

ПРОЧНАЯ СУПЕРГИДРОФОБНАЯ ХЛОПЧАТОБУМАЖНАЯ ТКАНЬ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ МАСЛЯНО-ВОДЯНЫХ СМЕСЕЙ

SUPERHYDROPHOBIC COTTON FABRIC FOR FILTRATION OF OIL-WATER MIXTURES

Х. ПАРПИЕВ, А.Б. ГАФУРОВ, П.Д. ЛАСТОЧКИН, Н.Х. ПАРПИЕВА

H. PARPIEV, A.B. GAFUROV, P.D. LASTOCHKIN, N.X. PARPIEVA

(Наманганский инженерно-технологический институт, Республика Узбекистан)

(Namangan Institute of Engineering and Technology, Republic of Uzbekistan)

E-mail: adhamjongafurov1991@gmail.com

В статье описана одна из актуальных на сегодняшний день экологических проблем. Исследованы существующие методы и пути решения данной проблемы. Также предложено свое решение этой проблемы при помощи супергидрофобной/суперолеофильной хлопчатобумажной фильтрующей ткани. Подробно описана методика производства предлагаемой нами ткани. Изложена методика проведенных экспериментов. Дан анализ химических и физико-механических свойств ткани. Выполнена рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) ткани. Определена и проанализирована эффективность отделения масляных жидкостей и масляных эмульсий от воды. Представлены исследования стойкости ткани и сохранения ее супергидрофобных и суперолеофильных свойств в сильных агрессивных растворах, таких, как: 1 мл HCl, 1 мл NaOH и 1 мл раствора NaCl. Описаны результаты испытания ткани по определению устойчивости к стирке и истиранию. Предложена сфера применения данной ткани, где она может продемонстрировать свою высокую эффективность.

The article describes one of the environmental problems that are relevant today. Existing methods and ways of solving this problem was studied. Also, a solution to this problem was proposed with the help of filtering superhydrophobic/superoleophilic cotton fabric. The method of production of the fabric we offer was described in detail. The methodology of our experiments was described. The analysis of chemical and physical-mechanical properties of the fabric was carried out. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) of the fabric was performed. The efficiency of separating oily liquids and oily emulsions from water has been analyzed and determined. The article presents studies of fabric resistance and preservation of its superhydrophobic and superoleophilic properties in strong aggressive solutions such as: 1ml HCl, 1ml NaOH and 1ml NaCl solution. The results of fabric testing to determine the resistance to washing and abrasion were described. The sphere of application of this fabric, where it can demonstrate its high efficiency, is proposed.

Ключевые слова: волокно, хлопчатобумажная ткань, супергидрофобность, суперолеофильность, политетрафторэтилен, краевой угол смачивания, угол скольжения, ультразвук, толуол, нефть, трихлорметан, разделение.

Keywords: fiber, cotton fabric, superhydrophobic, superoleophilic, polytetrafluoroethylene, contact angle, sliding angle, ultrasound, toluene, oil, trichloromethane, separation.

Введение

Разливы нефти и нефтесодержащих стоков приводят к серьезному загрязнению окружающей среды, а точнее воды, и представляют угрозу для человека и животного мира [1], [2]. Из-за этого очистка воды от нефтяных продуктов является серьезной проблемой и привлекает внимание человечества [3], [4]. Традиционные подходы к решению этой проблемы включают в себя физическую адсорбцию, химическую деструкцию, мембранное разделение, гравитационное разделение, методы биологического разложения и др. [5], [6]. Данные методы практичны и имеют различные недостатки, такие, как высокая стоимость, неудобство использования для окружающей среды, вторичное загрязнение, низкая эффективность отделения и низкая селективность, а также невозможность повторного использования [7, 8]. Исходя из этого на сегодняшний день существует серьезная потребность в новых материалах для очищения воды от продуктов нефтяной промышленности, которые не вызывают низких экологических издержек, показывают высокую эффективность разделения и идеально подходят для повторного использования.

На сегодняшний день все больше стало появляться супергидрофобных поверхностей и суперолеофильных продуктов [9...11], имеющих высокую селективность, разделяющую способность и хорошую перерабатываемость [12...16]. Также разрабатываются и различные супергидрофобные и суперолеофильные текстильные материалы для отделения масляных жидкостей от воды из двумерных металлических сеток [17...21], трехмерных губок [22...26] и хлопковых волокон [27]. В последнее время была разработана сетка с супергидрофобным и суперолеофильным покрытием для разделения дизельного топлива и воды [17], а также разработаны супергидрофобные и суперолеофильные губки для удаления и сбора масел и орга-

нических растворителей с поверхности воды [22].

