

Гидрофобизация полиэфирных тканей с использованием теломеров тетрафторэтилена**Н. П. Пророкова¹,****Т. Ю. Кумеева¹,****Д. П. Кирюхин²**¹Институт химии растворов имени Г.А. Крестова Российской академии наук,²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики

и медицинской химии Российской академии наук,

Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрен вопрос придания текстильным тканым материалам гидрофобных свойств. Показано, что гидрофобные свойства не ограничиваются высоким краевым углом смачивания материала. Свойства гидрофобности определяются в том числе низкими значениями водопоглощения модифицированного материала. Для достижения такого результата необходимо получать на поверхности текстильного материала тонкие покрытия, обладающие низкой поверхностной энергией и непрерывностью. Собственная дополнительная шероховатость модифицирующего покрытия позволяет получать высокие краевые углы смачивания. Фторсодержащие полимеры, как известно, имеют достаточно низкие значения поверхностной энергии, и именно это свойство обуславливает значительный интерес к подобным соединениям для использования в качестве модификаторов-гидрофобизаторов. Целью данного исследования было получение устойчивых гидрофобных покрытий на полиэфирной ткани с использованием растворов теломеров тетрафторэтилена. Исследованы покрытия на основе тетрафторэтилена, а именно, ряда теломеров тетрафторэтилена, на полиэфирной ткани. Методами ИК спектроскопии (МНПВО), электронной микроскопией, атомной силовой микроскопией показано, что теломеры тетрафторэтилена формируют упорядоченные ультратонкие фторполимерные покрытия на поверхности каждой элементарной нити, образующей ткань. Визуализированы особенности покрытия на основе теломеров в зависимости от типа используемого телогена. Методом атомной силовой микроскопии определена жесткость получаемых покрытий. На основании проведенных испытаний покрытий к устойчивости выявлены особенности гидрофобизирующих покрытий на основе теломеров тетрафторэтилена в зависимости от химической природы телогена. Проведена сравнительная характеристика полученных гидрофобных материалов.

Ключевые слова: гидрофобность, водоотталкивающие свойства, теломеры тетрафторэтилена, фторполимерное покрытие, водопоглощение.

Информация о статье: поступила 09 сентября 2024 года.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2024)», которая состоялась 20–21 ноября 2024 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

Hydrophobization of polyester fabrics using tetrafluoroethylene telomers**Natalia P. Prorokova¹,****Tatyana Yu. Kumeeva¹,****Dmitriy P. Kiruchin²**¹G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences,²Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences,

Russian Federation

Abstract. The issue of imparting hydrophobic properties to textile woven materials is considered. It is shown that hydrophobic properties are not limited to a high contact angle of the material. The hydrophobic properties are determined, among other things, by low values of water absorption of the modified material. To achieve this result, it is necessary to obtain thin, continuous coatings exhibiting low surface energy on the surface of the textile material. The intrinsic additional roughness of the modifying coating enables the attainment of high contact angles of wetting. Fluorine-containing polymers are known to have fairly low values of surface energy, and it is this property that determines significant interest in such compounds for use as modifiers-water repellents. The aim of this study was to obtain stable hydrophobic coatings on polyester fabric using

solutions of tetrafluoroethylene telomers. Coatings based on tetrafluoroethylene, namely, a number of tetrafluoroethylene telomers, on polyester fabric were studied. IR spectroscopy (MULTI-FRET), electron microscopy, and atomic force microscopy have shown that tetrafluoroethylene telomers form ordered ultrathin fluoropolymer coatings on the surface of each elementary thread that forms the fabric. The features of the telomer-based coating are visualized depending on the type of telogen used. The rigidity of the resulting coatings is determined by atomic force microscopy. Based on the tests of the coatings for resistance, the features of hydrophobic coatings based on tetrafluoroethylene telomers are revealed depending on the chemical nature of telogen. A comparative analysis of the obtained hydrophobic materials is carried out.

Keywords: hydrophobicity, water-repellent properties, tetrafluoroethylene telomers, fluoropolymer coating, water absorption.

Article info: received September 09, 2024.

The article summarizes the research materials presented at the International Scientific and Technical Conference "International Conference on Textile and Apparel Innovation" (ICTAI-2024), held on November 20–21, 2024 at Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus).

Введение

Гидрофобный текстиль на мировом потребительском рынке пользуется устойчивым спросом. К текстилю с такими свойствами относятся материалы с водоотталкивающими и водоупорными свойствами. Водоотталкивающая отделка предусматривает придание текстильным материалам способности не смачиваться водой, сохраняя при этом воздухо- и паропроницаемость. В результате водоупорной отделки вода не проникает с лица на изнанку текстильного материала, при этом воздухо- и паропроницаемость он утрачивает. Материалы с водоупорными свойствами имеют довольно узкое техническое применение – для тентов, парусины, укрытия буртов, верха грузового автотранспорта и т. п. Значительно шире в технике и быту используются «дышащие» гидрофобные ткани, т. е. ткани с водоотталкивающей отделкой. Гидрофобными считаются ткани, у которых краевой угол смачивания (Θ) превышает 90° . Кроме того, в настоящее время четко обозначился интерес потребителей и производителей к материалам и покрытиям с очень высокой гидрофобностью (ультрагидрофобные – $\Theta > 120^\circ$ и супергидрофобные $\Theta > 150^\circ$).

