

**Избирательная сорбция воды из углеводородных топлив
пористыми фильтрами-сорбентами на основе поливинилформаль**
**Selective sorption of water from hydrocarbon fuels
by porous polyvinylformal-based absorbent filters**

А.А. АКИМОВА¹, И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ¹, В.А. ЛОМОВСКОЙ^{1,2}

A.A. AKIMOVA¹, I.D. SIMONOV-EMEL'YANOV¹, V.A. LOMOVSKOY^{1,2}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва, Россия

² Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия

¹ MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia

² A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

akimova@mirea.ru

Приведены данные по водопоглощению пористыми фильтрами на основе поливинилформаль от времени. Установлено, что максимальная сорбция воды примерно 835% достигается для пористого фильтра, полученного на основе поливинилформаль с крахмалом, а полное насыщение происходит в течение 200 с.

Изучение сорбции воды при фильтрации разработанным абсорбентом проводили для четырех различных марок углеводородных топлив. Установлено, что сорбция воды возрастает с увеличением ее содержания в углеводородном топливе. Остаточное содержание воды в топливе после сорбции не превышает 1,5% от начального, а также не более, чем 1% для каждой марки топлива, кроме дизельного топлива (около 2%), что достаточно для безопасной эксплуатации топлив.

Установлено, что полимерный пористый материал на основе поливинилформаль с крахмалом является хорошим сорбентом воды из углеводородных топлив.

Ключевые слова: поливинилформаль, пористость, сорбция, углеводородное топливо, водопоглощение

Data on the water absorption of porous filters based on polyvinyl formal over time are presented. It was found that maximum water sorption of approximately 835% is achieved for a porous filter based on polyvinyl formal with starch, with full saturation occurring within 200 seconds.

Water sorption during filtration with the developed absorbent was studied for four different grades of hydrocarbon fuels. It was found that water sorption increases with increasing water content in the hydrocarbon fuel. The residual water content in the fuel after sorption does not exceed 1,5% of the initial value, and is no more than 1% for each fuel grade except diesel fuel (approximately 2%), which is sufficient for safe fuel operation.

It was found that the porous polymer material based on polyvinyl formal with starch is a good absorbent of water from hydrocarbon fuels.

Keywords: polyvinyl formal, porosity, sorption, hydrocarbon fuel, water absorption

DOI: 10.35164/0554-2901-2026-03-45-48

Анализ информации по эксплуатации различных видов техники показывает, что около 70% эксплуатационных отказов, сопровождающие их материальные потери и гибель людей связаны с использованием топлив, масел и специальных жидкостей (ТМЖ), не соответствующих нормативным требованиям. Одной из важных причин снижения качества и эксплуатационных свойств ТМЖ является присутствие в топливе эмульсионной воды и различных механических примесей [1–4].

Вода в углеводородных топливах практически не растворяется и присутствует в виде эмульсии с каплями различного размера. В связи с этим проблема отделения (разделения) эмульсионной воды и различных механических примесей от углеводородных топлив является одной из важных научно-технических задач, направленных на повышение их качества и снижение количества аварийных ситуаций.

Нефтепродукты, получаемые на нефтеперерабатывающих заводах, практически не содержат влаги. Однако попадание воды в топлива может произойти на разных технологических этапах – при транспортировке, хранении, заправки, или в процессе использования.

Ниже приведены данные нормативных документов о допустимом содержании воды в различных углеводородных топливах:

- топливо для реактивных двигателей марки РТ (ГОСТ 10227-2013) – содержание влаги и механических примесей: отсутствие;

- бензин авиационный марки Б 91/115 (ГОСТ 1012–2013) – содержание механических примесей и воды: отсутствие;

- бензин неэтилированный марки АИ-92 (ГОСТ 32513–2013) – содержание воды: не нормируется;

- топливо дизельное летнее ДТ (ГОСТ 32511–2013) – содержание воды: не более 200 мг/кг.

В основу процесса разделения компонентов положены основные физико-химические закономерности избирательной сорбции воды из углеводородных топлив различными химическими соединениями, фильтрами, сорбентами из полимерных материалов.

В работах [5, 6] было показано, что пористые полимерные фильтры на основе поливинилформаль (ПВФ), полученные в результате химической реакции ацетилирования поливинилового спирта (ПВС), могут быть использованы для избирательной сорбции воды из углеводородных топлив.