Вопросом очищения воды от масляных жидкостей занимается ряд зарубежных ученых исследователей. Например, J.T. Wang и Y. Zheng в своих работах описали супергидрофобную (суперолеофильную) полиуретановую губку, выработанную методом одноступенчатой иммерсии, которая продемонстрировала превосходную сорбционную способность к отделению нефти и различных типов масляных смесей и эмульсий от воды [25]. В исследованиях J. Li, C.C. Xu, Y. Zhang, R.F. Wang, F. Zha и H.D. She описана полиуретановая губка, покрытая супергидрофобным аттапульгитом, с высокой эффективностью и отличной устойчивостью к окружающей среде для разделения смесей масло/вода и масляных эмульсий в воде [26]. В работе J.T. Wang, F.L. Han, B. Liang и G.H. Geng показано, что супергидрофобные и суперолеофильные хлопковые волокна обладают отличной селективностью и высокой эффективностью отделения масла от различных типов смесей масло/вода и масляных эмульсий в воде [27].

Однако процесс получения вышеупомянутых супергидрофобных (суперолеофильных) поверхностей и продуктов является относительно сложным, а долговечность или же эффективность отделения воды от масляной эмульсии или масла редко исследуется. В данной работе мы представляем простой метод подготовки прочной супергидрофобной (суперолеофильной) поверхности путем распыления водной дисперсии политетрафторэтилена на хлопчатобумажную ткань, которая является недорогой, гибкой, экологически чистой и обладает специфической супергидрофильностью. Полученная супергидрофобная (суперолеофильная) хлопчатобумажная фильтрующая ткань, кодируемая как ССХФТ, может быть использована для разделения несмешивающихся смесей масло/вода и эмульсий воды в масле.

Методы исследования

При производстве супергидрофобной (суперолеофильной) хлопчатобумажной фильтрующей ткани (ССФХТ) нами использована следующая методика. Хлопчатобумажная ткань предварительно была очищена ультразвуковым раствором ацетона, этанола и деионизированной воды для удаления поверхностных загрязнений. Далее для придания супергидрофобных (суперолеофильных) свойств на ткань в три этапа распылялась разбавленная дисперсия политетрафторэтилена (ПТФЭ). Конденсированная дисперсия ПТФЭ изготавливалась путем разбавления политетрафторэтилена в деионизированной воде в объемном соотношении 1:10. Распыление производили распылителем с диаметром сопла 1 мм. Давление и скорость потока распыления устанавливали в пределах 0,3 МПа и 2 мл/с соответственно. Расстояние между носиком распылителя и хлопчатобумажной тканью поддерживали на уровне около 20 см. После каждого этапа распыления хлопчатобумажная ткань высушивалась в сушильном шкафу при температуре 150°C в течение 2 часов.

Полученная ткань ССФХТ была испытана и изучены ее фильтрующие характеристики с использованием нижеследующих методов и лабораторных приборов. Методом добавления капли воды или масла (5 мкл) на ткань ССФХТ в более пяти различных положениях для достижения среднего значения определялся краевой угол смачивания (КУС) водой и маслом, а также угол скольжения (УС) при помощи оптического измерителя угла смачивания (DSA 20, Kruss, Германия). Морфологию поверхности наблюдали на электронном микроскопе, сканирующем эмиссию поверхности (FESEM, FEI-Nova NanoSEM-450, США). Химический состав исследовали с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS, Physical Electronics, PHI-5702, США). Оптические микрофотографии эмульсии масло/вода регистрировали под микроскопом до и после разделения (Olympus-CX31, Япония).

Эффективность маслоотделения ткани ССФХТ определялась путем пригото-

вления смеси масло/вода (50 мл воды и 50 мл масла) и нанесения ее на ткань с последующим удалением. Далее эффективность рассчитывалась по следующему уравнению (1):

$$\eta = \frac{V_1}{V} \cdot 100, (\%), \quad (1)$$

где V и V_1 – объем исходного масла (50 мл) и соответственно собранного масла.

Результаты

После распыления конденсированной дисперсии политетрафторэтилена (ПТФЭ) на поверхность очищенной хлопчатобумажной ткани ткань плотно и равномерно покрылась наночастицами, микроразмер которых составил около 200 нм (рис. 1, а). Наночастицы из-за специфической микроструктуры и их химического состава придали поверхности ткани значительную шероховатость (рис. 1, б).