Такие материалы должны обладать как можно более низкой поверхностной энергией и многомодальной шероховатостью [Бойнович и Емельяненко, 2008; Park S., Kim & Park C.H., 2015; Li et al., 2017; Jeevahan et al., 2018], благодаря которой смачивание поверхности будет протекать по гетерогенному механизму. Понижение поверхностной энергии возможно с помощью изменения химического состава поверхности, что можно осуществить при нанесении на поверхность покрытия, состоящего из вещества с более низкой поверхностной энергией (гидрофобизатора). Многомодальная шероховатость обыч-

но достигается за счет текстурирования поверхности материала.

В отношении многомодальной поверхности ткань занимает среди других материалов особое место. Как известно, ткани образованы переплетением нитей, имеющих цилиндрическую форму. Таким образом, поверхность ткани состоит из множества выпуклых элементов. В работе [Boinovich & Emelyanenko, 2011] установлено, что цилиндрические поверхности характеризуются более высоким краевым углом смачивания, чем плоские. Кроме того, авторы [Ramaratnam et al., 2008; Gao & McCarthy, 2008] доказали, что ткань, благодаря её сложному, образованному переплетенными нитями строению, можно считать готовой структурой с многомодальной шероховатостью. Указанные факторы благоприятствуют достижению гидрофобности ткани.

Главным требованием к гидрофобизатору является его низкая поверхностная энергия. Наиболее низкой поверхностной энергией характеризуются покрытия на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), однако формирование их на ткани до сих пор являлось технологически неосуществимым. Несколько более высокой, чем у ПТФЭ, поверхностной энергией обладают другие фторсодержащие соединения [Petrie, 2007; Козуб, Редина, Эльманович и Денисов, 2023; Калдыбаева, Набиева, Елдияр и Нуркулов, 2022]. Ранее в промышленности для гидрофобизации тканей наиболее широко применялись производные перфтороктановой кислоты. Однако было установлено, что такие соединения могут быть потенциально канцерогенными [Armitage, MacLeod & Cousins 2009]. В связи с этим были введены ограничения на их использование. Но известно большое количество других фторсодержащих препаратов, которые можно использо-

вать в качестве гидрофобизаторов для ткани. Например, в работах (Xue et al., 2013; Schondelmaier et al., 2002) для формирования покрытий с высокой гидрофобностью применяются препараты на основе фторалкилсиланов, в работах (Oner & McCarthy, 2000; Minko, S. et al., 2003) – препараты на основе политетрафторэтилена. Однако все эти гидрофобизаторы наносятся на ткань, в основном, из эмульсий или дисперсий. Соответственно на ткани происходит формирование толстых неравномерных покрытий с большим количеством дефектов. Хотя после обработки текстильный материал характеризуется высокими краевыми углами смачивания, достигнутый эффект является метастабильным, т. к. ткани не удается придать низкое водопоглощение.

В то же время требования, предъявляемые к потребительским свойствам готовой ткани, значительно усложняют решение проблемы придания ей водоотталкивающих свойств. В частности, как уже указывалось, нужно, чтобы ткань после гидрофобизации сохраняла способность «дышать», которая характеризуется высокими значениями воздухо- и паропроницаемости. Следовательно, покрытие, сформированное гидрофобизатором, должно быть нанесено только на поверхность нитей, не занимая пространство между ними. После гидрофобизации ткань должна сохранять драпируемость и не быть слишком жесткой. Это диктует дополнительные требования к жесткости покрытия на основе гидрофобизатора, которая характеризует его пластические свойства (Пророкова, Кумеева, Новиков и Холодков, 2018). Обязательным условием является также устойчивость достигнутого эффекта к интенсивным эксплуатационным воздействиям – трению, стиркам, химическим чисткам, т. е. адгезия покрытия к волокнистому материалу должна быть высокой. Кроме того, в работах (Пророкова, Кумеева, Новиков и Холодков, 2018; Halimatul et al., 2019; Ilyas et al., 2019; Prorokova, N.P. et al., 2020) показано, что важнейшей характеристикой гидрофобности ткани является низкое водопоглощение – способность образца поглощать жидкость при полном погружении его в воду в течение часа. Очевидно, что для придания волокнистому материалу низкого водопоглощения нанесенное на него покрытие не должно иметь дефектов, через которые может проникнуть вода. Следовательно, можно констатировать, что для сохранения высоких эксплуатационных характеристик ткани при её водоотталкивающей отделке нужно нанести на поверхность каждой нити умеренно жесткое покрытие на основе гидрофобизатора, облада-

ющее высокой адгезией к волокну.

Целью данного исследования было получение устойчивых гидрофобных покрытий на полиэфирной ткани с использованием растворов теломеров тетрафторэтилена.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовалась полиэфирная (ПЭФ) ткань полотняного переплетения поверхностной плотностью 180 ± 10 г/м² и числом нитей 216 ± 4 на 10 см по основе и 203 ± 4 на 10 см по утку. В некоторых экспериментах использовалась ПЭФ пленка толщиной 15 мкм поверхностной плотностью $19,5 \pm 0,1$ г/м².

В качестве гидрофобизаторов применялись теломеры тетрафторэтилена (ТФЭ), синтезированные с использованием радиационного инициирования из фторомономеров в ряде органических растворителей (ФИЦ проблем химической физики Российской академии наук, Россия). Для настоящей работы были выбраны теломеры ТФЭ, синтезированные в ацетоне (ТФЭ/АЦ), бутилхлориде (ТФЭ/БХ), триметилхлорсилане (ТФЭ/ТМХС). Их синтез и свойства описаны в работах (Бузник, 2017; Пророкова и др., 2010; Кумеева, Пророкова и Кичигина, 2015).

