

на правах рукописи



ФОНАРЕВА КСЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**СОРБЦИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ
ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНЫМ ВОЛОКНОМ
И ЕГО РЕГЕНЕРАЦИЯ
ЦЕНТРОБЕЖНЫМ СПОСОБОМ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа - 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Сентяков Борис Анатольевич

Официальные оппоненты:

Голованчиков Александр Борисович

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»/кафедра «Процессы и аппараты химических производств»,
заведующий кафедрой;

Акулинин Евгений Игоревич

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»/кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», доцент.

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (г. Казань).

Защита состоится «20» сентября 2017 года в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.289.03 ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Абдульминев Ким Гимадиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные темпы воздействия объектов химических и нефтехимических отраслей промышленности на экологию и человека требуют активных действий при разработке методов изучения и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов, обеспечивающих минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод. Проблема минимизации отходов и очистки сточных вод, а также ликвидация последствий нефтяных разливов приобретает в стране все более серьезное значение. Удаление нефтепродуктов из воды до значений предельно допустимых концентраций их содержания, возможно с использованием деструктивных методов, с применением различных сорбционных материалов. Применение природных материалов в очистке территорий и водоемов выгодно с экономической точки зрения, но зачастую такие материалы не обладают необходимыми сорбционными свойствами, а также являются одноразовыми. Использование синтетических волокнистых сорбирующих материалов позволит эффективно впитывать нефтепродукты, удерживая их в своем объеме с последующей регенерацией и возможностью повторного использования.

Процессы сорбции нефтепродуктов волокнистыми сорбентами изучены недостаточно – их эксплуатационные свойства могут быть определены только трудоемким опытным путем. Предприятия нефтехимического комплекса, на которых имеется угроза разлива нефтепродуктов, не всегда располагают эффективными средствами для регенерации используемых волокнистых сорбентов. Поэтому, теоретические и экспериментальные исследования процессов сорбции нефтепродуктов волокнистыми сорбентами и создание аппаратов для их регенерации актуальны.

Объектом исследования является процесс сорбции нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном и процесс его регенерации центробежным способом.

Предметом исследования является полиэтилентерефталатное волокно, получаемое путем переработки вторичного полимерного сырья, и центробежная установка для его регенерации после сорбции нефтепродуктов.

Цель диссертационной работы - повышение эффективности процесса ликвидации последствий разливов нефтепродуктов в процессе деятельности нефтехимической отрасли промышленности за счет применения волокнистого полиэтилентерефталатного волокна и технических средств его регенерации.

Задачи диссертационной работы:

- разработать, теоретически обосновать и экспериментально подтвердить возможность создания графической модели волокнистого сорбента позволяющей при расчете коэффициента сорбции использовать классические положения капиллярного эффекта;

- выполнить экспериментальные исследования процесса сорбции нефтепродуктов с различной условной вязкостью образцами полиэтилентерефталатного волокна различного качества при различных температурах окружающей среды и определить рациональное значение среднего диаметра волокон;

- разработать новую конструкцию центробежной установки для регенерации волокнистых сорбирующих изделий в условиях низких температур, разработать рекомендации по ее расчету и экспериментально исследовать процесс регенерации.

Методы исследования

В работе реализованы теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретическое исследование процесса сорбции нефтепродуктов волокнистыми сорбентами и расчета продолжительности центрифугирования проведены с использованием законов гидродинамики, математического моделирования. Экспериментальные исследования выполнены с применением теории планирования эксперимента, статистических методов обработки результатов с использованием современных регистрирующих и вычислительных средств.

Научная новизна работы

1 Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что графическая модель волокнистого сорбента может представлять собой систему элементарных капилляров, образованных близкорасположенными на одинаковом радиусе элементарными волокнами, что позволяет при расчете коэффициента сорбции использовать классические положения капиллярного эффекта;

2 Получены новые эмпирические зависимости для расчета эффективности процесса сорбции нефтепродуктов с различной вязкостью полиэтилентерефталатным волокном, имеющим различный средний диаметр элементарных волокон, и определено его рациональное значение равное 50 мкм;

3 На основе результатов экспериментального исследования процесса регенерации центробежным способом любых волокнистых сорбирующих изделий разработана новая конструкция центробежной установки и рекомендации по ее расчету, отличающаяся от известных увеличенным

коэффициентом отжатия волокнистых материалов в условиях низких температур.

Практическая значимость работы

Апробирован метод экспериментального определения сорбции нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном, устанавливающий зависимость коэффициента сорбции от качественных характеристик элементарных волокон. Получены эмпирические зависимости, позволяющие с достаточной для инженерных расчетов точностью вычислить значения коэффициентов сорбции и отжима при изменяющихся в достаточных пределах основных факторов процесса - условной вязкости сорбируемых нефтепродуктов от 10 до 95 с и среднего диаметра элементарных волокон от 10 до 145,1 мкм.

Разработаны конструкции центробежных установок, позволяющие увеличить коэффициент отжатия волокнистых материалов от вязких жидкостей в условиях низких температур.

Результаты работы использованы в производственной деятельности промышленного предприятия ООО «НИК» (г. Воткинск, Удмуртской республики) и в учебном процессе Воткинского филиала ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались: на Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых “Инновации и актуальные проблемы техники и технологий – 2010” (г. Саратов, октябрь 2010 г.); XXXVII-й Молодежной научно - технической конференции АО «Воткинский завод» (г. Воткинск, март 2011г.); Международной молодежной научной конференции “XIX Туполевские чтения, посвященная 50-летию первого полета человека в космос” (г. Казань, май 2011г.); IX-й Международной научно-практической конференции “Технические науки – от теории к практике” (г. Новосибирск, апрель 2012 г.); I-й Городской молодежной научно – практической конференции (г. Воткинск, апрель 2012 г.); научных семинарах кафедры «Технология машиностроения и приборостроения» Воткинского филиала ИжГТУ им. М. Т. Калашникова в 2010-2013 гг.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки РФ, 2 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, но не рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки

РФ по группе специальностей 05.17.00, одной монографии, а также 2-х патентах РФ на изобретение.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, основных результатов и выводов, списка литературы, включающего 94 наименования и приложений. Работа изложена на 158 листах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается её актуальность, определяются цель и задачи, излагаются научная новизна, защищаемые положения и практическая ценность.