Пористые фильтры (сорбенты) из ПВФ с открытой пористостью являются перспективным полимерным материалом, областью применения которого является очистка углеводородных топлив от воды. Благодаря наличию в пористой структуре ПВФ-фильтра развитой поверхности из сообщающихся пор и большого количества гидрофильных полярных групп на поверхности, поливинилформаль способен избирательно поглощать воду из углеводородных топлив в достаточно большом количестве. При сорбции воды он остается практически инертным к углеводородам, входящим в

состав топлив (парафиновые, олефиновые и ароматические углеводороды), и не растворяется в абсорбируемой воде [1, 2].

Целью данной работы является исследование сорбции (абсорбции) воды из углеводородных топлив различных марок и назначения, а также разделения систем «углеводородное топливо + вода» и извлечения воды из топлива с применением пористых фильтров-сорбентов на основе ПВФ.

Экспериментальная часть

Для получения пористого материала из ПВФ использовали исходное сырье в виде пены, сформованной из водных растворов ПВС. Ранее в работе [1] было показано, что для синтеза ПВФ и получения устойчивых пен рекомендуется использовать водный раствор с содержанием 10 об.% ПВС марки Mowiol 26-88 (Япония) с молекулярной массой около 68000.

Для увеличения открытой пористости структуры ПВФ в качестве вымываемого наполнителя в водный раствор ПВС вводят примерно 10 об.% водного раствора картофельного крахмала (ГОСТ Р 53876–2010).

Введение 10%-ного раствора крахмала при синтезе ПВФ приводит к формированию открыто-пористой структуры и увеличению пористости с 45% до 78% после вымывания крахмала, а сорбции воды – примерно в 2 раза по сравнению с ПВФ [6], что способствует повышению эффективности работы ПВФ-фильтров-сорбентов при отделении воды от углеводородных топлив.

Смесь водных растворов поливинилового спирта и крахмала охлаждают до 40°C. Далее проводят химическую реакцию ацеталирования ПВС при добавлении водо-метанольного раствора формальдегида (формалин технический ГОСТ 1625–2016), около 1,0 об.% ПАВ марки ОП-10 и 25 об.% раствора серной кислоты (ГОСТ 4204–77) при интенсивном перемешивании реакционной смеси со вспениванием до потери текучести.

В процессе химической реакции ацеталирования происходит образование ПВФ и выделение фазы крахмала в виде дисперсных частиц, а смесь превращается из прозрачной в молочно-белую эластичную массу.

Форму различной геометрии (пластина, цилиндр, куб и т.д.) заполняют полученной массой, закрывают герметичной крышкой и выдерживают при заданной температуре в течение 24 ч для завершения реакции ацеталирования.

В результате получают пористое изделие (фильтр-сорбент), которое извлекают из формы, а затем промывают в проточной или дистиллированной воде до нейтральной реакции промывочных вод ($\text{pH} \approx 8$).

Вымывание частиц крахмала из пористой структуры ПВФ способствует увеличению общей пористости и содержанию открытых пор, а также возрастанию сорбционной поверхности и емкости фильтров.

Пористые изделия из ПВФ после полного удаления крахмала проходят стадию сушки при 70°C в течение 24 ч.

Структуру полученных пористых материалов из ПВФ исследовали методом электронной микроскопии на автоматизированном цифровом микроскопе Carl Zeiss SMTzoom 5 (Германия).

Общая пористость материала на основе ПВФ + крахмал достигает 82%, доля открытых пор – 78% и закрытых пор – до 4% [6]. Диаметр пор в пористой структуре фильтров-сорбентов из ПВФ составляет от 22 до 37 мкм (средний диаметр примерно 30 мкм), а после вымывания частиц крахмала максимальный диаметр пор возрастает до 250–300 мкм (средний диаметр 80–90 мкм).

Основной характеристикой избирательной сорбции воды из углеводородного топлива пористым фильтром-сорбентом ПВФ является водопоглощение, которое можно рассчитать, как:

$$W_M = \frac{m_{\text{нас.ж.}} - m_{\text{сух.}}}{m_{\text{сух.}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $m_{\text{нас.ж.}}$ – масса насыщенного водой материала, г; $m_{\text{сух.}}$ – масса сухого материала, г.