Для обработки образцов ПЭФ ткани использовались растворы теломеров ТФЭ/АЦ, ТФЭ/БХ, разбавленные ацетоном, и ТФЭ/ТМХС, разбавленные этилацетатом до концентрации 2 %. Образцы ПЭФ ткани погружались в раствор теломеров, время пропитки составляло ~ 10 сек. Пропитка тканей проводилась многократно (до 3-х раз). После каждой пропитки образцы ткани подвергались сушке при $T = 20-25$ °С в течение 24 часов для удаления растворителя. После сушки образцов осуществлялась термообработка при $T = 150$ °С в течение 1 мин. В результате были получены образцы с одно-, двух-, и трехслойным покрытием из теломеров.

ИК спектры регистрировались на спектрометре типа Avatar ESP 360 (фирма Nicolett) методом многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) с использованием кристалла селенида цинка с 12-кратным отражением в диапазоне от 700 до 1500 см⁻¹.

Краевой угол смачивания водой измерялся методом Оуэнса-Вендта. Водопоглощение тканей определялся в соответствии с ГОСТ 3816-81 (ИСО 811-81) как количество воды, удерживаемой образцом ткани после полного погружения его в жидкость в течение одного часа. Проводилось по 10 параллельных измерений.

Текстура волокнистого материала и морфологию покрытия исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа «VEGA 3 SBH» (TESCAN) и атомно-силового микроскопа «Solver P 47-PRO» (NT-MDT).

Устойчивость эффекта гидрофобности к истирающим воздействиям оценивали по изменению величины краевого угла смачивания ПЭФ ткани с теломерным покрытием после 50-кратного истирающего воздействия с использованием специального прибора оценки устойчивости окраски к трению ПТ-4, 1 стирки и 100 циклов химической чистки перхлорэтиленом. Методика испытания подробно описана в [Бяльский и Карпов, 1971].

Жесткость покрытий оценивали методом силовой спектроскопии с помощью атомно-силового сканирующего зондового микроскопа Solver-47Pro («NT MTD», Российская Федерация). Метод основан на измерении величины отклонения (степени изгиба) кантилевера в процессе подъема и опускания образца. Методика подробно описана в работах [Prorokova, Kumeeva & Kholodkov, 2020; Пророкова, Кумеева, Новиков и Холодков, 2018]. Величину адгезии определяли по закону Гука на основании известного значения коэффициента жесткости используемого зонда (3,5 Н/м) при отведении его от поверхности. Относительную жесткость характеризовали относительной величиной изгиба кантилевера в процессе приближения зонда к поверхности. Погрешность определения этих характеристик составляет ~ 5 %.

Экспериментальные исследования и анализ результатов

Несмотря на то, что само полиэфирное (ПЭФ) волокно, полученное из полиэтилентерефталата, является гидрофобным, ткани, выработанные из него, и характеризующиеся сложной капиллярно-пористой структурой, не обладают свойствами водоотталкивания: капли жидкости, попавшие на них, быстро впитываются в межволоконные пространства. Нанесение растворов теломеров ТФЭ на ПЭФ материал проводили аэрозольным способом или погружением образца в раствор с последующим испарением растворителя и при термообработке ткани (150 °C). После удаления растворителя происходит образование фторсодержащего покрытия.

Факт осаждения покрытия на поверхности волокнистого материала подтвержден методом ИК-спектроскопии (МНПВО). Соответствующие ИК спектры в диапазоне 700–1500 см⁻¹ представлены на рисунке 1.

Наиболее интенсивные полосы в спектре политетрафторэтилена (ПТФЭ) регистрируются в области

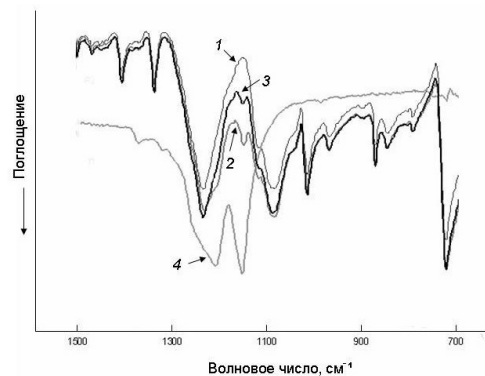


Рисунок 1 – ИК спектры (МНПВО):

1 – исходная ПЭФ ткань; 2 – ткань, обработанная ТФЭ/АЦ; 3 – ткань, обработанная ТФЭ/БХ;

4 – политетрафторэтилен

Figure 1 – IR spectra (ATR):

1 – original PE fabric; 2 – fabric treated with TFE/AC;

3 – fabric treated with TFE/BX;

4 – polytetrafluoroethylene

1153 см⁻¹ и 1208 см⁻¹, они относятся к валентным колебаниям –CF₂– групп [Олейник, 1976]. В спектрах обработанной ткани (2, 3) появляются аналогичные полосы в отличие от спектров исходной (1), что отображает образование на поверхности ткани фторсодержащего покрытия.

На рисунке 2 представлено изображение ПЭФ ткани с покрытием, нанесенным из раствора ТФЭ/БХ, аналогичный вид имеют образцы тканей, обработанных ТФЭ/АЦ и ТФЭ/ТМХС.

Межниточные пространства в ткани остаются свободными, так как покрытия формируются исключительно на поверхности отдельных нитей.