В первой главе приведен анализ сорбентов для сбора нефтепродуктов, методик в изучении процессов сорбции, машин и агрегатов для регенерации волокнистых материалов после процесса сорбции нефтепродуктов.

Проведенный аналитический обзор существующих технических решений, методов и средств для сорбции нефти, и нефтесодержащих продуктов выявил существенные преимущества сорбирующих материалов, таких как полипропилен, полиуретан, поропласт, полиэтилентерефталат и т.д.

Теоретические подходы в изучении процессов сорбции, основные расчетные параметры сорбционной очистки воды - эффективность, скорость поглощения и время работы сорбционного материала изложены в работах отечественных и зарубежных ученых: Ф. А. Каменщикова, Е. И. Богомольного, П. М. Оти Мото, А. А. Консейсао да и А. Б. Голованчикова.

В эффективном решении задачи регенерации сорбирующих материалов от нефтесодержащих компонентов используют машины и агрегаты, основанные на центробежном способе. Сложность решения этой задачи состоит в том, что нефть, в отличие от воды имеет большую вязкость, которая существенно увеличивается с понижением температуры среды, поэтому применение известных центробежных установок в условиях низких температур, когда ставится задача ликвидации разливов нефти на водных поверхностях в зимнее время, не всегда оказывается возможным.

На основе выполненного обзора научной, технической и патентной литературы, изучения сорбирующих материалов и средств регенерации, сформулирована цель работы и определены задачи исследования.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов сорбции нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном и его регенерация центробежным способом.

В первой серии опытов по экспериментальному исследованию процессов сорбции нефтепродуктов применена весовая методика и определена последовательность опытов по определению сорбционной способности и плавучести полиэтилентерефталатного волокна. В результате чего было установлено, что образцы полиэтилентерефталатного волокна с различными диаметрами могут адсорбировать без последующей утечки в несколько раз больше нефти, чем их собственный вес. Насыщенный нефтью на 20% образец со средним диаметром элементарных волокон 15 мкм остается на плаву более 96 часов.

Во второй серии опытов определялась эффективность сорбции различных нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном различного качества. Методической основой для проведения исследований является теория планирования эксперимента. Реализован полный факторный эксперимент вида 2^2 . Критериями оценки эффективности сорбции был принят коэффициент сорбции K_c , определяемый как отношение массы сорбированного нефтепродукта m_n к массе m_e используемого для этого образца полиэтилентерефталатного волокна, и коэффициент отжима K_o , определяемый как отношение массы m_e сухого образца к массе m_y образца полиэтилентерефталатного волокна после удаления из него нефтепродукта способом механического отжима.

В качестве варьируемых факторов приняты средний диаметр d_e элементарных волокон образцов полиэтилентерефталатного волокна и условная вязкость нефтепродуктов μ .

Приняв функции отклика в виде линейных полиномов с взаимодействием факторов, и вычислив коэффициенты регрессии, получены математические зависимости коэффициентов сорбции сорбируемого нефтепродукта:

$$K_c = 5,634 - 0,0038d_e + 0,096\mu - 0,0005\mu d_e, \quad (1)$$

$$K_o = 0,403 + 0,0003d_e - 0,0011\mu - 0,00003\mu d_e, \quad (2)$$

где K_c - коэффициент сорбции, K_o - коэффициент отжима, d_e - средний диаметр элементарных волокон, из которых состоит образец исследуемого полиэтилентерефталатного волокна, мкм, μ - условная вязкость, с.

В результате получены эмпирические зависимости, позволяющие с достаточной для инженерных расчетов точностью, вычислить значения

коэффициентов сорбции полиэтилентерефталатного волокна со средним диаметром элементарных волокон от 10 до 145,1 мкм.

В третьей серии опытов определялась возможность применения полиэтилентерефталатного волокна в холодное время года при ликвидации модельных разливов нефти, нефтепродуктов и индивидуальных органических жидкостей в условиях низких температур окружающей среды (таблица 1), а также сорбция нефти с водных поверхностей.

Характер полученных зависимостей свидетельствует о том, что процесс сорбции полиэтилентерефталатным волокном с понижением температуры окружающей среды практически не изменяется для таких нефтепродуктов, как бензин, дизельное топливо.

Таблица 1 - Поглощение нефти и нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном при различных температурах окружающей среды

№ п/п	Нефтепродукты	Количество поглощенного нефтепродукта, г/г					
		t = -18 °С		t = 0 °С		t = 20 °С	
		Образец №1	Образец №2	Образец №1	Образец №2	Образец №1	Образец №2
1	Бензин АИ-80	2,2	7	2	7,5	1,4	8
2	Дизельное топливо	6	10,5	4	8,5	3,5	9
3	Нефть (ПСП «Мишкино»)	*-	*-	25,5	23,5	26,5	25,5
4	Трансмиссионное масло Роснефть "KineticSAE" 80W90	23,5	19	24,5	21	25,5	26,5

* Нефть становится густой при температуре ниже - 4 °С и плохо абсорбируется.

Сорбционные свойства нефти с понижением температуры окружающей среды ухудшаются, нефть становится густой и полиэтилентерефталатное волокно медленнее адсорбирует нефть. Максимальное насыщение полиэтилентерефталатного волокна нефтепродуктами при +20 °С достигается за 2-3 мин, а при - 18 °С в течение 10-12 мин (кроме нефти), что связано с влиянием температур на вязкость сорбируемого продукта. Это изменение скорости процесса сорбции необходимо учитывать на практике при работе с сорбентами в условиях низких температур и для разработки рекомендаций по их применению в качестве технических средств защиты окружающей среды.