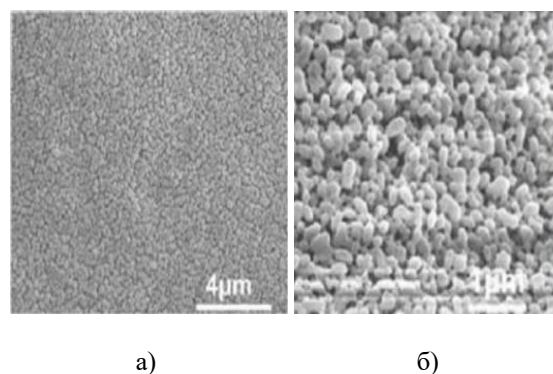


Рис. 1

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) для определения химического состава хлопчатобумажной ткани до и после нанесения на нее ПТФЭ показала, что для ткани из чистого хлопкового волокна (рис. 2, а) было только два сильных пика сигнала, полученных от XPS, – углерода и кислорода. Спектр C 1s (рис. 2, б) показывает три пика, расположенных при 284,7 эВ, 286,3 эВ и 288,8 эВ соответственно, принадлежащих CeH/CeC, CeOH и OeCeO. Спектр O 1s (рис. 2, в) показал основной пик при 532,4 эВ, соответствующий CeO [28, 29]. Другими словами, хлопчатобумажная ткань была специфической супергидрофильной из-за большого

количества гидроксильных групп в хлопковой массе и грубой микроструктуры. УКВ и УКМ ткани из чистого хлопкового волокна составляли 0° , что показало превосходную супергидрофильность и суперолеофильность. Здесь также можно заметить, что сигналы, полученные от кислорода, были потеряны и появились сигналы, полученные от фтора, расположенные на F 1s (рис. 2, d) при 689,2 эВ. Кроме того, C 1s переключился на 292,0 эВ, что является типичной энергией связи для связей C-F. Все эти сигналы указывали на то, что ткань из хлопкового волокна полностью покрыта наночастицами ПТФЭ.

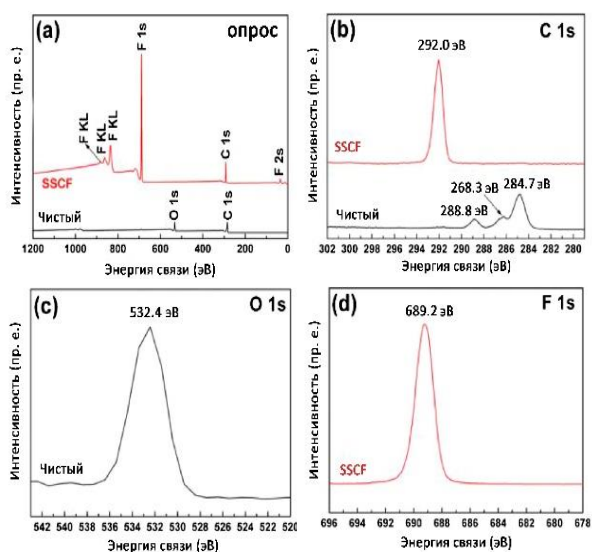


Рис. 2

После сушки в течение 2 часов при 150°C покрытие из ПТФЭ обладает хорошей адгезией к поверхности хлопчатобумажной ткани. Для обеспечения хорошей адгезии ПТФЭ к ткани предприняты две основные меры. Во-первых, ПТФЭ использовался не в виде сухих наночастиц, а в виде концентрированной дисперсии, содержащей наночастицы ПТФЭ, воду и диспергаторы, которая просто наносилась на ткань методом распыления. Во-вторых, что наиболее важно, образец нагревали, чтобы улучшить сцепление между ПТФЭ и тканью во время напыления. При высоких температурах (например, 150°C) наночастицы ПТФЭ плотно прилипают к ткани. Высокотемпературная обработка усилила движение мо-

лекулярной цепи ПТФЭ и помогла связать ПТФЭ с поверхностью хлопка.

Исследование углов контакта ткани с водой и углов скольжения показало, что чистая хлопчатобумажная ткань легко смачивается водой и маслом (рис. 3, а), а покрытие из ПТФЭ уменьшило поверхностную энергию ткани и одновременно создало нано- и микроразмерные иерархические шероховатые структуры, которые улавливали больше воздуха под каплями воды. Таким образом, капля воды в основном находится в контакте с улавливающим воздухом, а смачивающее свойство хлопчатобумажной ткани активируется, и проявляется супергидрофобное свойство с высоким КУС $160,2 \pm 1,4^\circ$ и низким УС $2,8 \pm 0,3^\circ$. Однако супергидрофобная ткань из хлопчатобумажного волокна еще сохраняет суперолеофильность, и капающий на нее толуол быстро растекается примерно при 0°C (рис. 3, б).



