя из времени локализации разлива нефти и НП, определенного постановлением Правительства РФ³.

Измерялась концентрация НП в толще воды при температуре окружающей среды –5 °C и температуре морской воды –0,5 (±1) °C, имитируя условия разлива НП в зимний период, а также при температуре окружающей среды 16 °C и температуре морской воды 10 (±1) °C, имитируя условия разлива НП в летний период. Опыт продолжался в течение четырех суток. Массовое соотношение НП к воде при этом равно 1:1000.

Содержание НП в морской воде определялось согласно методике⁴ с использованием стандартного флуориметрического метода на анализаторе жидкости «Флюорат-02».

² ASTM F716-18, Standard Test Methods for Sorbent Performance of Absorbents for Use on Chemical and Light Hydrocarbon Spills, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. URL: <https://www.astm.org/Standards/F716> (дата обращения 30.10.2022).

³ Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2451 «Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации, а также о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». URL: <https://base.garant.ru/400170332> (дата обращения 20.09.2022).

⁴ Качественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». ПНД Ф 14.1.2.4.128-98. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200079424> (дата обращения 20.09.2022).



Эффективность снижения загрязнений модельных растворов от НП определялась по формуле

$$G = \frac{C_0 - C_k}{C_0} \cdot 100 \%,$$

где C_0 , C_k – начальная и конечная концентрация НП в пробе воды, мг/л.

Обсуждение результатов. Характеристики сорбционных материалов определены в отношении различных НП при стандартных условиях и сопоставлены со значениями, заявленными производителями сорбентов, и литературными данными (см. таблицу).

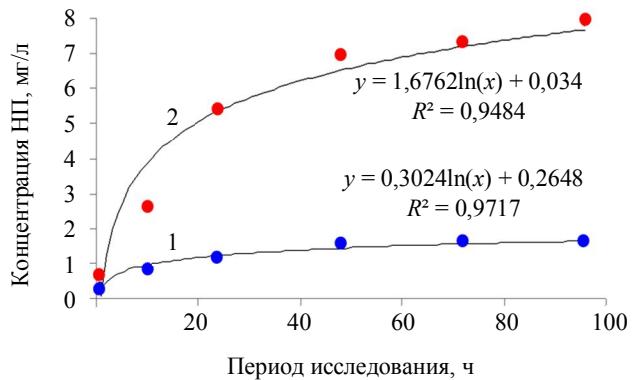


Рис.1. Изменение концентрации НП в толще воды при разливе нефти при $-0,5 (\pm 1)$ (1) и $10 (\pm 1)$ $^{\circ}\text{C}$ (2)

Сорбционная емкость, г/г

Образец НП	«Лессорб»		Хитин		«Новосорб»		Вермикулит	
	Результаты исследования	Заявлено производителем ⁵	Результаты исследования	Литературные данные [35, 36]	Результаты исследования	Заявлено производителем ⁶	Результаты исследования	Заявлено производителем ⁷
Нефть	6,25	4,0-15,0	5,59	3,9-4,5	4,72	6	4,62	8-12
Дизельное топливо	5,63	3,3-9,5	5,31	–	4,53	–	4,28	–
Судовое масло	6,35	–	5,61	–	5,28	–	5,48	–

Анализ экспериментальных данных показал, что сорбционная емкость каждого материала в отношении различных НП изменяется в пределах 10-20 %. Наибольшую сорбционную емкость все исследованные материалы показали в отношении судового масла, а наименьшую – дизельного топлива. Полученные результаты сорбционной емкости отличаются от заявленных производителями значений как в меньшую, так и большую сторону. Разница между экспериментальными и заявленными производителями значениями может объясняться разными причинами: нарушением герметичности упаковки при транспортировке и длительном хранении; отличием состава и качества сорбируемых НП, методов и условий определения; вязкостью и химическим составом НП.