Для исследования сорбции воды пористым материалом фильтра на основе ПВФ использовали разные марки углеводородных топлив различного назначения: РТ – топливо для самолетов дозвуковой авиации (ГОСТ 10227–2013); Б 91/115 – авиационный бензин для использования в поршневых двигателях внутреннего сгорания

(ГОСТ 1012–2013); АИ-92 – бензин предназначен для заправки автомобилей с двигателями инжекторного типа (ГОСТ 32513 – 2013) и ДТ – топливо дизельное летнее (ГОСТ 32511–2013).

Установка для процесса сорбции воды пористым ПВФ при фильтрации различных марок углеводородных топлив состоит из стеклянной воронки объемом 300 мл, стеклянного держателя для фильтра, приемной колбы объемом 1000 мл и вакуумного мембранного электрического насоса марки KNF LABOPORT SD N 860 (Германия).

Результаты и их обсуждение

Основной характеристикой для избирательной сорбции воды пористым ПВФ является водопоглощение (W_M , %), которое включает заполнение водой открытых пор и проникание воды в структуру ПВФ.

Морфология структуры пористого образца из ПВФ + Кр после промывки и сушки представлена на рис. 1.

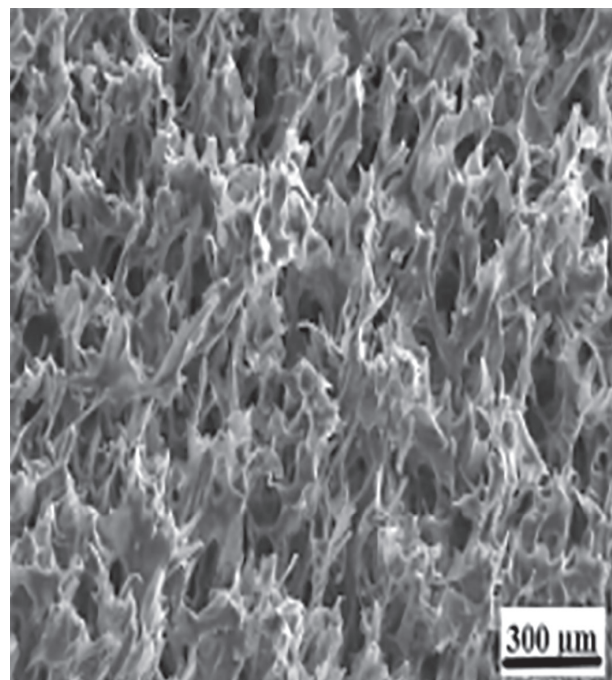


Рис. 1. Структура пористого образца на основе (ПВФ + Кр.)

В работе [6] было показано, что в основном водопоглощение (до 830%) определяется структурой ПВФ, а поглощение воды собственно полимером составляет всего около 80%. Данные по сорбции хорошо коррелируют с открытой пористостью, которая для системы ПВФ + Кр достигает примерно 78%.

На рис. 2 приведена зависимость водопоглощения пористыми образцами из ПВФ от времени.

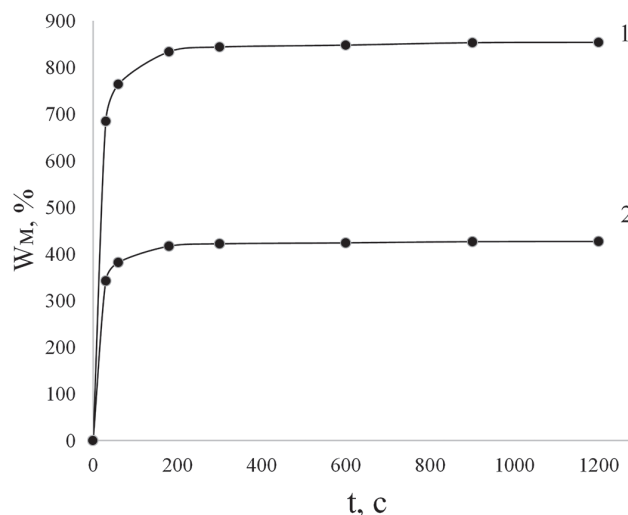


Рис. 2. Зависимость водопоглощения пористыми образцами ПВФ от времени: 1 – (ПВФ + Кр) с $P_{\text{откр}} = 78\%$, 2 – ПВФ с $P_{\text{откр}} = 58\%$.