Количественное исследование состава покрытий, нанесенных из растворов теломеров ТФЭ, проведенное энергодисперсионным методом, обнаруживает незначительное содержание фтора – от 1,39 % при использовании ТФЭ/АЦ до 3,25 % при использовании ТФЭ/БХ. Несложный расчет показывает, что фторсодержащие покрытия характеризуются малой толщиной (около 300–600 нм) [Пророкова, Кумеева, Кирихин и Бузник, 2013].

Морфология покрытий, сформированных с использованием растворов теломеров ТФЭ, показана на рисунке 3 на основе данных атомно-силового микроскопии.

Поверхность фторполимерного покрытия на нитях полиэфирной ткани, сформированного из ТФЭ/АЦ и

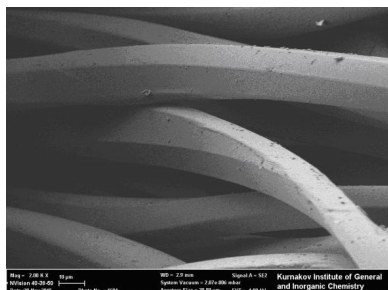


Рисунок 2 – Изображение ПЭФ ткани с теломерным покрытием, сформированным за счет обработки 1,5 %-ным раствором теломеров ТФЭ в хлористом бутиле (метод сканирующей электронной микроскопии, увеличение 110)

Figure 2 – Image of PE fabric with a telomeric coating formed by treatment with a 1.5 % solution of TFE telomers in butyl chloride (scanning electron microscopy, magnification 110)

ТФЗ/ТМХС (рисунок 3) отличается более высокой шероховатостью. Покрытие, полученное на основе ТФЗ/БХ, является более равномерным.

Таким образом, нанесение на полиэфирную ткань теломеров с последующей термообработкой приводит к образованию на поверхности волокон сплошного фторполимерного покрытия. Сформированные ультратонкие покрытия повторяют микрорельеф волокна. Они также характеризуются шероховатостью на наноуровне, которая вносит дополнительный вклад в многомодальную шероховатость волокнистого материала. В зависимости от того, какой телоген и доза излучения использовались при синтезе теломеров и, следовательно, какие концевые группы они содержат и какой длины цепи характеризуются, меняется качество формируемого покрытия.

В таблице 1 представлены характеристики водоотталкивающих свойств ПЭФ ткани, обработанной различными теломерами ТФЭ. Для сравнения в таблице представлены также характеристики ПЭФ ткани, обра-

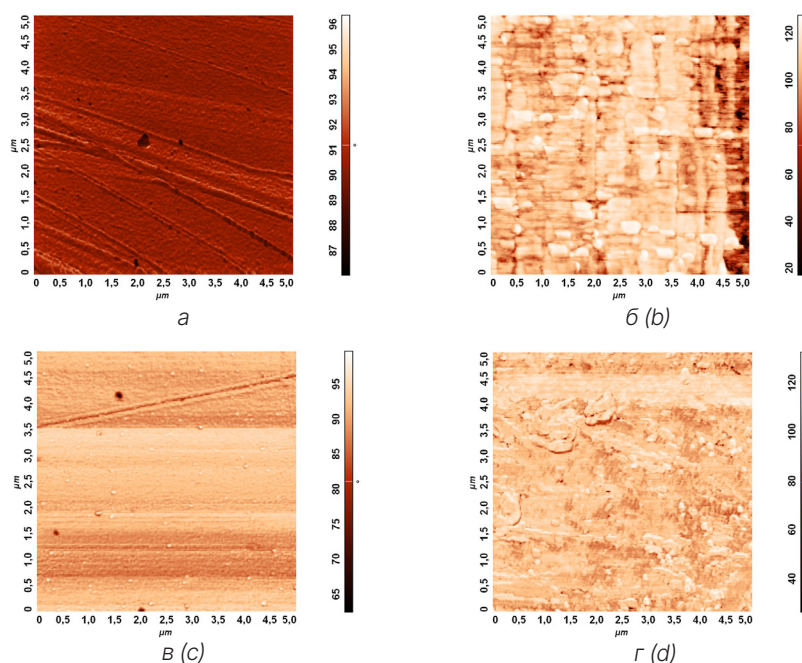


Рисунок 3 – Изображения поверхности полиэфирной пленки: а – необработанной; б – с покрытием на основе ТФЭ/АЦ; в – с покрытием на основе ТФЭ/БХ; г – с покрытием на основе ТФЭ/ТМХС.

Метод исследования – атомно-силовая микроскопия. Метод представления – фазовый контраст
Figure 3 – Images of the surface of polyester film: a – untreated; b – with a coating based on TFE/AC; c – with a coating based on TFE/BC; d – with a coating based on TFE/TMHS.

Research method – atomic force microscopy. Representation method – phase contrast

ботанной хорошо показавшим себя на практике фтор-содержащим препаратом Nuva ТТН (Швейцария).

Оценка водоотталкивающих свойств ПЭФ ткани, обработанной различными теломерами ТФЭ, показала, что модифицированная ткань приобретает высокие краевые углы смачивания – 123–132°. Особенно следует отметить низкие показатели водопоглощения, которые ткань приобретает при использовании теломеров ТФЭ/БХ и ТФЭ/ТМХС: оно составляет 4,9 % и 2,4 %, со-

ответственно, тогда как использование высокоэффективного препарата Nuva ТТН (Швейцария) позволяет достичь только 12 %. Значение водопоглощения необработанной ткани составляет 38 %.