В реальных условиях разливов на результаты сорбции НП может значительно влиять температура. В условиях Кольского залива и Баренцева моря диапазоны зимних и летних температур морской воды значительно отличаются от температур, при которых обычно определяют сорбционную емкость сорбентов. В связи с этим необходимо учитывать температуру как один из ключевых факторов, влияющих на сорбционные свойства. Температура влияет на поверхностные явления, реологические характеристики НП, кинетику эмульгирования, испарения, седиментации и другие процессы, протекающие при работе сорбентов. Функция отклика, показывающая влияние температуры на распространение НП в толще воды, – его концентрация. Для оценки влияния температуры на распространение содержания НП в воде исследована динамика значения концентрации НП (рис.1) в условиях имитации разлива нефти в зимний и летний период в акватории Кольского залива при температурах окружающей среды -5 и 16 $^{\circ}\text{C}$ и температуре морской воды $-0,5 (\pm 1)$ и $10 (\pm 1)$ $^{\circ}\text{C}$ соответственно.

⁵ Сорбенты «Лессорб». URL: <https://lessorb.ru/products/sorbents/vidy-sorbentov/syupuchie-sorbents/sorbents-lessorb/> (дата обращения 30.10.2022).

⁶ Сорбент «Новосорб». URL: http://specudm.ru/production/catalog_4/sorbents/sorbent_novosorb.html (дата обращения 30.10.2022).

⁷ Подробные сведения о вспученном вермикулите. URL: <https://agroru.com/news/podrobnye-svedeniya-o-vspuchennom-vermikulite-114768.htm> (дата обращения 21.09.2022).

Из результатов следует, что содержание НП в толще воды при наличии нефтяной пленки на поверхности увеличивается на протяжении всего периода наблюдений. При температуре воды зимнего периода $-0,5$ (± 1) $^{\circ}\text{C}$ рост концентрации не такой стремительный, концентрационная кривая выходит на состояние насыщения на 3-4 сут при значении НП в воде 1,7-1,8 мг/л. Вода летнего периода насыщается НП сильнее и за первые сутки концентрация НП достигает значения 5,2 мг/л. Дальнейший контакт нефтяной пленки с водой приводит к возрастанию концентрации в толще воды до 7,9 мг/л на четвертые сутки наблюдения. Такое влияние температуры на распределение загрязнителя необходимо учитывать при организации работ по ликвидации разливов нефти в различные сезоны года.

В реальных условиях разливов результаты сорбции НП сорбционными материалами также могут значительно отличаться от установленных характеристик ввиду того, что в морской среде сорбция протекает в многофазной системе, включающей такие компоненты, как вода, НП, воздух (пары нефти), поверхность сорбента. Это влечет за собой установление целого ряда гетерогенных равновесий между поверхностями раздела фаз.

Сравнительная оценка эффективности использования различных сорбентов в модельных системах «морская вода – нефть – сорбент» и «морская вода – нефть» позволила получить данные по кинетике процессов сорбции в условиях температуры 5 (± 1) $^{\circ}\text{C}$, имитирующей среднегодовую температуру воды Кольского залива и начального уровня загрязнения НП поверхностного слоя морской акватории 1,24 мг/л (рис.2). Моделирование в системе «морская вода – нефть» осуществлялось для учета вклада естественной деградации НП в морской среде под действием различных природных факторов [8].