Рис. 3

Анализируя способность отделения масляных жидкостей от воды, авторы провели исследования по отделению толуола и трихлорметана от воды. В ходе исследований хлопчатобумажная ткань ССХФТ показала превосходную селективную сорбцию масляных жидкостей из воды. Для определения у хлопчатобумажной ткани ССХФТ способности отделения толуола от воды авторы использовали емкость с водой, в которую было добавлено некоторое количество окрашенного толуола (рис. 4, а). После контакта ССХФТ с каплей окрашенного несмешивающегося толуола, плавающего на поверхности воды, толуол быстро поглощался и тянулся вверх (рис. 4, б). Ткань ССХФТ, погруженная в емкость, благодаря своему легкому весу и водонепроницаемости находилась на поверхности воды и не тонула

(рис. 4, с). Спустя некоторое время толуол полностью абсорбировался с поверхности воды, а после удаления ткани ССХФТ четких остатков толуола на поверхности воды не наблюдалось (рис. 4, d).

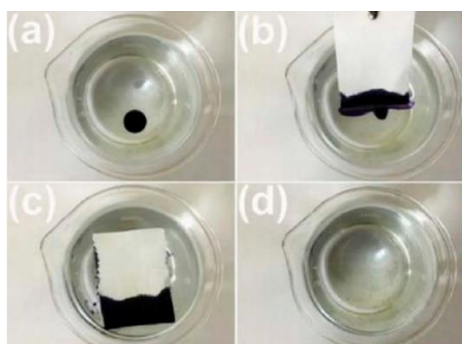


Рис. 4

Эффективность разделения толуола составила около 98,5% даже после 50 циклов повторного разделения. Кроме того, использованная ткань ССХФТ восстанавливала свои первоначальные свойства после промывки ацетоном, а КУС ткани был все еще больше 150° и УС меньше 10° . Данный эксперимент показал, что ткань ССХФТ не поглощает воду.

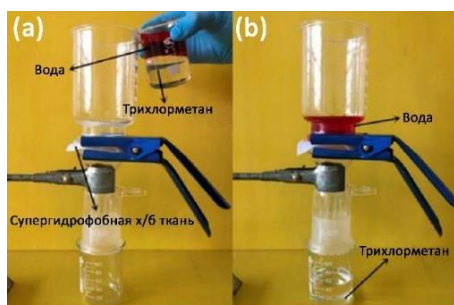


Рис. 5

При анализе способности отделения смешанного с водой масла (трихлорметана) при помощи хлопчатобумажной ткани ССХФТ использовано малогабаритное устройство для разделения (рис. 5). Смесь масло/вода, содержащая 50 мл трихлорметана и 50 мл воды, была налита в стеклянную банку, находящуюся вверху устройства (рис. 5- а), масло быстро прошло через ткань ССХФТ и через 3 минуты из-за суперолеофильного свойства ткани стекло на дно стакана, расположенного внизу

устройства. После отделения был измерен отделенный объем масла, который составил 48,5 мл. Сопоставив объем масла до и после отделения, мы получили значения эффективности отделения масла тканью ССХФТ до 97,0 %.

Кроме того, нами определена эффективность отделения масляных жидкостей, таких, как толуол, трихлорметан, бензин, керосин и пищевое масло, от воды при помощи ткани ССХФТ. Эффективность отделения этих масел от воды составила более 95,0 % в первом цикле.

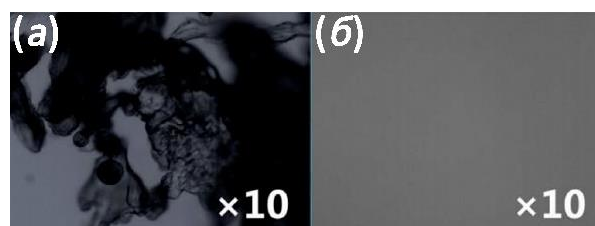


Рис. 6

Описанные выше эксперименты продемонстрировали нам, что ткань ССХФТ имеет не только высокую эффективность разделения нефти и воды, но и возможность повторного использования, а также применения для разделения эмульсированного масла. Для подтверждения этого нами было подготовлено эмульсированное масло путем смешивания воды и толуола в объемном соотношении 1:25 и стабилизировано Span 80. Водная эмульсия в масле перемешивалась с высокой скоростью при 2000 об/мин в течение 1 ч и приобрела молочно-белый цвет. При заливке в маслоотделитель 50 мл эмульсии она сразу же проходила через ткань ССХФТ. Однако вода и эмульгатор были возвращены и оставлены в стеклянном контейнере выше. Оптические микрофотографии реального эмульсированного масла показывают большую область черного цвета, потому что свет не мог проникнуть в раствор (рис. 6, а). Однако оптические микрофотографии собранной нефти не черные и очень прозрачные (рис. 6-б). Количество воды в собранной нефти измеряли с помощью измерителя влажности нефти (GY106, Ухань Гои, Китай). После разделения эмульсии

масло/вода количество воды в собранном толуоле (20 мл) составило 0,16 мкг/мл. Это показало, что эмульсированное масло было отделено и после отделения в масле осталось лишь очень небольшое количество воды.