Устойчивость достигнутого эффекта гидрофобности оценивали по показателям краевого угла смачивания обработанной ткани, подвергнутой ряду испытаний. Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Водоотталкивающие свойства ПЭФ ткани с покрытиями на основе различных теломеров ТФЭ
Table 1 – Water-repellent properties of PE fabrics with coatings based on various TFE telomers

Кратность нанесения	Краевой угол смачивания, град	Водопоглощение, %
Ткань без гидрофобизатора		
0	Вода впитывается мгновенно	38,0 ± 0,9
Ткань с покрытием на основе теломеров ТФЭ/АЦ		
2	127 ± 2	22,4 ± 0,2
3	127 ± 2	18,2 ± 0,2
Ткань с покрытием на основе теломеров ТФЭ/БХ		
2	131 ± 2	10,3 ± 0,2
3	132 ± 2	4,9 ± 0,2
Ткань с покрытием на основе теломеров ТФЭ/ТМХС		
2	125 ± 2	1,2 ± 0,1
3	123 ± 2	2,4 ± 0,2
Ткань с покрытием на основе препарата Nuva ТТН		
1 (30 г/л)	132 ± 4	12,0 ± 0,2

Таблица 2 – Устойчивость эффекта гидрофобности к различным эксплуатационным воздействиям
Table 2 – Resistance of the hydrophobic effect to various operational impacts

Краевой угол смачивания до испытания, град.	Краевой угол смачивания, град., после		
	100 циклов истирания	25 стирок	25 химических чисток
Ткань с покрытием на основе теломеров ТФЭ/АЦ			
127 ± 2	135 ± 2	124 ± 2	132 ± 2
Ткань с покрытием на основе теломеров ТФЭ/БХ			
132 ± 2	138 ± 2	127 ± 2	132 ± 2
Ткань с покрытием на основе теломеров ТФЭ/ТМХС			
123 ± 2	124 ± 2	124 ± 2	129 ± 2
Ткань с покрытием на основе препарата Nuva ТТН			
132 ± 4	111 ± 4	103 ± 5	120 ± 5

Из таблицы следует, что покрытия, сформированные различными теломерами ТФЭ, обладают очень высокой устойчивостью к эксплуатационным воздействиям. Она существенно превышает устойчивость покрытий на основе применяемого в производстве высокоэффективного препарата Nuva ТТН. Сопоставление свойств покрытий на основе различных теломеров ТФЭ показывает, что все они характеризуются сходной устойчивостью к воздействию стирки и химической чистки. Однако покрытия на основе теломеров ТФЭ/АЦ и ТФЭ/БХ значительно лучше сопротивляются воздействию истирания, чем покрытия на основе ТФЭ/ТМХС. Это может быть связано с разницей в пластических свойствах покрытий, которая отражается на морфологии покрытий. Разница в структуре поверхности дает возможность оценить пластические свойства покрытий методом силовой спектроскопии, который реализуется с помощью атомно-силового микроскопа [Ferreira, Gelinck, de Graaf, & Fisher, 2010]. Метод силовой спектроскопии основан на непосредственном взаимодействии между атомами поверхности и зондовым датчиком микроскопа. На расстоянии около одного ангстрема между атомами образца и атомом зонда действуют силы отталкивания, а на больших расстояниях, силы притяжения. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли зонда, регистрируя величину которого, можно получить информацию о жесткости поверхности в отдельных точках.

Экспериментальная оценка жесткости позволила установить, что этот показатель для теломеров ТФЭ/АЦ

составляет 0,015, ТФЭ/БХ – 0,024, ТФЭ/ТМХС – 0,042, т. е. покрытие на основе ТФЭ/ТМХС обладает значительно более высокой жесткостью. Из сопоставления данных о жесткости покрытий и устойчивости их к воздействию истирания становится ясно, что покрытия с более высокой жесткостью обладают меньшей устойчивостью к истиранию.

Выводы

Оценка возможности использования ряда теломеров ТФЭ в качестве гидрофобизаторов для полиэфирной ткани показала, что при нанесении на ткань теломеров ТФЭ/АЦ, ТФЭ/БХ и ТФЭ/ТМХС на поверхности каждой нити, составляющей ткань, образуются ультратонкие покрытия, которые обладают свойствами, подобными свойствам политетрафторэтилена, и повторяют микро- и нанорельеф волокна. Ткань с таким покрытием обладает высоким краевым углом смачивания (123–132 градуса). Водопоглощение варьируется в зависимости от вида теломера и кратности нанесения покрытия. Максимально высокий краевой угол смачивания достигается при использовании растворов теломеров ТФЭ/ХБ, наиболее низкое значение водопоглощения ткани наблюдается при использовании растворов теломеров ТФЭ/ТМХС. Таким образом, установлено, что теломеры ТФЭ являются эффективными гидрофобизаторами для ПЭФ тканей, использование которых может обеспечить придание тканям высокого краевого угла смачивания и низкого водопоглощения. Основное их отличие связано с разной пластичностью формируемых покрытий, характеризующихся показателем жесткости покрытий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бойнович, Л.Б. и Емельяненко, А.М. (2008). Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение. *Успехи химии*, № 77 (7), С. 619–638.
- Бузник, В.М. (2017). *Фторполимерные материалы*. Томск: Изд-во НТЛ, Российская Федерация.
- Бяльский, А.Л. и Карпов, В.В. (1971). *Красители для текстильной промышленности*. М.: Химия, СССР.
- Калдыбаева, Г.Ю., Набиева, И.А., Елдияр, Г.К. и Нуркулов, Ф.Н. (2022). Изучение влияния природы гидрофобизирующих композиций на водоотталкивающую способность ткани. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 3 (399), С. 157–164. DOI 10.47367/0021-3497_2022_3_157
- Козуб, Д.А., Редина, Л.В., Эльманович, И.В. и Денисов, М.Е. (2023). Исследование защитных свойств волокнистых материалов, модифицированных композициями на основе фторполимерного латекса. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 3 (405), С. 156–162. DOI 10.47367/0021-3497_2023_3_156.
- Кумеева, Т.Ю., Пророкова, Н.П. и Кичигина, Г.А. (2015). Гидрофобизация полиэфирных текстильных материалов растворами теломеров тетрафторэтилена, синтезированными в ацетоне и хлористом бутиле: свойства и структура покрытий.