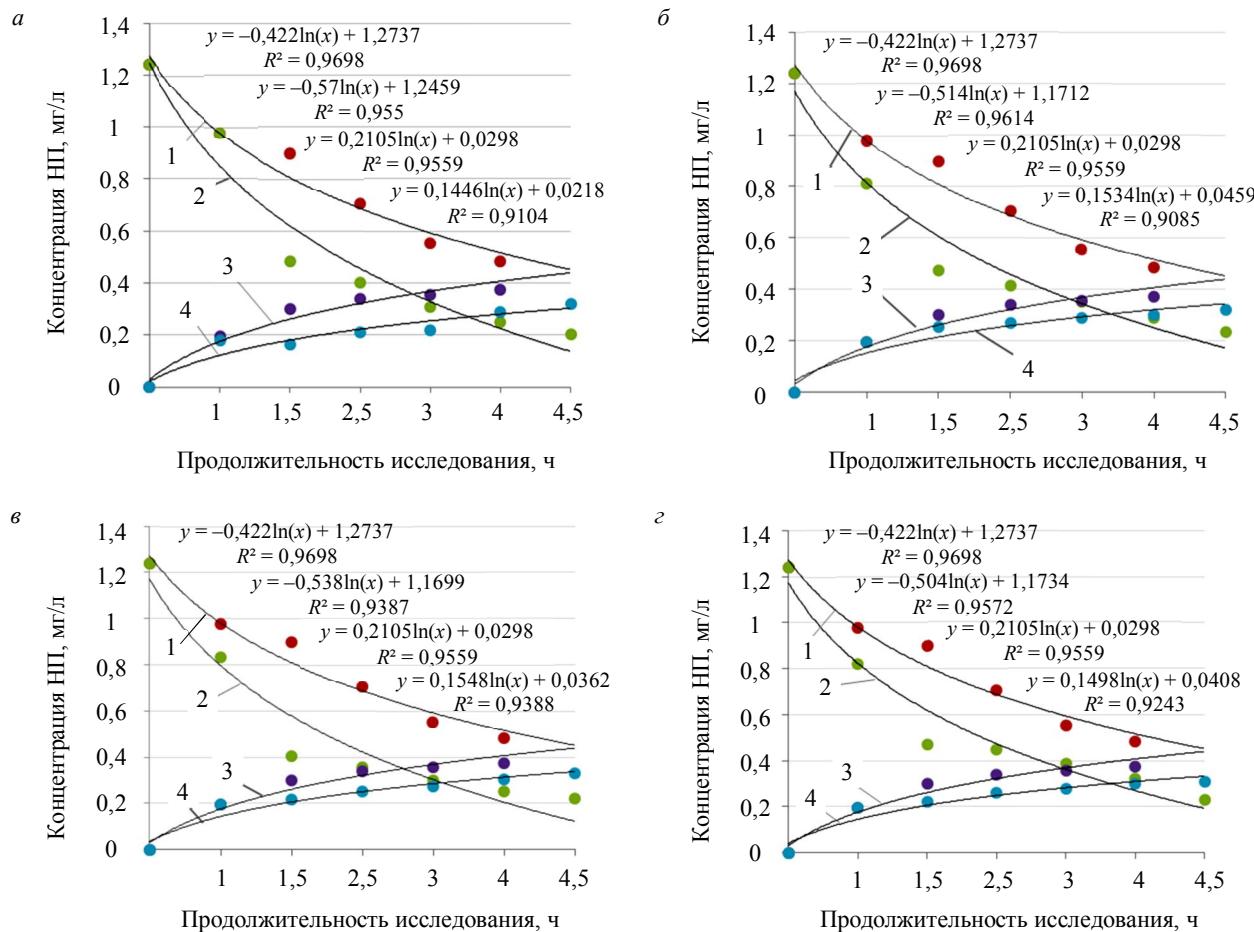


Рис.2. Изменение концентрации НП в модельных системах «морская вода – нефть» с добавлением сорбента и без него:
 а – хитин; б – «Новосорб»; в – «Лессорб»; г – вермикулит

1 – приповерхностный слой без сорбента; 2 – приповерхностный слой с сорбентом; 3 – в толще воды без сорбента; 4 – в толще воды с сорбентом



В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии и общего вида $y = b\ln(x) + a$, характеризующие зависимость содержания НП в толще и приповерхностном слое морской воды в установленных условиях эксперимента (рис.2).

Уравнение для описания зависимости изменения концентрации НП в приповерхностном слое при разливе нефти в условиях отсутствия сорбента (рис.2, кривая 1) выглядит следующим образом:

$$y = -0,422\ln(x) + 1,2737.$$

Величина достоверности аппроксимации для установленной зависимости составила $R^2 = 0,9698$.