Для изучения процесса сорбции нефти с поверхности воды было проведено экспериментальное исследование процесса сорбции, график

зависимости коэффициента сорбции K_c нефти полиэтилентерефталатным волокном от среднего диаметра элементарных волокон представлен на рисунке 1.

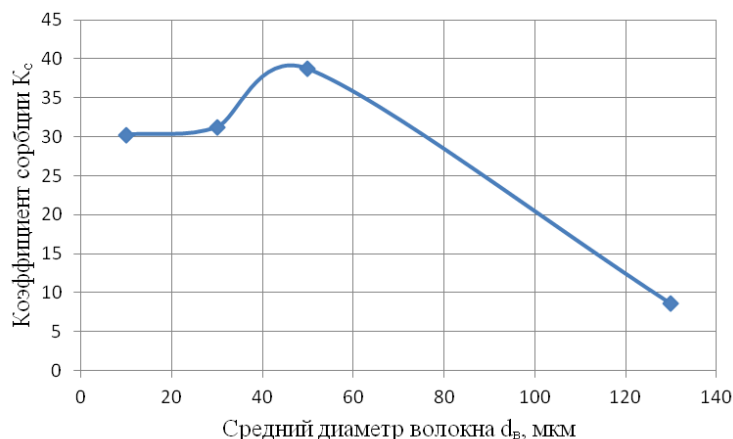


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента сорбции от среднего диаметра волокон

Анализируя этот график можно заметить, что наилучшей сорбционной способностью среди исследованных образцов полиэтилентерефталатного волокна обладает образец со средним диаметром элементарных волокон $d_g = 50$ мкм. С увеличением диаметра волокон увеличивается расстояние между ними и нефть в межволоконном пространстве не может удерживаться, а с уменьшением диаметра волокон уменьшается и расстояние между ними, что затрудняет возможность проникновения нефти во внутренние области сорбирующих изделий – именно эти две причины приводят к такому уменьшению коэффициента сорбции.

Экспериментальное исследование процесса регенерации осуществлялось в подготовленной центрифуге. Для исследования использовались два одинаковых образца. Первый образец – волокно белого цвета, диаметр волокна $d_g = 80 \dots 100$ мкм; второй образец – волокно красного цвета, диаметр волокна $d_g = 40 \dots 60$ мкм. В качестве нефтесодержащей жидкости в процессе экспериментов использовалось промышленное масло И-20А с характеристиками: кинематическая вязкость - $29,8 \text{ мм}^2/\text{с}$; плотность при 20°C - 867 кг/м^3 . Результаты исследования образцов волокнистого материала представлены в таблице 2.

При увеличении количества циклов регенерации от 1 до 25 происходит уменьшение коэффициента сорбции: полиэтилентерефталатное волокно красного цвета – от 16,7 до 12,48, а полиэтилентерефталатное волокно белого цвета – от 11,42 до 9,69. При этом происходит потеря массы регенерируемых образцов волокна: масса образца красного цвета уменьшилась от 8,6 до 6,50г, а масса образца белого цвета – от 11,37 до 10,11г.

График зависимости коэффициента сорбции от количества циклов регенерации представлен на рисунке 3.

Таблица 2 – Результаты исследования процесса сорбции

№ опыта	Белое волокно	Красное волокно	Белое волокно	Красное волокно	Белое волокно	Красное волокно	Белое волокно	Красное волокно
	m_n масса волокна с нефтью, г		m_o масса отделенной нефти, г		m_e масса образца волокна, г		K_c коэффициент сорбции	
1	129,84	143,62	117,96	130,05	11,37	8,60	11,42	16,7
2	126,11	130,25	115,68	105,98	11,22	8,53	11,24	15,27
3	140,49	128,48	128,02	118,22	11,65	8,56	12,60	15,01
4	128,08	128,33	117,23	108,31	11,57	8,51	11,07	15,08
5	122,21	120,34	107,68	111,87	10,98	8,59	11,13	14,01
6	127,86	118,98	117,06	109,05	11,08	8,45	11,54	14,08
10	120,56	109,95	107,64	95,37	11,01	7,82	10,95	14,06
11	105,69	116,97	95,04	105,07	10,72	7,93	9,86	14,75
15	119,79	115,58	111,13	106,59	10,87	7,90	11,02	14,63
16	122,69	98,48	111,25	84,66	10,81	6,82	11,35	14,44
20	119,78	92,53	108,54	86,39	10,83	6,72	11,06	13,77
21	120,77	87,31	109,42	78,93	10,93	6,68	11,05	13,07
25	97,96	81,11	87,52	67,99	10,11	6,50	9,69	12,48

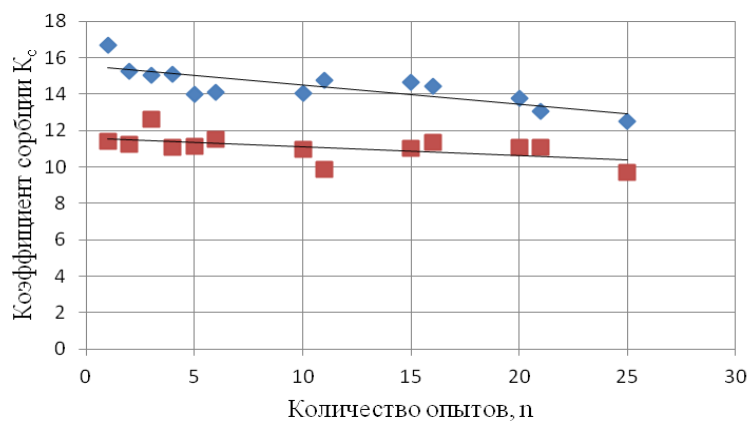


Рисунок 3 - График зависимости коэффициента сорбции от количества циклов регенерации

Третья глава посвящена моделированию и расчету основных параметров процессов сорбции нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном, а также регенерации волокнистых сорбирующих изделий центробежным способом.