Кривая водопоглощения для пористого ПВФ выходит на полное насыщение в течение примерно 200 с, причем максимальная

сорбция воды для ПВФ с крахмалом достигает 835% (кривая 1), а для ПВФ – 420% (кривая 2).

Таким образом, введение крахмала в виде вымываемого наполнителя приводит к увеличению пористости ПВФ фильтра и, соответственно, сорбции воды, практически в 2 раза.

Структура пористых образцов из (ПВФ + Кр) имеет бимодальное распределение пор по размерам, причем средний диаметр пор ($d_{ср}$) составляет 80–90 мкм, а диаметр больших пор достигает 250–300 мкм. Доля открытых пор: около 78%, что способствует прониканию воды в пористую структуру пористого материала и быстрому её поглощению.

Основной целью создания пористого фильтра-сорбента на основе (ПВФ + Кр) было решение задачи разделения систем «углеводородное топливо + вода» и удаление воды из топлива. Решение данной задачи необходимо для повышения качества углеводородных топлив и предотвращения различного вида аварий.

Исследовали сорбцию воды пористым образцом на основе ПВФ + Кр при фильтровании различных марок углеводородных топлив, а также модельных эмульсий с разным содержанием воды в топливе.

Модельные эмульсии готовили следующим образом: в мерный стакан наливали углеводородное топливо и к нему добавляли деионизованную воду в заданном количестве. Далее компоненты перемешивали на магнитной мешалке со скоростью 800–1200 об/мин, а полученную эмульсию воды в топливе фильтровали на установке и определяли сорбционные характеристики фильтра на основе (ПВФ + Кр).

Остаточное содержание воды в углеводородном топливе определяли с использованием кулонометрического титратора Mettler Toledo C10SD (Mettler-Toledo GmbH, Швейцария) по методу К. Фишера, с диапазоном измерения 1 мг/кг.

В табл. 1 представлены данные по количеству сорбированной воды ПВФ-фильтром за время около 60 с из углеводородных топлив разных марок с различным начальным содержанием воды.

Таблица 1. Количество воды, сорбированной ПВФ-фильтром (ПВФ + Кр) из углеводородных топлив с разным содержанием воды.

Начальное содержание воды в пробе, мг/кг	Количество сорбированной воды из углеводородных топлив различных марок, (m_b), мг/кг			
	РТ	Б 91/115	АИ-92	ДТ
без содержания воды	≤1	≤1	≤1	10,6*
10	≤1	≤1	≤1	10,8
20	≤1	≤1	≤1	11,4
50	1,1	1,3	1,3	14,7
100	1,3	2,4	2,1	16,9
500	3,6	4,7	4,2	20,5
1000	7,2	6,9	8,9	26,8

* в образце ДТ на начальном этапе исследования присутствовала вода в количестве 10,6 мг/кг.

Из данных, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод, что после сорбции воды фильтром (ПВФ + Кр) остаточное содержание воды для всех образцов углеводородных топлив составляет от 1 до 26,8 мг/кг (в среднем 1,5% от начального содержания воды), а также не более 1% для каждой марки топлива, кроме ДТ (около 2%). После фильтрации топливо соответствует требованиям ГОСТ для АИ-92 и ДТ.

На втором этапе работы исследовали абсорбцию воды пористым материалом на основе (ПВФ + Кр). В эмульсию «вода в топливе», полученную ранее для фильтрации, помещали сорбент (ПВФ + Кр) примерно на 60 с в виде параллелепипеда размером 15×15×50 мм (объемом 11,25 см³).

В табл. 2 приведены данные по содержанию воды в топливе после ее абсорбции из углеводородных топлив с разным начальным содержанием воды.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показал, что (ПВФ + Кр) является хорошим сорбентом воды из углеводородных топлив. Остаточное количество воды в углеводородном топливе составляет всего от 0,6 до 42 мг/кг (в среднем около 5% от начального

содержания воды для всех видов топлив). Топлива марок АИ-92 и ДТ после абсорбции соответствуют требованиям ГОСТ (32513–2013 и 32511–2013). Для топлив марок РТ и Б 91/115 необходима более глубокая очистка от воды или увеличение поверхности и объема образца-сорбента.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что фильтр-сорбент из пористого (ПВФ + Кр) обладает высокой сорбционной емкостью (примерно 835%) и является перспективным газосодержащим полимерным композиционным материалом, который может успешно использоваться для удаления воды из различных углеводородных топлив.