Уравнение для описания зависимости изменения концентрации НП в толще воды при разливе нефти в условиях отсутствия сорбента (рис.2, кривая 3):

$$y = 0,2105\ln(x) + 0,0298.$$

Величина достоверности аппроксимации для установленной зависимости составила $R^2 = 0,9559$.

Установлены логарифмические зависимости изменения концентрации НП в приповерхностном слое морской воды в случае использования сорбентов (рис.2, кривая 2): хитина, «Новосорба», «Лессорба», сорбента на основе вермикулита:

$$y = -0,57\ln(x) + 1,2459;$$

$$y = -0,514\ln(x) + 1,1712;$$

$$y = -0,538\ln(x) + 1,1699;$$

$$y = -0,504\ln(x) + 1,1734.$$

Коэффициент достоверности аппроксимации для установленных зависимостей R^2 составил 0,955; 0,9614; 0,9387; 0,9572 соответственно.

Аналогично установлены зависимости содержания НП в толще воды от времени разлива при загрязнении морской воды нефтью при использовании сорбентов (рис.2, кривая 4): хитина, «Новосорба», «Лессорба», сорбента на основе вермикулита:

$$y = 0,1446\ln(x) + 0,0218;$$

$$y = 0,1534\ln(x) + 0,0459;$$

$$y = 0,1548\ln(x) + 0,0362;$$

$$y = 0,1498\ln(x) + 0,0408.$$

Коэффициент достоверности аппроксимации для установленных зависимостей R^2 составил 0,9104; 0,9085; 0,9388; 0,9243 соответственно.

Кривые 1 и 2 (рис.2) показывают изменение концентрации НП в приповерхностном слое без использования сорбентов и в их присутствии. В течение всего периода наблюдений концентрации НП в приповерхностном слое снижаются как в первом, так и во втором случае. Понижение концентраций НП в воде модельных систем происходит за счет испарения, растворения, эмульгирования и других физических и химических процессов [8], а также счет действия сорбентов в случае их присутствия в системе. При этом интенсивность снижения концентрации НП в присутствии сорбентов выше. Скорость снижения концентрации НП в приповерхностном слое мы оцениваем по абсолютному значению коэффициента уравнения регрессии. Коэффициент регрессии b отражает скорость изменения концентрации НП в морской среде, – чем выше абсолютная величина этого значения, тем интенсивнее снижается содержание. Так, через 4 ч эксперимента содержание НП

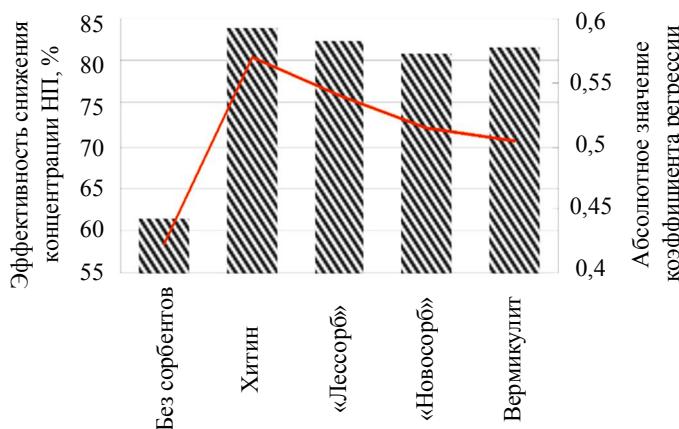


Рис.3. Эффективность снижения содержания НП и абсолютное значение коэффициента регрессии

в приповерхностном слое воды без сорбента составило 0,48 мг/л ($b = 0,422$), в присутствии сорбента хитина 0,25 мг/л ($b = 0,57$); при использовании «Новосорба» 0,29 мг/л ($b = 0,514$), при использовании «Лессорба» 0,25 мг/л ($b = 0,538$), при действии вермикулита 0,32 мг/л ($b = 0,504$). Из представленных значений коэффициентов регрессии следует, что наибольшая скорость нефтепоглощения наблюдается в системе «морская вода – нефть – хитин». Ход кривых 2 (рис.2) свидетельствует о схожей кинетике процессов для исследованных случаев изменения концентрации НП в приповерхностном слое морской воды.