При использовании для сбора нефтепродуктов с водных поверхностей полиэтилентерефталатного штапельного волокна требуется знать количество

сорбента, необходимое для удаления определенного количества нефтепродуктов. Эту задачу можно решить, если знать, какая толщина пленки нефтепродукта образуется на элементарном волокне в процессе сорбции нефтепродукта таким материалом. Несмотря на имеющиеся в этом направлении разработки, вопросам исследования толщины нефтяной пленки оставшейся после процесса сорбции на волокнистом сорбенте, не уделялось достаточного внимания. Поэтому в данной работе поставлена задача: рассчитать толщину пленки нефтепродукта, которая осталась на элементарном волокне после процесса сорбции. В качестве исследуемого образца использовали полиэтилентерефталатное волокно.

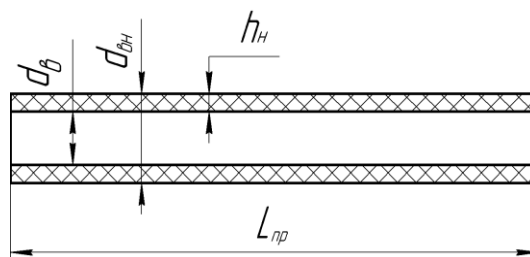


Рисунок 4 - Элементарное волокно с нефтяной пленкой

Толщину нефтяной пленки обозначим h_n , мкм, d_0 – средний диаметр элементарных волокон, мкм, d_{0n} – средний диаметр элементарного волокна с пленкой нефтепродукта, мкм, $L_{пр}$ – приведенная длина элементарного волокна, м (рисунок 4). Толщина пленки нефтепродукта, образовавшейся на поверхности элементарного волокна, определяется по схеме, приведенной на рисунке 4:

$$h_n = (d_{0n} - d_0) / 2. \quad (3)$$

Условно принимаем, что образец, сорбирующий нефтепродукт волокна, представляет собой единичное волокно диаметром d_0 и длиной $L_{пр}$, которую в дальнейшем будем называть приведенной длиной единичного волокна. Объем такого единичного волокна определяется по формуле

$$V_{e0} = (\pi d_0^2 / 4) L_{пр}, \quad (4)$$

откуда имеется возможность определить приведенную длину $L_{пр}$.

В результате толщина пленки нефтепродукта, образовавшейся на поверхности элементарного волокна в ходе проведенного эксперимента, составляет 120 мкм при среднем диаметре элементарного волокна 53,3 мкм. Полученный результат показывает, что толщина пленки нефтепродукта в два

раза больше, чем средний диаметр элементарных волокон исследованного образца, что в принципе вряд ли возможно. Следовательно, можно утверждать, что сорбция нефтепродукта с применением рассмотренного волокнистого сорбента происходит не только на поверхности составляющих его элементарных волокон, но и в промежутках между хаотично расположенных соседних волокон, что необходимо будет учесть при дальнейших расчетах сорбционной способности волокнистых материалов рассмотренного типа.

Для решения задачи определения коэффициента сорбции различных нефтепродуктов волокнистым сорбентом на основе полиэтилентерефталатного волокна условно представим сорбент в виде множества изогнутых близкорасположенных элементарных волокон, образующих между собой систему капилляров.

Сорбент представляет собой систему элементарных капилляров приведенным радиусом r (рисунок 5), образованных близкорасположенными элементарными волокнами в количестве z_k , имеющими радиус кривизны R (рисунок 6).

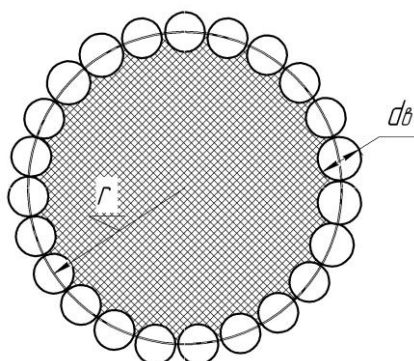


Рисунок 5 - Графическая модель сорбента в сечении

В основу рассуждений положена методика вывода уравнения Уошборна, устанавливающего зависимость глубины проникновения жидкости в капилляр от продолжительности процесса, представленной в работе В.А. Волкова.

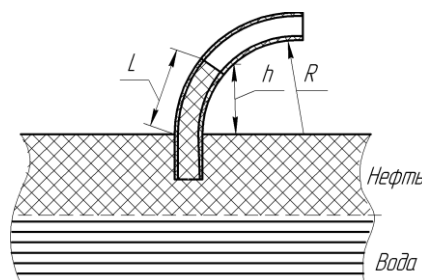


Рисунок 6 - Графическая модель сорбента

Предлагаемая графическая модель процесса сорбции жидкости полиэтилентерефталатным волокном максимально приближена к реальному процессу, так как волокна, образующие систему капилляров, расположены не вертикально, а имеют реальные искривления в пространстве, в этом случае выражение, описывающее коэффициент сорбции, учитывающий массу свободно впитавшейся жидкости, имеет вид

$$K_c = 4 r^2 \rho / d_g^2 \rho_g, \quad (5)$$

где K_c – коэффициент сорбции, r – гидравлический радиус капилляра, м, ρ – плотность жидкости, кг/м³, d_g – средний диаметр элементарных волокон, м, ρ_g – плотность волокна, кг/м³.

Если предположить, что каждый единичный капилляр волокнистого сорбента образован некоторым количеством элементарных волокон диаметром d_g размещенных на окружности, радиус которой равен гидравлическому радиусу капилляра r , то имеет силу равенство

$$r = z_k d_g / 2\pi, \quad (6)$$

где z_k – количество элементарных волокон.

При расчете коэффициента сорбции представилась сложность в определении количества z_k элементарных волокон, образующих единичные капилляры. Для определения z_k предложено использовать полученные ранее результаты экспериментального исследования процесса сорбции нефти полиэтилентерефталатным волокном (таблица 3).