Физикохимия поверхности и защита материалов, Т 51, С. 428–435. DOI: 10.7868/S004418561504021X.

Олейник, Э.Ф. (1976). *Инфракрасная спектроскопия полимеров*. М.: Химия, СССР.

Пророкова, Н.П., Кумеева, Т.Ю., Хореев, А.В., Бузник, В.М., Кирюхин, Д.П., Большаков, А.И. и Кичигина, Г.А. (2010). Придание полиэфирным текстильным материалам высокой гидрофобности обработкой их раствором теломеров тетрафторэтилена. *Хим. Волокна*, № 2, С. 25–30.

Пророкова, Н.П., Кумеева, Т.Ю., Кирюхин, Д.П. и Бузник, В.М. (2013). Гидрофобизация полиэфирных текстильных материалов теломерными растворами тетрафторэтилена. *Журнал прикладной химии*, Т 86, № 1, С. 74–81.

Пророкова, Н.П., Кумеева, Т.Ю., Новиков, В.В. и Холодков, И.В. (2018). Регулирование трибологических характеристик тканых полиэфирных материалов при модифицировании их теломерами тетрафторэтилена. *Трение и износ*, Т39, № 2. С. 157–165.

Armitage, J.M., MacLeod, M. and Cousins, I.T. (2009). Comparative Assessment of the Global Fate and Transport Pathways of Long-Chain Perfluorocarboxylic Acids (PFCAs) and Perfluorocarboxylates (PFCs) Emitted from Direct Sources. *Environmental Science & Technology*, V. 43, P. 5830–5836. DOI: 10.1021/es900753y.

Boinovich, L. and Emelyanenko, A. (2011). The prediction of wettability of curved surfaces on the basis of the isotherms of the disjoining pressure. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, V. 383, P. 10–16. DOI:10.1016/j.colsurfa.2010.12.020.

Ferreira, O.D.S., Gelinck, E., de Graaf, D. and Fisher H.R. (2010). Adhesion experiments using an AFM – Parameters of influence. *Appl. Surf. Sci.*, V. 257, P 48–55. DOI:10.1016/j.apsusc.2010.06.031.

Gao, L.C. and McCarthy, T.J. (2008). Teflon is hydrophilic. Comments on definitions of hydrophobic, shear versus tensile hydrophobicity, and wettability characterization. *Langmuir*, V. 24, P. 9183–9188. DOI: 10.1021/la8014578.

Halimatul, M.J., Sapuan, S.M., Jawaid, M., Ishak, M.R. and Ilyas, R.A. (2019). Water absorption and water solubility properties of sago starch biopolymer composite films filled with sugar palm particles. *Polimery*, V. 64, P. 27–35. DOI:10.14314/polimery.2019.94.

Ilyas, R.A., Sapuan, S.M., Atiqah, A., Rushdan, I., Hairul, A., Ishak, M.R., Zainudin, E.S., Nurazzi, N.M., Atikah, M.S.N., Ansari, M.N.M., Asyraf, M.R.M., Supian, A.B.M. and Ya, H.H. (2019). Sugar palm (Arenga pinnata [Wurmb.] Merr) starch films containing sugar palm nanofibrillated cellulose as reinforcement: Water barrier properties. *Polym. Compos.*, V. 41, P. 459–467. DOI:10.1002/pc.25379.

Jeevahan, J., Chandrasekaran, M., Joseph, G.B., Durairaj, R.B. and Mageshwaran, G. (2018). Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges. *J. Coat. Technol. Res.*, V. 15, P. 231–250. DOI:10.1007/s11998-017-0011-x.

Li, S., Huang, J., Chen, Z., Chena, G. and Lai, Y. (2017). A review on special wettability textiles: theoretical models, fabrication technologies and multifunctional applications. *J. Mater. Chem. A*, V. 5, P. 31–55. DOI:10.1039/C6TA07984A.

Minko, S., Müller, M., Motornov, M., Nitschke, M., Grundke, K. and Stamm, M. (2003). Two-level structured self-adaptive surfaces with reversibly tunable properties. *J. Am. Chem. Soc.*, V. 125, P. 3896–3900. DOI: 10.1021/ja0279693.

Oner, D. and McCarthy, J.T. (2000). Ultra hydrophobic surfaces. Effects of topography length scales on wettability. *Langmuir*, V. 16, P. 7777–7782. DOI:10.1021/la000598o.

Park, S., Kim, J. and Park, C.H. (2015). Superhydrophobic Textiles: Review of Theoretical Definitions, Fabrication and Functional Evaluation. *J. Eng. Fiber Fabr.*, V. 10, P. 1–18. DOI:10.1177/155892501501000401.

Petrie, E.M. (2007). *Handbook of adhesives and sealants*. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2nd ed. USA.