Исследуя стойкость ткани ССХФТ к различным условиям, а также ее химическую устойчивость, авторы провели несколько исследований, описанных ниже.

Так как в процессе разделения смеси нефть/вода образец ткани ССХФТ находился в прямом контакте с нефтью и во-

дой, химическую стойкость супергидрофобности поверхности ткани ССХФТ проверяли путем погружения образца в различные водные растворы (кипяток, ледяная вода, водный раствор HCl, водный раствор NaOH, водный раствор NaCl) и масло (толуол и парафин) и измеряли иммерсионную влажность поверхности ткани. После длительного пребывания образца ткани в различных жидкостях определяли краевой угол смачивания (КУС) водой и угол скольжения (УС) (табл. 1).

Таблица 1

Условия и время прибывания	КУС (С°)	УС (С°)
В толуоле (7 дней)	160,1±1,3°	3,0±0,5°
В керосине (7 дней)	160,6±1,6°	2,5±0,4°
В кипящей воде (24 часа)	158,2±2,1°	5,1±0,5°
В ледяной воде (24 часа)	159,5±1,5°	3,5±0,3°
В 1 % растворе HCl (72 часа)	159,3±1,4°	4,0±0,2°
В 1 % растворе NaOH (72 часа)	157,7±1,5°	4,6±0,4°
В 1 % растворе NaCl (72 часа)	158,5±1,5°	4,5±0,5°

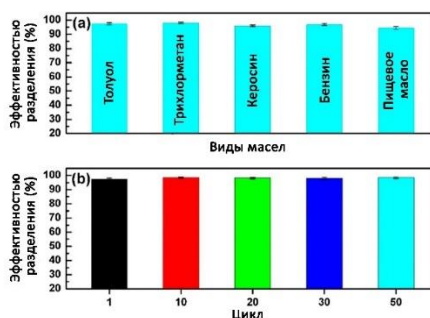


Рис. 7

Ткань в толуоле и керосине испытывали на химическую стойкость в течение 7 дней. Результаты тестирования изменения КУС и УС для образцов ткани ССХФТ не были очевидны. Далее образец ткани погружали в кипящую воду ($98 \pm 1,5^\circ \text{C}$) на 24 часа, КУС несколько уменьшился до $158,2^\circ \pm 2,1^\circ$, а УС уменьшился только до $5,1^\circ \pm 0,5^\circ$, тем самым продемонстрировав стабильную супергидрофобность, что подтверждает использование ССХФТ для разделения смесей кипящей воды и масла, эффективность разделения при этом составит до 97,0 % (рис. 7). При погружении образца ССХФТ в ледяную воду ($-0,5 \pm 0,8^\circ \text{C}$) на 24 часа супергидрофобность

ткани все еще сохранялась и эффективность разделения составляла приблизительно 96,0% для смеси ледяной воды и масла. Это говорит о том, что ткань ССХФТ обладает отличной стабильностью как в кипящей воде, так и в ледяной и может использоваться в течение длительного времени для разделения смесей кипящая вода (ледяная вода)/масло.

Кроме того, испытана супергидрофобность и химическая стойкость образцов ткани ССХФТ в сильноагрессивных растворах, таких, как 1 мл HCl, 1 мл NaOH и 1 мл раствора NaCl. Как показано в табл. 1, КУС после пребывания ткани в данных растворах уменьшился, а УС немного увеличился. Однако супергидрофобность для всех образцов ткани ССХФТ сохранялась даже после погружения в 1 мл раствора HCl, 1 мл NaOH и 1 мл NaCl в течение 72 часов. Помимо этого несмешивающаяся смесь HCl (1мл) / трихлорметан, NaOH (1мл) / трихлорметан и NaCl (1мл) / трихлорметан была успешно разделена с помощью ткани ССФХТ с высокой эффективностью разделения – более 96,3 %. Результаты вышеизложенных испытаний показали, что ткань ССФХТ обладает превос-

ходными стабильными супергидрофобными свойствами в сильных агрессивных растворах и может различать агрессивные смеси, растворы и масло.