Эффективность снижения концентрации НП при использовании сорбентов G , оцениваемая путем отнесения разницы начальной и конечной концентраций НП к начальной концентрации загрязнений, не вполне коррелирует с оценкой процесса сорбции с помощью коэффициентов регрессии. На рис.3 отображена диаграмма сравнения показателей эффективности снижения концентраций НП за исследованный временной промежуток 4,5 ч и соответствующие коэффициенты регрессии установленных зависимостей. Наибольшей величине эффективности снижения НП 83,7 %, проявленной в присутствии хитина, соответствует наибольший коэффициент регрессии 0,57. Второму по величине значению эффективности 82,3 %, установленному для сорбента «Лессорба», соответствует коэффициент регрессии 0,538. Но наименьшей величине эффективности снижения концентрации НП 80,9 %, проявленной в присутствии «Новосорба», соответствует коэффициент несколько больший, чем для сорбента на основе вермикулита – 0,514 против 0,504. При этом за указанный временной промежуток сорбент на основе вермикулита показал большую эффективность снижения НП – 81,5 %. Это можно объяснить различным физическим смыслом сравниваемых величин. Так, эффективность G зависит от значений исходной и конечной концентраций НП и не учитывает поведение системы в другие временные отрезки, в которые эффективность может принимать иные значения. Кривая регрессии учитывает все экспериментальные данные, полученные за весь период наблюдений, поэтому целесообразно эффективность работы сорбентов оценивать по обоим критериям. В случае с хитином максимальное значение эффективности G соответствует максимальному значению коэффициента регрессии b .

Кривые 3 и 4 (см. рис.2) показывают изменение концентрации НП в толще воды без использования сорбентов и в их присутствии. В течение 4 ч наблюдений в толще морской воды (рис.2, кривая 3) постепенно повышается концентрация из-за развития процессов растворения, эмульгирования нефти и распределения компонентов нефти в объеме модельной системы «морская вода – нефть». Повышение концентрации НП в толще воды при отсутствии сорбента происходит с коэффициентом регрессии 0,2105, в то время как в присутствии сорбентов коэффициенты регрессии имеют следующее значение: 0,1446 для хитина; 0,1534 для «Новосорба»; 0,1548 для «Лессорба»; 0,1498 для вермикулита.

Разность в значениях коэффициентов регрессии для кривых 1 и 2, соответствующих содержанию НП в приповерхностном слое, значительно больше, чем разность коэффициентов регрессии для кривых 3 и 4. Это свидетельствует о том, что влияние находящегося на поверхности сорбента на концентрацию НП в толще менее ощутимое, чем в приповерхностном слое.

Через 4,5 ч наблюдений кривые 1 и 3 сходятся при значении концентрации, равном 0,42 мг/л. Это значит, что за данный промежуток времени в исследуемых модельных системах и условиях концентрации НП сравнялись во всем объеме.

Оценить эффект действия сорбентов для толщи воды путем расчета G не представляется возможным, так как содержание НП в этом случае со временем увеличивается даже в присутствии сорбентов. Определить эффект действия сорбента в этом случае можно лишь по значению коэффициента регрессии.



Данные по эффективности сорбентов в отношении нефти и НП, полученные при стандартных условиях (см. таблицу), отличаются от поведения сорбентов в реальных условиях ликвидации разливов из-за ряда факторов природного и антропогенного характера, которые не учитываются исследователями и производителями сорбционных материалов. Поэтому наиболее адекватные результаты можно получить в реальных условиях или моделях, имитирующих их. В условиях модельных систем «морская вода – нефть – сорбент» при 5 °C за исследуемый промежуток времени эффективность сорбентов составила, %: 83,7 для хитина; 82,3 для «Лессорба»; 80,9 для «Новосорба»; 81,5 для вермикулита.