Prorokova, N.P., Kumeeva, T.Yu., Kiryukhin, D.P., Kichigina, G.A. and Kushch, P.P. (2020). Coatings based on tetrafluoroethylene telomeres synthesized in trimethylchlorosilane for obtaining highly hydrophobic polyester fabrics. *Prog. Org. Coat.*, V. 139. P. 105485. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.105485.

Prorokova, N., Kumeeva, T. and Kholodkov, I. (2020). Formation of Coatings Based on Titanium Dioxide Nanosols on Polyester Fibre Materials. *Coatings*, V. 10, P 82. doi:10.3390/coatings10010082.

Ramaratnam, K., Iyer, S.K., Kinnan, M.K., Chumanov, G., Brown, P.J. and Luzinov I. (2008). Ultrahydrophobic Textiles Using Nanoparticles: Lotus Approach. *J. Eng. Fiber Fabr.*, V. 3, P. 1–14. DOI:10.1177/155892500800300402.

Schondelmaier, D., Cramm, S., Klingeler, R., Morenzin, J., Zilkens, C. and Eberhardt, W. (2002). Orientation and self-assembly of hydrophobic fluoroalkylsilanes. *Langmuir*, V. 18, P. 6242–6245. DOI:10.1021/la0256533.

REFERENCES

- Boinovich, L.B. and Emelyanenko, A.M. (2008). Hydrophobic materials and coatings: principles of design, properties and applications [Gidrofobnye materialy i pokrytiya: principy sozdaniya, svoystva i primeneniye]. *Uspekhi himii = Russ. Chem. Rev.*, 77 (7), P. 583–600. DOI: 10.1070/RC2008v077n07ABEH003775.
- Buznik, V.M. (2017). *Ftorpolimernie materialy* [Fluoropolymer materials]. Tomsk: Izd. NTL, Russian Federation (In Russian).
- Byalskiy, A.L. and Karpov, V.V. (1971). *Krasiteli dlia tekstilnoy promishlennosti* [Dyes for textile industry]. M.: Chimia, USSR (In Russian).
- Kaldibaeva, G.Y., Nabieva, I.A., Eldiar, G.K. and Nurkulov, F.N. (2022). Study of the influence of the nature of water-repellent compositions on the water-repellent ability of fabric [Izucheniye vlianiya prirodi gidrofobiziruyushchikh kompozitsii na vodoottalkivaushuyu sposobnost tkani]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. № 3 (399), P. 157–164. (In Russian).
- Kozub, D.A., Redina, L.V., Elmamovich, I.V. and Denisov, M.E. (2023). Study of the protective properties of fibrous materials modified with compositions based on fluoropolymer latex [Issledovanie zaschitnykh svoystv voloknistikh materialov, modifitsirovannykh kompozitsiyami na osnove ftorpolimernogo lateksa]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. № 3 (405), P. 156–162. (In Russian).
- Kumeeva, T.Yu., Prorokova, N.P. and Kichigina, G.A. (2015). Hydrophobization of polyester textile materials with solutions of tetrafluoroethylene telomers synthesized in acetone and butyl chloride: properties and structure of coatings [Gidrofobizatsiya poliefirnykh tekstil'nykh materialov rastvorami telomerov tetraftoretilena, sintezirovannykh v acetone i hloristom butile: svoystva i struktura pokrytij]. *Fizikohimiya poverhnosti i zashchita materialov = Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, V. 51, P. 428–435. DOI: 10.1134/S2070205115040218 (In Russian).
- Oleynik, E.F. (1976). *Infrakrasnaya spektroskopiya polimerov* (Infrared spectroscopy of polymers). M.: Chimia, USSR (In Russian).
- Prorokova, N.P., Kumeeva, T.Yu., Khorev, A.V., Buznik, V.M., Kiryukhin, D.P., Bol'shakov, A.I. and Kichigina, G.A. (2010). Giving polyester textile materials high water repellency by treating them with a solution of tetrafluoroethylene telomers [Pridaniye poliefirnym tekstil'nykh materialam vysokoy gidrofobnosti obrabotkoy ih rastvorom telomerov tetraftoretilena]. *Him. Volokna = Fibre Chem.*, V. 42, P. 103–108. DOI: 10.1007/s10692-010-9232-9 (In Russian).
- Prorokova, N.P., Kumeeva, T.Yu., Kiryukhin, D.P. and Buznik, V.M. (2013). Hydrophobization of polyester textile materials with telomeric tetrafluoroethylene solutions [Gidrofobizatsiya poliefirnykh tekstil'nykh materialov telomernymi rastvorami tetraftoretilena]. *Zhurnal prikladnoy himii = Rus. J. Appl. Chem.*, V. 86, P. 69–75. DOI: 10.1134/S1070427213010126 (In Russian).
- Prorokova, N.P., Kumeeva, T.Yu., Novikov, V.V. and Holodkov I.V. (2018). Regulation of the tribological characteristics of polyester fabrics by surface modification using tetrafluoroethylene telomers [Pegulirovaniye tribologicheskikh harakteristik tkanykh poliefirnykh materialov pri modifitsirovaniy ih telomernymi tetraftoretilena]. *Trenie i iznos = J. Frict. Wear*, V. 39, P. 121–128. DOI: 10.3103/S1068366618020149 (In Russian).
- Armitage, J.M., MacLeod, M. and Cousins, I.T. (2009). Comparative Assessment of the Global Fate and Transport Pathways of Long-Chain Perfluorocarboxylic Acids (PFCAs) and Perfluorocarboxylates (PFCs) Emitted from Direct Sources. *Environmental Science & Technology*, V. 43, P. 5830–5836. DOI: 10.1021/es900753y.
- Boinovich, L. and Emelyanenko, A. (2011). The prediction of wettability of curved surfaces on the basis of the isotherms of the disjoining pressure. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.*, V. 383, P. 10–16. DOI:10.1016/j.colsurfa.2010.12.020.
- Ferreira, O.D.S., Gelinck, E., de Graaf, D. and Fisher H.R. (2010). Adhesion experiments using an AFM – Parameters of influence. *Appl. Surf. Sci.*, V. 257, P. 48–55. DOI:10.1016/j.apsusc.2010.06.031.
- Gao, L.C. and McCarthy, T.J. (2008). Teflon is hydrophilic. Comments on definitions of hydrophobic, shear versus tensile hydrophobicity, and wettability characterization. *Langmuir*, V. 24, P. 9183–9188. DOI: 10.1021/la8014578.
- Halimatul, M.J., Sapuan, S.M., Jawaid, M., Ishak, M.R. and Ilyas, R.A. (2019). Water absorption and water solubility properties of sago starch biopolymer composite films filled with sugar palm particles. *Polimery*, V. 64, P. 27–35. DOI:10.14314/