Таблица 3 - Результаты расчета количества элементарных волокон, образующих единичный капилляр

№ опыта	d_g , диаметр волокна, м	m_n , масса собранный нефти, кг	m_b , масса образца волокна, кг	K_c , коэффициент сорбции (эксперимент)	r , гидравлический радиус капилляра, м	z_k , количество элементарных волокон	K_c , коэффициент сорбции (расчет)
1	0,000010	0,00723	0,00270	26,78	0,000034	21	25,5
2	0,000030	0,093	0,00301	31,23	0,00011	23	33
3	0,000051	0,10138	0,00262	38,7	0,00021	25	35,1
4	0,000130	0,03671	0,00429	8,56	0,00025	12	11,4

Анализируя результаты, представленные в таблице 3, можно заметить, что с увеличением среднего диаметра элементарных волокон от 10 до 51 мкм коэффициент сорбции увеличивается от 26,78 до 38,1, а при дальнейшем увеличении среднего диаметра элементарных волокон от 51 до 130 мкм - уменьшается до 8,56. Заметим также, что количество z_k элементарных волокон, образующих единичные капилляры зависит от диаметра волокон d_e (рисунок 7).

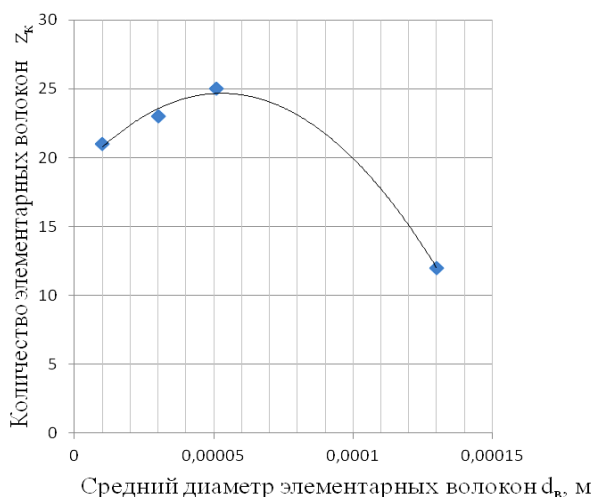


Рисунок 7 -Зависимость количества элементарных волокон z_k , образующих элементарный капилляр от диаметра элементарных волокон d_e

Результаты расчета коэффициента сорбции нефти рассматриваемым волокнистым сорбентом на основе полиэтилентерефталатного волокна при его принудительном погружении в жидкость с результатами экспериментальных исследований приведены на рисунке 8.

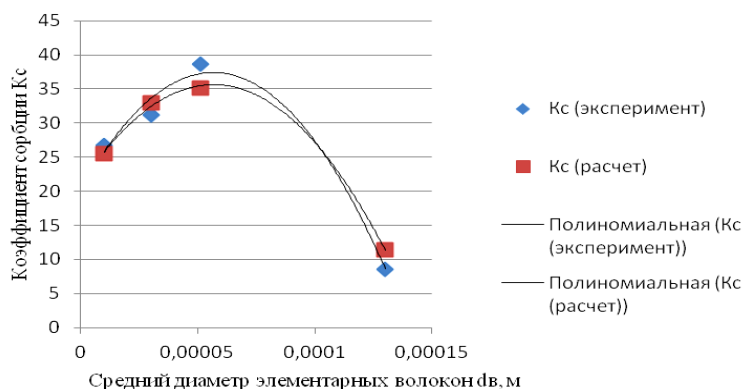


Рисунок 8 - Зависимость коэффициента сорбции K_c от диаметра элементарных волокон d_e

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что расхождение результатов эксперимента и расчета не превышает для среднего

диаметра элементарных волокон от 10 до 51 мкм -10%, а для среднего диаметра элементарных волокон от 130 мкм -25%.

При проектировании аппаратов для регенерации способом центрифугирования ставится задача определения расчетных зависимостей, связывающих основные технические характеристики таких центробежных аппаратов со свойствами волокнистых сорбирующих изделий и отделяемых от них в процессе центрифугирования жидкостей.

Расчетная формула, по определению продолжительности центрифугирования с учетом рабочего радиуса R_2 перфорированного барабана центрифуги, поперечного размера сорбирующего изделия $L=R_2-R_1$, угловой скорости вращения барабана ω , вязкости сорбируемой жидкости η и диаметра капилляра d_k имеет вид

$$\tau = 4 \eta (R_2 - R_1) / \pi^2 n^2 r_k^2 (R_2 + R_1) \rho_{ж} , \quad (7)$$

где τ – продолжительность центрифугирования, мин, η – вязкость сорбируемой жидкости, Па·с, R_2-R_1 – поперечный размер перфорированного барабана, м, n – частота вращения барабана, 1/с, r_k – гидравлический радиус капилляра, м, $\rho_{ж}$ – плотность сорбируемой жидкости, кг/м³.

Анализируя формулу (7) заметим, что продолжительность процесса центрифугирования зависит от динамической вязкости нефти η , которая в зависимости от месторождения и температуры может изменяться от 1 до 30 мПа·с. Очевидно, что продолжительность процесса значительно уменьшается с увеличением среднего диаметра элементарных волокон, образующих волокнистое сорбирующее изделие. Существенного уменьшения продолжительности процесса центрифугирования можно добиться при увеличении радиуса и частоты вращения перфорированного барабана центрифуги и уменьшения поперечного размера волокнистого сорбирующего изделия.