Заключение. Получены экспериментальные данные сорбционной емкости коммерческих сорбентов «Лессорб», «Новосорб», хитина, сорбента на основе вермикулита в отношении потенциальных загрязнителей акватории Баренцева моря – нефти сорта ARCO, судового дизельного топлива и судового гидравлического масла. Сопоставлены полученные результаты по сорбционной емкости с данными, заявленными производителями.

Установлена динамика насыщения морской воды НП при $-0,5 (\pm 1)$ и $10 (\pm 1)$ °C. Показано, что при более высокой температуре концентрация НП в толще морской воды при наличии нефтяной пленки на поверхности в среднем в четыре раза выше, чем при низкой температуре.

Получены кинетические зависимости, описывающие содержание НП в толще и приповерхностном слое морской воды в присутствии исследуемых сорбентов в условиях модельного эксперимента при $5 (\pm 1)$ °C, имитирующих среднегодовую температуру Кольского залива Баренцева моря. Кинетика изучаемых процессов описывается логарифмическими уравнениями со значениями коэффициента достоверности аппроксимации R^2 более 0,9. Характер и ход кривых для приповерхностного слоя и толщи воды отличаются. Предложена методика оценки эффективности действия сорбентов посредством сопоставления абсолютного значения коэффициента регрессии b , отражающего скорость изменения концентрации НП в морской среде. Чем выше абсолютная величина значения b , тем ниже содержание НП при действии сорбента. В приповерхностном слое коэффициент регрессии имеет отрицательное значение, что отражает снижение концентраций НП. В толще воды коэффициент имеет положительное значение и отражает возрастание содержания НП во всем временном промежутке разлива.

Оценена эффективность действия сорбентов «Новосорб», «Лессорб», вермикулита и полученного из отходов переработки промысловых ракообразных хитина по результатам изменения концентраций НП в условиях имитационного моделирования разлива нефти при среднегодовой температуре в акватории Кольского залива. Показано, что эффективность использования хитина в качестве сорбента сопоставима с применяющимися промышленными аналогами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pongrácz E., Hänninen N. Arctic Marine Sustainability: Arctic Maritime Businesses and the Resilience of the Marine Environment // Arctic Marine Sustainability. Cham: Springer, 2020. 504 p. DOI: 10.1007/978-3-030-28404-6
2. Jacobsen S., Haver K., Gudmestad O., Tuntland Ø. Overview of Measures Specifically Designed to Prevent Oil Pollution in the Arctic Marine Environment from Offshore Petroleum Activities // Offshore Technology Conference, 24-26 October 2016, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada. 2016. № OTC-27432-MS. DOI: 10.4043/27432-MS
3. Балмасов С. Судоходный трафик в акватории СМП в 2020 г. // Арктические ведомости. 2021. № 1. С. 86-101.
4. Муленко В.В., Сапрыкина К.М. Экологические и экономические риски разработки морских нефтегазовых месторождений Крайнего Севера // Территория НЕФТЕГАЗ. 2016. № 2. С. 94-99
5. Zhaoyang Yang, Zhi Chen, Kenneth Lee et al. Decision support tools for oil spill response (OSR-DSTs): Approaches, challenges, and future research perspectives // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 167. № 112313. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112313
6. Sajid Z., Khan F., Veitch B. Dynamic ecological risk modelling of hydrocarbon release scenarios in Arctic waters // Marine Pollution Bulletin. 2020. Vol. 153. № 111001. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111001
7. Aune M., Aniceto S., Biuw M. et al. Seasonal ecology in ice-covered Arctic seas – Considerations for spill response decision making // Marine Environmental Research. 2018. Vol. 141. P. 275-288. DOI: 10.1016/j.marenres.2018.09.004
8. Brakstad O.G., Lofthus S., Ribicic D. et al. Biodegradation of Petroleum Oil in Cold Marine Environments // Psychrophiles: From Biodiversity to Biotechnology. Cham: Springer, 2017. P. 613-644. DOI: 10.1007/978-3-319-57057-0_27
9. Hazaimeh M., Ahmed E. Bioremediation perspectives and progress in petroleum pollution in the marine environment: a review // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. Iss. 20. P. 54238-54259. DOI: 10.1007/s11356-021-15598-4
10. Wilkinson J., Beegle-Krause C.J., Evers K.-U. et al. Oil spill response capabilities and technologies for ice-covered Arctic marine waters: a review of recent developments and established practices // Ambio. 2017. Vol. 46. P. 423-441. DOI: 10.1007/S13280-017-0958-Y