polimery.2019.94.

Ilyas, R.A., Sapuan, S.M., Atiqah, A., Rushdan, I., Hairul, A., Ishak, M.R., Zainudin, E.S., Nurazzi, N.M., Atikah, M.S.N., Ansari, M.N.M., Asyraf, M.R.M., Supian, A.B.M. and Ya, H.H. (2019). Sugar palm (Arenga pinnata [Wurmb.] Merr) starch films containing sugar palm nanofibrillated cellulose as reinforcement: Water barrier properties. *Polym. Compos.*, V. 41, P. 459–467. DOI:10.1002/polb.25379.

Jeevahan, J., Chandrasekaran, M., Joseph, G.B., Durairaj, R.B. and Mageshwaran, G. (2018). Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges. *J. Coat. Technol. Res.*, V. 15, P. 231–250. DOI:10.1007/s11998-017-0011-x.

Li, S., Huang, J., Chen, Z., Chena, G. and Lai, Y. (2017). A review on special wettability textiles: theoretical models, fabrication technologies and multifunctional applications. *J. Mater. Chem. A*, V. 5, P. 31–55. DOI:10.1039/C6TA07984A.

Minko, S., Müller, M., Motornov, M., Nitschke, M., Grundke, K. and Stamm, M. (2003). Two-level structured self-adaptive surfaces with reversibly tunable properties. *J. Am. Chem. Soc.*, V. 125, P. 3896–3900. DOI: 10.1021/ja0279693.

Oner, D. and McCarthy, J.T. (2000). Ultra hydrophobic surfaces. Effects of topography length scales on wettability. *Langmuir*, V. 16, P. 7777–7782. DOI:10.1021/la000598o.

Park, S., Kim, J. and Park, C.H. (2015). Superhydrophobic Textiles: Review of Theoretical Definitions, Fabrication and Functional Evaluation. *J. Eng. Fiber Fabr.*, V. 10, P. 1–18. DOI:10.1177/155892501501000401.

Petrie, E.M. (2007). *Handbook of adhesives and sealants*. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2nd ed. USA.

Prorokova, N.P., Kumeeva, T.Yu., Kiryukhin, D.P., Kichigina, G.A. and Kushch, P.P. (2020). Coatings based on tetrafluoroethylene telomers synthesized in trimethylchlorosilane for obtaining highly hydrophobic polyester fabrics. *Prog. Org. Coat.*, V. 139, P. 105485. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.105485.

Prorokova, N., Kumeeva, T. and Kholodkov, I. (2020). Formation of Coatings Based on Titanium Dioxide Nanosols on Polyester Fibre Materials. *Coatings*, V. 10, P. 82. doi:10.3390/coatings10010082.

Ramaratnam, K., Iyer, S.K., Kinnan, M.K., Chumanov, G., Brown, P.J. and Luzinov I. (2008). Ultrahydrophobic Textiles Using Nanoparticles: Lotus Approach. *J. Eng. Fiber Fabr.*, V. 3, P. 1–14. DOI:10.1177/155892500800300402.

Schondelmaier, D., Cramm, S., Klingeler, R., Morenzin, J., Zilkens, C. and Eberhardt, W. (2002). Orientation and self-assembly of hydrophobic fluoroalkylsilanes. *Langmuir*, V. 18, P. 6242–6245. DOI:10.1021/la0256533.

Информация об авторах

Information about the authors

Пророкова Наталья Петровна

Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт химии растворов имени Г.А. Крестова Российской академии наук, Российская Федерация.
E-mail: npp@isc-ras.ru

Кумеева Татьяна Юрьевна

Кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт химии растворов имени Г.А. Крестова Российской академии наук, Российская Федерация.
E-mail: tyk@isc-ras.ru

Кирюхин Дмитрий Павлович

Доктор химических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Российская Федерация.
E-mail: kir@icp.ac.ru

Natalia P. Prorokova

Doctor of Science (in Engineering), Professor, Chief Researcher, G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation.
E-mail: npp@isc-ras.ru

Tatyana Yu. Kumeeva

Candidate of Sciences (in Engineering), Researcher, G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation.
E-mail: tyk@isc-ras.ru

Dmitriy P. Kiruchin

Doctor of Science (in Chemistry), Senior Researcher, Head of the Laboratory, Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation.
E-mail: kir@icp.ac.ru