Производительность Q процесса отделения жидкости от волокнистого сорбирующего изделия центробежным способом определяется по формуле

$$Q = V_{ж} K_{om} / \tau , \quad (8)$$

где $K_{om} = 0,9$ – определенный экспериментально коэффициент отделения, показывающий какая часть жидкости отделяется от волокнистого сорбирующего изделия в процессе центрифугирования; $V_{ж}$ – объем жидкости, отделенной от волокнистого сорбирующего изделия в процессе

центрифугирования, который вычисляется исходя из определения коэффициента сорбции K_c :

$$m_{жс} = K_c m_в \quad \text{или} \quad V_{жс} \rho_{жс} = K_c V_в \rho_в, \quad (9)$$

где $\rho_в = 10 \dots 30 \text{ кг/м}^3$ - плотность волокнистого сорбирующего изделия, $V_в = \pi H (R_2 - R_1)^2$ - объем волокнистого сорбирующего изделия, размещенного в барабане центрифуги высотой H .

Из (9) имеем

$$V_{жс} = K_c \pi H (R_2 - R_1)^2 \rho_в / \rho_{жс}. \quad (10)$$

Подставив в формулу (8) значения $V_{жс}$ из (10) после преобразований подтверждена формула для расчета производительности Q процесса отделения жидкости от волокнистого сорбирующего изделия с известными характеристиками центробежным способом

$$Q = K_c \pi H (R_2 - R_1)^2 \rho_в K_{ом} / \rho_{жс} \tau. \quad (11)$$

Фактическая производительность опытного образца центробежной установки с парогенератором составила $P_{факт} = 2,442 \text{ кг/мин}$ или $0,0028 \text{ м}^3/\text{мин}$. Производительность Q процесса отделения жидкости от волокнистого сорбирующего изделия центробежным способом, рассчитанная по формуле (11), составляет $0,0026 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Расхождение результатов расчета производительности процесса отделения жидкости от волокнистого сорбирующего изделия с экспериментальными данными, полученными при испытании опытного образца центробежной установки, не превышает 7%. Таким образом, полученная формула (11) для расчета продолжительности центрифугирования насыщенного нефтью или другой жидкостью волокнистого сорбирующего изделия может быть использована в процессе проектирования реальных установок для регенерации волокнистых изделий и при анализе процессов отделения жидкостей от волокнистых изделий способом центрифугирования.

Получены расчетные формулы для определения сорбирующей способности волокнистых изделий различной конструкции в виде холстов $K_{сх}$ (12) и цилиндрических бонов $K_{сб}$ (13) без принудительного их затопления

$$K_{сх} = h_n (\rho_n \cdot \rho_c) / B \rho_c, \quad (12)$$

$$K_{сб} = 4[B^2 \arccos(1 - h_n/B) - (B - h_n)(2Bh_n - h_n^2)^{0.5}] (\rho_n - \rho_c) / \pi B^2 \rho_c, \quad (13)$$

где h_n - толщина пленки нефтепродукта, м, B - поперечный размер сорбирующего изделия в вертикальном направлении (толщина холста или диаметр бона), м, ρ_n - плотность нефтепродукта, кг/м³, ρ_c - плотность изделия, кг/м³.

Выявлено, что коэффициенты сорбции без принудительного затопления изделий зависят от физических свойств сорбируемого нефтепродукта - его плотности, поверхностного натяжения и угла смачивания поверхности материала, из которого изготовлены элементарные волокна сорбирующего материала, а также от геометрической формы изделий.

Коэффициент сорбции таких изделий при их принудительном затоплении $K_{сз}$ не зависит от геометрической формы изделий и определяется только значениями плотности нефтепродукта, изделия и материала волокон

$$K_{сз} = \rho_n(\rho_{mat} - \rho_c) / \rho_c \rho_{mat}), \quad (14)$$

где ρ_n - плотность нефтепродукта, кг/м³, ρ_c - плотность изделия, кг/м³, ρ_{mat} - плотность полиэтилентерефталатного волокна, кг/м³.

Установлено также, что нерациональным является увеличивать поперечный размер в вертикальном направлении сорбирующих изделий более 100 мм - на такую высоту проникновение нефтепродукта в изделие не происходит.

В четвертой главе представлены результаты практической реализации процессов сорбции нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном и его регенерации центробежным способом.

Разработаны конструкции опытных образцов волокнистых сорбентов в виде бонов (рисунок 11), изготовлены макетные образцы волокнистых сорбирующих изделий в виде рукавов различной длины и проведены экспериментальные испытания (рисунок 12).

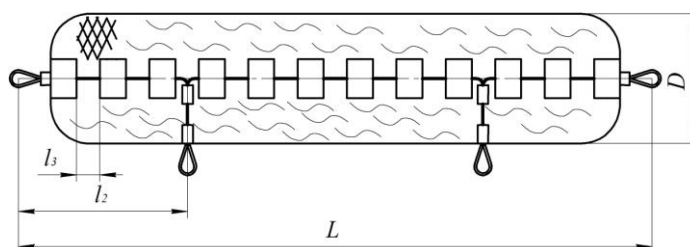


Рисунок 11 - Сорбирующий бон с двенадцатью поплавковыми элементами



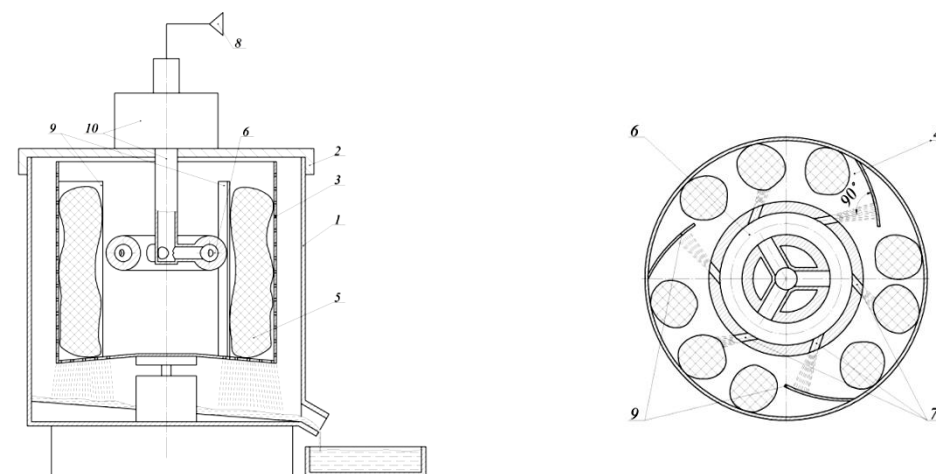
Рисунок 12 - Испытываемый бон размещен в емкости с водой и нефтью

В результате испытаний волокнистых сорбирующих бонов предлагаемой конструкции для сбора нефти с поверхности воды установлено, что волокнистые сорбирующие боны обладают хорошей способностью сорбировать нефть – для удаления с поверхности воды площадью 0,64 м² пяти килограммов нефти достаточно одного бона длиной 500 мм и диаметром 150 мм при пятикратном его помещении в нефтяное пятно или пяти таких бонов с однократным погружением каждого из них.