Таблица 2. Количество воды в топливе после абсорбции (ПВФ + Кр)-сорбентом из углеводородных топлив с разным содержанием воды.

Начальное содержание воды в топливе, мг/кг	Количество воды в топливе после абсорбции (ПВФ + Кр) из топлив различных марок, (m_b), мг/кг			
	РТ	Б 91/115	АИ-92	ДТ
без добавления воды	≤1	≤1	≤1	10,6*
10	0,7	0,6	0,6	0,9
20	1,2	1,2	1,3	1,5
50	2,9	3,0	3,0	5,6
100	5,2	5,7	5,9	9,9
500	14,7	12,2	11,7	36,8
1000	22,6	17,7	19,3	42,6

* в образце ДТ на начальном этапе исследования присутствовала вода в количестве 10,6 мг/кг.

Заключение

Основной характеристикой для избирательной сорбции воды из углеводородного топлива высокопористым фильтром из (ПВФ + Кр) является водопоглощение. Установлено, что максимальная сорбция воды из углеводородного топлива фильтром (ПВФ + Кр) достигает 835% за 200 с.

Впервые получены данные сорбции воды из углеводородных топлив разных марок при различном начальном ее содержании фильтром (ПВФ + Кр).

Показано, что остаточное содержание воды в углеводородном топливе после абсорбции составляет от 1 до 26,8 мг/кг (не более 1,5% от начального содержания воды, а также не более 1% для каждой марки топлива, кроме ДТ (2%)), что, согласно технической документации (ГОСТ 32513-2013, 32511-2013), достаточно для безопасной эксплуатации топлив.

Установлено, что (ПВФ + Кр) является хорошим абсорбером воды. Остаточное количество воды в углеводородном топливе составляет от 0,5 до 42,6 мг/кг (5% для всех видов топлив от начального содержания воды, кроме ДТ (7%)). Топливо марок АИ-92 и ДТ после абсорбции соответствует требованиям 32513–2013, ГОСТ 32511–2013).

Из полученных данных можно сделать вывод, что пористый материал на основе (ПВФ + Кр) обладает избирательной сорбцией воды и является эффективным фильтром с высокой сорбционной емкостью (по воде), что позволяет использовать его для удаления воды из углеводородных топлив различного назначения.

Литература

- Епишин Г.А. Влияние воды и механических примесей на износ прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2008. №8. С. 58–63. ISSN: 1998-6548.
- Каримходжаев Н., Сайдалиев И.Н. Влияние обводнённости топлива на надёжность работы топливной аппаратуры // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2022. №12(105). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14792> (дата ознакомления 15. 03.2026.)
- Тимофеев Ф.В. Развитие системы обеспечения сохранности качества нефтепродуктов на трубопроводном транспорте // Вести газовой науки: науч.-тех. сб. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2020. №2 (44). С. 73–78.

4. Купкенов Р.Р., Аберкова А.С., Дубовой Е.С. Контроль чистоты нефтепродуктов при транспортировке по магистральным нефтепродуктопроводам // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. №3. С. 342–352. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-3-342-352.
 5. Акимова А.А., Ломовской В.А., Симонов-Емельянов И.Д. Пенообразование растворов поливинилового спирта с разной молекулярной массой в воде // Тонкие химические технологии. 2021. Т. 16, №4. С. 337–344. DOI: 10.32362/2410-6593-2021-16-4-337-344.
 6. Акимова А.А., Ломовской В.А., Симонов-Емельянов И.Д. Влияние вымываемого наполнителя на параметры пористой структуры и сорбцию воды фильтрами из поливинилформальа // Теоретические основы химической технологии. 2023. Т. 57, №2. С. 1–5. DOI: 10.31857/S0040357123020021.
 7. Мельников Д.М., Якимова М.А. Разработка методики лазерного экспресс контроля содержания воды в дизельных топливах // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. №11. С. 76–87. DOI: 10.7463/1116.0850196.
 8. Думболов Д.У., Ляпич Е.Н., Суслин М.А., Зайцева. А.А. Применение электрометрического метода для определения содержания свободной воды в топливах для реактивных двигателей // Химия и технология топлив и масел. 2021. №1. С. 42–45. DOI: 10.32935/0023-1169-2021-623-1-42-45.
-