11. Ferguson D.K., Carmen Li, Chunqing Jiang et al. Natural attenuation of spilled crude oil by cold-adapted soil bacterial communities at a decommissioned high Arctic oil well site // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 722. № 137258. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137258
12. Bambulyak A., Sydnes A., Sydnes M. Oil-spill response in the Russian Arctic // *Handbook on the Politics of the Arctic*. Cheltenham: Edward Elgar, 2015. P. 66-86. DOI: 10.4337/9780857934741
13. Berg T.E., Selvik Ø., Rautio R. et al. Comparison of SAR Strategies in Norwegian and Russian Part of the Barents Sea // Arctic Technology Conference, 24-26 October 2016, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada. OnePetro, 2016. № OTC-27330-MS. DOI: 10.4043/27330-MS
14. Berkman P., Vylegzhanin A. Challenges of Oil Spill Response in the Arctic // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security in the Arctic Ocean*. 2013. P. 255-279. DOI: 10.1007/978-94-007-4713-5_24
15. Tao Zhang, Zhangdi Li, Yuanfei Lü et al. Recent progress and future prospects of oil-absorbing materials // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2019. Vol. 27. P. 1282-1295. DOI: 10.1016/j.cjche.2018.09.001
16. Asadpour R., Harith Z.Z., Sapari N. Application of sorbent materials in oil spill management: a review // *Caspian Journal of Applied Sciences Research*. 2013. Vol. 2. Iss. 2. P. 46-58.
17. Bhardwaj N., Bhaskarwar A.N. A review on sorbent devices for oil-spill control // *Environ Pollution*. 2018. Vol. 243. Part B. P. 1758-1771. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.09.141
18. Tsybulskaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A. et al. The research on the sorption properties of the X-ray amorphous silica foam // *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 23. № 101567. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101567
19. Pabi's-Mazgaj E., Pichniarczyk P., Stempkowska A., Gawenda T. Possibility of Using Natural Zeolite Waste Granules Obtained by Pressure Agglomeration as a Sorbent for Petroleum Substances from Paved Surfaces // *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 19. № 6871. DOI: 10.3390/ma15196871
20. Anh Tuan Hoang, Xuan Phuong Nguyen, Xuan Quang Duong, Thanh Tung Huynh. Sorbent-based devices for the removal of spilled oil from water: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 28876-28910. DOI: 10.1007/s11356-021-13775-z
21. Salem S., Salem A., Agha Babaei A. Preparation and characterization of nano porous bentonite for regeneration of semi-treated waste engine oil: Applied aspects for enhanced recovery // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 260. P. 368-376. DOI: 10.1016/j.cej.2014.09.009
22. Ezzat A.O., Ali M.S., Al-Lohedan H.A. Synthesis, Characterization, and Application of Magnetite Nanoparticles Coated with Hydrophobic Polyethyleneimine for Oil Spill Cleaning // *Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 2022. № 3368298. DOI: 10.1155/2022/3368298
23. Fokina N.V., Miazin V.A. Use of Mineral Sorbents for the Purification of Natural Environments from Petroleum Products in the Kolsky Northern Region // *Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology*. 2019. Vol. 1. P. 735-739. DOI: 10.2991/isees-19.2019.147
24. Zamparas M., Tzivras D., Dracopoulos V., Ioannides T. Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials: A Review // *Molecules*. 2020. Vol. 25. Iss. 19. № 4522. DOI: 10.3390/molecules25194522