Предложены конструкции центробежных установок для отделения жидкости от волокнистого материала (патенты РФ № 2476272, №2614329) (рисунок 13), а также изготовлен опытный образец центробежной установки для отделения нефтепродуктов от полиэтилентерефталатного волокнистого сорбирующего изделия и проведены его экспериментальные испытания.

Необходимым этапом при разработке конструкции центробежной установки для отделения нефтепродуктов от волокнистого сорбирующего изделия является построение профиля радиальных перегородок, именуемых далее лопатками, которые должны быть закреплены на внутренней поверхности перфорированного барабана. Геометрическая форма лопаток, должна быть такой, чтобы в любом произвольном положении перфорированного барабана их поверхность была бы перпендикулярна направлению истечения энергоносителя из тангенциальных каналов соплового устройства. Высота лопатки может составлять 80...90 процентов от высоты перфорированного барабана, а их количество принимается от 2 до 4.

Испытания опытного образца центробежной установки (рисунок 14) разделены на два этапа. На первом этапе проводилось экспериментальное исследование работы соплового устройства с тангенциальными каналами, соединенного при помощи гибкой ПВХ-трубки с парогенератором SC952.



1- корпус, 2-съемная крышка, 3- привод вращения барабана, 4- рабочая полость перфорированного барабана, 5- волокнистый материал, 6- сопловое устройство, 7- тангенциальные каналы, 8- газообразный энергоноситель, 9-радиальные перегородки, 10- механизм возвратно- поступательного перемещения

Рисунок 13 - Схема центробежной установки для отделения нефтепродуктов от волокнистого сорбирующего изделия

На рисунке 15 представлен график работы соплового устройства, подключенного к парогенератору, из которого видно, что сопловому устройству достаточно около 40 с чтобы произошло его нагревание выше температуры 100 °С, вследствие чего начинается интенсивное выделение пара через тангенциальные каналы.



Рисунок 14 - Опытный образец центробежной установки с парогенератором

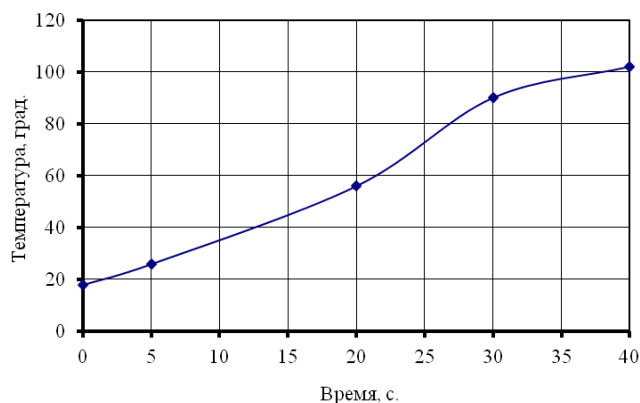


Рисунок 15 - Время выхода в рабочий режим соплового устройства с тангенциальными каналами

На втором этапе испытания опытного образца центробежной установки выполнялась проверка работоспособности установки в условиях низких температур и определение фактической производительности центробежной установки. Результаты расчетов и испытаний представлены в таблице 3. Выявлено, что коэффициент остаточной сорбции K_{co} у образцов, обработанных только центробежным способом ($K_{co} = 0,12$), больше, чем у образцов, подвергнутых центрифугированию и обработке паром под давлением ($K_{co} = 0,06$).

В ходе испытаний было доказано, что опытный образец разработанной центробежной установки, снабженный парогенератором, позволяет повысить эффективность регенерации нефти или нефтепродуктов от сорбирующих изделий, например, нефтеулавливающих бонов из полиэтилентерефталатного волокна, как при положительных, так и при отрицательных температурах окружающей среды, что подтверждают полученные результаты испытаний.

Таблица 3 - Результаты расчетов и испытаний центробежной установки

	Полученные значения
Общая масса образцов с нефтепродуктом $m_{ц}$, кг	1,32
Общая масса образцов после центрифугирования: - до обработки паром $m_{ц1}$, кг - после обработки паром $m_{ц2}$, кг	0,16 0,09
Общая масса отжатого нефтепродукта: - до обработки паром m_{o1} , кг - после обработки паром m_{o2} , кг	1,16 1,23
Коэффициент сорбции K_c :	15
Коэффициент остаточной сорбции K_{co} : - до обработки паром - после обработки паром	0,12 0,06

Предлагаемая конструкция перфорированного барабана позволит повысить коэффициент полезного действия установки за счет рационального использования энергии пара, основной функцией которого является уменьшение вязкости нефтепродукта, которым насыщены сорбирующие изделия. При использовании такой установки для отделения нефти от волокнистого сорбента в процессе ликвидации разливов нефти на поверхности воды обеспечивается длительное сохранение сорбционных свойств сорбирующего материала. Кроме того, практическое применение такой центробежной установки позволит получить значительный эффект по охране окружающей среды.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Доказано, что наибольший интерес для сорбции нефтепродуктов представляют волокнистые сорбенты на основе полимерных материалов с коэффициентом сорбции от 5 до 34 и объемным весом около $10-30 \text{ кг/м}^3$, а наиболее эффективными агрегатами для регенерации волокнистых сорбентов являются центробежные установки.