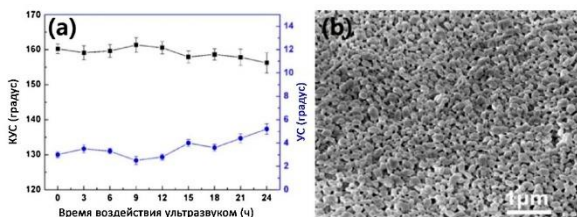


Рис. 8

Механическая стойкость ткани ССХФТ оценивалась при помощи ультразвукового воздействия мощностью 900 Вт и с частотой 40 кГц в этаноле. Во время воздействия ультразвука на образец с периодичностью в 3 часа определялись КУС и УС (рис. 8, а). Спустя 15-часового воздействия ультразвуком морфологию поверхности образца ткани ССХФТ можно было четко наблюдать на изображении FESEM (рис. 8, б). Сравнив данное изображение с изображением исходного образца ткани ССХФТ, представленным на рис. 1, б, можно заметить, что изменений в микроструктуре поверхности не произошло. После 24-часовой ультразвуковой очистки ткань ССХФТ не потеряла своей супергидрофобности и КУС был по-прежнему равен $156,2 \pm 2,9^\circ$, а УС $5,2 \pm 0,4^\circ$. Исходя из этого приходим к выводу, что ткань ССХФТ устойчива к стирке и не теряет своей супергидрофобности и суперолеофильности.

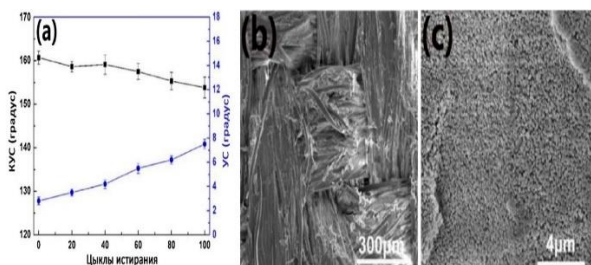


Рис. 9

Испытания на устойчивость к истиранию ткани ССХФТ проводились в соответствии с методом испытаний ААТСС 165-2007 на

лабораторном приборе BF-FS9 (Китай) при скорости трения $104 \pm 1,5$ мм/с и вертикальном давлении при трении 9 Н. Образцы ткани подвергались воздействию в течение 100 циклов. Через каждые 20 циклов у образцов определяли КУС и УС. Результаты испытаний представлены в виде графика (рис. 9, а). Как показано на рисунке, с увеличением периода трения КУС немного уменьшался, а УС постепенно увеличивался. После 100 циклов КУС все еще был 150° , а УС был ниже 10° . Таким образом, натертый образец ткани ССХФТ по-прежнему проявляет супергидрофобность.

Сопротивление ткани ССХФТ к трению зависит от двух аспектов. Во-первых, распыленная на ткань конденсированная дисперсия ПТФЭ показала хорошую адгезию к ткани. Во-вторых, дисперсия ПТФЭ является классическим самосмазывающимся материалом, показавшим низкий коэффициент сопротивления к трению. Более того, при 100-кратном трении образец ткани ССХФТ все еще мог успешно разделять нефть и воду.

Эмиссия поверхности образца ткани ССХФТ после воздействия трения в течение 100 циклов показала, что на поверхности ткани появились царапины (рис. 9, б), но микроструктура и микроморфология поверхности не изменились (рис. 9, с). Кроме того, поврежденный образец ткани ССХФТ можно было легко восстановить путем повторного распыления раствора ПТФЭ. Восстановленный образец показал превосходную супергидрофобность и стойкость к истиранию. Данные результаты анализов показали, что образцы ткани ССХФТ устойчивы к трению и способны к самовосстановлению.

Обсуждение

Проанализировав существующие фильтрующие материалы и исследования мировых ученых в области производства новых фильтрующих материалов, отмечаем, что выработанная нами фильтрующая хлопчатобумажная ткань ССХФТ по отношению к ним является недорогостоящей и простой для производства. В ходе проведенных исследований и анализов по определению химических и физико-

механических свойств ткань ССХФТ показала хорошие результаты, а точнее, в ходе экспериментов выявлена ее отличная супергидрофобность и суперолеофильность. Ткань также продемонстрировала свою стойкость к разным условиям эксплуатации, возможность многократного использования и самовосстановления. Ткань превосходно показала себя в исследованиях по отделению масляных жидкостей и масляной эмульсии от воды. Исходя из сегодняшних проблем по загрязнению водных источников и мировой нехватки очищенной питьевой воды ткань ССХФТ можно считать одним из наилучших вариантов для решения данных проблем. Исследование данной ткани, а также ее производство является актуальной задачей на сегодняшний день и требует дальнейших исследований для ее улучшения.