25. Singh C.J., Mukhopadhyay S., Rengasamy R.S. A sustainable approach to oil spill cleanup by kapok and waste cotton needle punched nonwoven blends // *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 191. Part A. № 115939. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115939
26. Paulauskienė T., Jucikė I. Aquatic oil spill cleanup using natural sorbents // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 22. P. 14874-14881. DOI: 10.1007/s11356-015-4725-y
27. Павлов А.В., Васильева Ж.В. Исследование сорбентов нефти и нефтепродуктов для ликвидации аварийных разливов нефти в морях Арктического региона // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 5. С. 89-94. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-17089
28. Коган В.Е. Стеклообразные пеноматериалы неорганической и органической природы и перспективы очистки окружающей среды от загрязнений нефтью и нефтепродуктами // *Записки Горного института*. 2016. Т. 218. С. 331-338
29. Escudero-Oñate C., Martínez-Francés E. A Review of Chitosan-Based Materials for the Removal of Organic Pollution from Water and Bioaugmentation // *Chitin-Chitosan: Myriad Functionalities in Science and Technology*. Rijeka: InTech, 2018. Vol. 4. P. 71-87. DOI: 10.5772/intechopen.76540
30. Eweida B.Y., Omer A.M., Tamer T.M. et al. Kinetics, isotherms and thermodynamics of oil spills removal by novel amphiphilic Chitosan-g-Octanal Schiff base polymer developed by click grafting technique // *Polymer Bulletin*. 2022. DOI: 10.1007/s00289-022-04260-9
31. Александя К.Г., Кильякова А.Ю., Еремин И.С. Нефтяные сорбенты на основе природных материалов // *Нефтегазохимия*. 2020. № 1. С. 57-60. DOI: 10.24411/2310-8266-2020-10110
32. Sethia S., Medhaa K., Kaith B.S. A review on chitosan-gelatin nanocomposites: Synthesis, characterization and biomedical applications // *Reactive and Functional Polymers*. 2022. Vol. 179. № 105362. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105362
33. Hengtong Zhang, Xixi Wu, Liang Quan, Qiang Ao. Characteristics of Marine Biomaterials and Their Applications in Biomedicine // *Marine Drugs*. 2022. Vol. 20. Iss. 6. № 372. DOI: 10.3390/md20060372
34. Showket Ahmad Dar, Fahd Mohammed Abd Al Galil. Biodegradation, Biosynthesis, Isolation, and Applications of Chitin and Chitosan. Cham: Springer, 2022. 42 p. DOI: 10.1007/978-3-030-83783-9_72-1
35. Тарановская Е.А., Собгайды Н.А., Некрасова Т.А., Маркина Д.В. Применение полиакриламида и хитозана для очистки стоков от нефтепродуктов // *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2015. № 4. С. 11
36. de Freitas Barroso F.C., Grombone Vasconcello L.C., Carvalhoc T.V., do Nascimentoa R.F. Removal of Petroleum Spill in Water by Chitin and Chitosan // *Orbital*. 2014. Vol. 6. Iss. 1. P. 70-74. DOI: 10.17807/orbital.v6i1.509

Авторы: Ж.В.Васильева, канд. техн. наук, заведующий кафедрой, vasilevazhv@mstu.edu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2254-1452> (Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия), М.В.Васеха, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0003-0672-5662> (Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия), В.С.Тюляев, аспирант, <https://orcid.org/0000-0002-5217-3945> (Мурманский государственный технический университет, Мурманск, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.