2 Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что графическая модель волокнистого сорбента может представлять собой систему элементарных капилляров, образованных близкорасположенными на одинаковом радиусе элементарными волокнами, что позволяет при расчете коэффициента сорбции использовать классические положения капиллярного эффекта – расхождение результатов эксперимента и расчета коэффициента сорбции не превышает для среднего диаметра элементарных волокон от 10 до 51 мкм -10%, а для среднего диаметра элементарных волокон 130 мкм - 25%.

3 Получены эмпирические зависимости для расчета эффективности процесса сорбции нефтепродуктов с различной вязкостью полиэтилентерефталатным волокном, имеющим различный средний диаметр элементарных волокон, и определено его рациональное значение равное 50 мкм.

4 На основе результатов экспериментального исследования процесса регенерации центробежным способом любых волокнистых сорбирующих изделий разработаны новая (защищенная патентом на изобретение), конструкция центробежной установки и рекомендации по ее расчету, отличающаяся от известных увеличенным коэффициентом отжатия волокнистых материалов в условиях низких температур.

5 Экспериментально подтверждено, что сорбция нефти с понижением температуры окружающей среды ухудшается. Максимальное насыщение полиэтилентерефталатного волокна нефтепродуктами при +20 °С достигается за 2-3 мин, а при – 18 °С в течение 10-12 мин, что объясняется увеличением вязкости нефтепродуктов.

6 Испытания установки для регенерации полиэтилентерефталатного волокна центробежным способом показали, что увеличение количества циклов регенерации образцов от 1 до 25 приводит к уменьшению коэффициента сорбции на 2...15%, и к потере веса сорбента на 1...5% - это обусловлено механическим разрушением волокон.

7 Разработаны конструкции, изготовлены и испытаны опытные образцы волокнистых сорбирующих изделий из вторичного полиэтилентерефталата в виде бонов длиной $L= 0,5$ м с поплавковыми элементами и предложены рекомендации по их расчету.

8 Результаты работы использованы в производственной деятельности промышленного предприятия ООО «НИК» (г. Воткинск, Удмуртской республики) и в учебном процессе Воткинского филиала ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

В журналах, рекомендованных Перечнем ВАК РФ

1 **Фонарева, К. А.** Моделирование процесса сорбции нефтепродуктов волокнистым материалом /К. А. Фонарева// Нефтегазовое дело. - 2017. - Т.15, №1.- С. 216-220.

2 **Фонарева, К. А.** Моделирование процесса регенерации волокнистых сорбирующих изделий центробежным способом /К. А. Фонарева, Б. А. Сентяков //Башкирский химический журнал. - 2017.-Т.24, №1.- С.56-61.

В журналах рецензируемых, но не рекомендуемых Перечнем ВАК РФ по группе специальностей 05.17.00

3 Святский, В. М. Экспериментальное исследование сорбционной способностиполиэтилентерефталатного волокна при сборе нефти с поверхности воды / В. М. Святский, Б. А. Сентяков, М. А. Святский, **К. А. Фонарева**// Экология промышленного производства: межотрасл. науч.-практ. журн./ ФГУП “ВИМИ”. - 2013. - Вып. 3. - С. 53-56.

4 Чашенко, К. А. (**Фонарева К. А.**) Разработка технологии переработки

полимерных отходов с получением сорбционных материалов// Вестник ИжГТУ. - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. №2.- С.54-55.

В других изданиях

5 Чашенко, К. А. (**Фонарева К. А.**) Эффективность применения сорбционных материалов полученных при реализации инновационной технологии переработки техногенных отходов/К. А. Чашенко (**Фонарева К. А.**) //XIX Туполевские чтения: материалы междунар. мол. науч. конф., (24-26 мая 2011 г.). - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. Т. II. -С.5-7.

6 **Фонарева, К. А.** Исследование процесса сорбции нефтепродуктов полиэтилентерефталатным волокном/К. А.Фонарева, Б. А. Сентяков//Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сб. материалов VIII междунар. науч. – практ. конф.-Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2013. - С. 95-99.

7 **Фонарева, К. А.** Расчет толщины пленки нефтепродукта на элементарном волокне/К. А. Фонарева, Б. А. Сентяков// Технические науки – от теории к практике: материалы IX междунар. заоч. науч. – практ. конф. - Новосибирск, 2012. - С. 57-60.

8 Святский, В. М. Расчет продолжительности центрифугирования при отделении нефти от волокнистого сорбента /В. М. Святский, К. П. Ширококов, Б. А. Сентяков, **К. А. Фонарева**//Инновация в науке, технике и технологиях: сб. ст./ Всерос. науч.-практ. конф. (28-30 апр. 2014г.) – Ижевск, Изд-во «Удмуртский университет», 2014. – С. 237-240.

9 Пат. 2476272 Рос. Федерация МПК В04В 1/00. Центробежная установка для отделения жидкости от волокнистого материала /**К. А. Фонарева**, Б. А. Сентяков, К. П. Ширококов, В. М. Святский. - №2011147689/05; заявл. 23.11.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. №6.

10 Пат. 2614329 Рос. Федерация МПК D06F 49/00. Центробежная установка для отделения жидкости от волокнистого материала /**К. А.Фонарева**, Б. А. Сентяков, К. П. Ширококов, В. М. Святский. - №2015144625; заявл. 16.10.2015; опубл. 24.03.2017, Бюл. №9.

11 Святский, В. М. Процессы получения и практического использования полиэтилентерефталатного волокна из вторичного сырья: монография/ В. М. Святский, Б. А. Сентяков, М. А. Святский, К. П. Ширококов, **К. А. Фонарева**. – Старый Оскол: Изд-во «ГНТ», 2013. - 162с.

Отпечатано на оборудовании в Воткинском филиале
«ИжГТУ имени М.Т.Калашникова»
427430, г. Воткинск ул. им. П.И. Шувалова 1, тел. (34145)5-15-00
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.