ВЫВОДЫ

Подводя итоги вышеприведенных исследований, мы пришли к выводу, что выработанная нами фильтрующая хлопчатобумажная ткань ССХФТ отлично подходит для разделения смесей масло/вода благодаря своей эффективности, равной до 97,0 %, и краевому углу смачивания (КУС) водой и маслом, равному более 150°. Также в ходе исследований выявлено, что ткань ССХФТ обладает отличной стабильностью как в кипящей воде, так и в ледяной и может использоваться в течение длительного времени для разделения смесей кипящая вода (ледяная вода)/масло. По результатам анализа поведения ткани ССХФТ в сильных агрессивных растворах (1 мл HCl, 1 мл NaOH и 1 мл раствора NaCl) можно судить, что она обладает превосходными стабильными супергидрофобными свойствами и различает агрессивные смеси, растворы и масло. Также ткань показала отличную устойчивость к стирке и истиранию, не потеряв свои супергидрофобные и суперолеофильные свойства. Ткань ССХФТ с высокой эффективностью маслоотделения и долговечностью можно рекомендовать для широкого использования при очистке нефтесодержащих сточных вод.

1. Al-Majed A.A., Adebayo A.R., Hossain M.E. A sustainable approach to controlling oil spills // *J. Environ. Manage.* 113 (2012). 213–227.
2. Wang B., Liang W., Guo Z., Liu W. Biomimetic superhydrophobic and super-lyophilic materials applied for oil/water separation: a new strategy beyond nature // *Chem. Soc. Rev.* 44 (2015). 336–361.
3. Cheng Z., Wang J., Lai H., Du Y., Hou R., Li C., Zhang N., Sun K. pH-controllable on-demand oil/water separation on the switchable superhydrophobic/superhydrophilic and underwater low-adhesive superoleophobic copper mesh film // *Langmuir.* 31 (2015). 1393–1399.
4. Angelova D., Uzunov I., Uzunova S., Gigova A., Minchev L. Kinetics of oil and oil products adsorption by carbonized rice husks // *Chem. Eng. J.* 172 (2011). 306–311.
5. Ke Q., Jin Y., Jiang P., Yu J. Oil/water separation performances of superhydrophobic and superoleophilic sponges // *Langmuir.* 30 (2014). 13137–13142.
6. Jiang F., Hsieh Y.L. Amphiphilic superabsorbent cellulose nanofibril aerogels // *J. Mater. Chem. A* 2 (2014) 6337–6342.
7. Ceylan D., Dogu S., Karacik B., Yakan S.D., Okay O.S., Okay O. Evaluation of butyl rubber as sorbent material for the removal of oil and polycyclic aromatic hydrocarbons from seawater // *Environ. Sci. Technol.* 43 (2009). 3846–3852.
8. Sidik S.M., Jalil A.A., Triwahyono S., Adam S.H., Satar M.A.H., Hameed B.H. Modified oil palm leaves adsorbent with enhanced hydrophobicity for crude oil removal // *Chem. Eng. J.* 203 (2012). 9–18.
9. Yao X., Song Y.L., Jiang L. Applications of bio-inspired special wettable surfaces // *Adv. Mater.* 23 (2011). 719–734.
10. Emelyanenko A.M., Ermolenko N.V., Boinovich L.B. Contact angle and wetting hysteresis measurements by digital image processing of the drop on a vertical filament // *Coll. Surf. A.* 239 (2004). 25–31.
11. Nishimoto S., Bhushan B. Bioinspired self-cleaning surfaces with superhydrophobicity superoleophobicity, and superhydrophilicity, *RSC Adv.* 3 (2013). 671–690.
12. Erbil H.Y., Demirel A.L., Mert Y.A.O. Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface. *Science* 299 (2003). 1377–1380.
13. Xue Z., Wang S., Lin L., Chen L., Liu M., Feng L., Jiang L. A novel superhydrophilic and underwater superoleophobic hydrogel coated mesh for oil/water separation // *Adv. Mater.* 23 (2011). 4270–4273.
14. Lafuma D. Quéré. Superhydrophobic states // *Nat. Mater.* 2 (2003). 457–460.
15. Zhang L., Zhong Y., Cha D., Wang P. A self-cleaning underwater superoleophobic mesh for oil-water separation // *Sci. Rep.* 3 (2013). 2326.
16. Zhou X.Y., Zhang Z.Z., Xu X.H., Guo F., Zhu X.T., Men X.H., Ge B. Robust and durable superhydrophobic cotton fabrics for oil/water separation. – *ACS Appl. Mater. Inter.* 5 (2013). 7208–7214.

17. Feng L., Zhang Z.Y., Mai Z.H., Ma Y.M., Liu B.Q., Jiang L., Zhu D.B. A super-hydrophobic and super-oleophilic coating mesh film for the separation of oil and water, *Angew. Chem. Int. Ed.* 43 (2004). 2012–2014.
18. Cheng M.J., Gao Y.F., Guo X.P., Shi Z.Y., Chen J.F., Shi F. A functionally integrated device for effective and facile oil spill cleanup, *Langmuir* 27 (2011). 7371–7375.
19. Li J., Li D.M., Yang Y.X., Li J.Q., Zha F., Lei Z.Q. A prewetting induced underwater superoleophobic or underoil (super) hydrophobic waste potato residue-coated mesh for selective efficient oil/water separation // *Green Chem.* 18 (2016). 541–549.
20. Tian D.L., Zhang X.F., Wang X., Zhai J., Jiang L. Micro/nanoscale hierarchical structured ZnO mesh film for separation of water and oil // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 13 (2011). 14606–14610.
21. Cai Y.H., Chen D.Y., Li N.J., Xu Q.F., Li H., He J.H., Lu J.M. A facile method to fabricate a double-layer stainless steel mesh for effective separation of water-in-oil emulsions with high flux // *J. Mater. Chem. A* 4 (2016). 18815–18821.
22. Zhu Q., Pan Q.M., Liu F.T. Facile removal and collection of oils from water surfaces through superhydrophobic and superoleophilic sponges // *J. Phys. Chem. C* 115 (2011). 17464–17470.
23. Peng H.L., Wang H., Wu J.N., Meng G.H., Wang Y.X., Shi Y.L., Liu Z.Y., Guo X.H. Preparation of superhydrophobic magnetic cellulose sponge for removing oil from water, *Ind. Eng. Chem. Res.* 55 (2016). 832–838.
24. Zhu Q., Chu Y., Wang Z.K., Chen N., Lin L., Liu F.T., Pan Q.M. Robust superhydrophobic polyurethane sponge as a highly reusable oil-absorption material // *J. Mater. Chem. A* 1 (2013). 5386–5393.
25. Wang J.T., Zheng Y. Oil/water mixtures and emulsions separation of stearic acidfunctionalized sponge fabricated via a facile one-step coating method // *Sep. Purif. Technol.* 181 (2017). 183–191.
26. Li J., Xu C.C., Zhang Y., Wang R.F., Zha F., She H.D. Robust superhydrophobic attapulgite coated polyurethane sponge for efficient immiscible oil/water mixture and emulsion separation // *J. Mater. Chem. A* 4 (2016). 15546–15553.
27. Wang J.T., Han F.L., Liang B., Geng G.H. Hydrothermal fabrication of robustly superhydrophobic cotton fibers for efficient separation of oil/water mixtures and oil-in-water emulsions // *J. Ind. Eng. Chem.* 54 (2017). 174–183.
28. Steimecke M., Rümmler S., Bron M. The effect of rapid functionalization on the structural and electrochemical properties of high-purity carbon nanotubes // *Electrochim. Acta.* 163 (2015). 1–8.
29. Zhang Y., Li Y.Q., Shao J.Z., Zou C. Fabrication of superhydrophobic fluorine-free films on cotton fabrics through plasma-induced grafting polymerization of 1,3,5,7-tetravinyl 1,3,5,7-tetramethylcyclotetrasiloxane // *Surf. Coat Tech.* 276 (2015). 16–22.
30. Lu R., Yu Y., Adkhamjon G. et al. Bio-inspired cotton fabric with superhydrophobicity for high-efficiency self-cleaning and oil/water separation. *Cellulose* 27, 7283–7296 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03281-9>.
31. Erkinov Z.E., G'afurov A.B., Ergashev M.M. Determination and analysis of the properties of twisted thread, developed from a differential single yarn // *Universum: Technical Sciences: electron. scientific magazine.* 2018. № 6(51). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/6049>.
32. Sadikov M.R., Omonov M.T., Tojimirzaev S.T., Gofurov A.B. Analysis of changes in fiber properties in processes opening, cleaning and carding // *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal.* 2021. Vol. 11. Issue 4. Article DOI: 10.5958/2249-7137.2021.01043.0
33. Gafurov A., Korabayev S., Alimov O. Morphology and properties jute fibers // *Science and innovation.* 2022; 1(A8):129-35.
34. Parpiev X., Parpiev D.X., Lastochkin P.D. Research on improvement of the technology of preparation of yarn for twisting // *Universum: Technical Sciences: electron. scientific magazine* 2022. 10(103). URL:<https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14419>
35. Lastochkin P.D., Meliboev U.X. Investigation of the orientation and straightness of fiber in a sliver by the breaking method // *Universum: Technical Sciences: electron. scientific magazine* 2022. 9(102). URL:<https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14312>

Рекомендована кафедрой технологии изделий текстильной промышленности Наманганского инженерно-технологического института. Поступила 26.01.23.