



Научная статья

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

УДК677.4:677.5:677.04

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.024

 EDN: UMRQWT

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНОСИЛАНОВЫМИ АППРЕТАМИ

Наталья Геннадьевна Зубова

Балаковский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Балаково, Россия

zubova_aptech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2678-2568>

Аннотация. Модификация волокнистых наполнителей органосилановыми аппретами является эффективным способом направленного регулирования адгезионного взаимодействия между компонентами композиционных материалов. В работе исследованы химический состав и характер поверхности, механические свойства и смачивание модифицированных армирующих систем – полиакрилонитрильного технического жгутика, гидратцеллюлозной технической нити и базальтовых нитей, растворами органосилановых аппретов: АГМ-9, А-187 и А-174. Исследования образцов модифицированных волокнистых материалов проводились с использованием методов инфракрасной спектроскопии, сканирующей электронной и оптической микроскопии, механических испытаний и оценки их смачиваемости. На спектрах модифицированных нитей идентифицируются пики, характерные для групп, входящих в состав модификаторов, что позволяет предположить физико-химическое взаимодействие между функциональными группами органосиланов и гидроксильными группами волокнистых материалов, дополнительным подтверждением которого являются результаты термо-влажностной обработки. Установлено, что на поверхности модифицированных элементарных нитей образуется равномерное плёночное покрытие. Результаты механических испытаний модифицированных волокнистых материалов свидетельствуют о значительном улучшении прочности по сравнению с немодифицированными волокнистыми материалами: относительная разрывная нагрузка ПАН-ТЖ увеличивается в среднем на 44 %, ГЦТН – на 52 %, БН – на 42 %. Проведен сравнительный анализ смачивания модифицированных армирующих систем эпоксидным олигомером, свидетельствующий об эффективном влиянии органосилановых аппретов на увеличение максимальной высоты капиллярного поднятия границы раствора эпоксидного олигомера и средней скорости смачивания нитей. Оценка кинетических данных смачивания модифицированных армирующих систем показала, что наиболее эффективным органосиланом, улучшающим адгезионную совместимость в системе матрица/наполнитель является А-174. Сформулированы физико-химические особенности модификации волокнистых материалов органосилановыми аппретами.

Ключевые слова: полиакрилонитрильный технический жгут, гидратцеллюлозная техническая нить, базальтовые нити, органосилановые аппрет, модификация, химический состав, прочность, смачиваемость.

Для цитирования: Зубова Н. Г. Физико-химические особенности модификации волокнистых материалов органосилановыми аппретами // Ползуновский вестник. 2023. № 3. С. 177–184. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.024. EDN: <https://elibrary.ru/UMRQWT>.

Original article

PHYSICO-CHEMICAL FEATURES OF MODIFICATION OF FIBROUS MATERIALS BY ORGANOSILANE FINISHES

Natalya G. Zubova

Balakovo Institute of Engineering and Technology - branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Balakovo, Russia

zubova_aptech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2678-2568>

Abstract. *Modification of fibrous fillers with organosilane finishes is an effective way of directional regulation of adhesive interaction between components of composite materials. The chemical composition and character of the surface, mechanical properties and wetting of modified reinforcing systems - polyacrylonitrile technical flagellum, hydrate cellulose technical thread and basalt threads, solutions of organosilane finishes are investigated in this work: AGM-9, A-187 and A-174. Studies of samples of modified fibrous materials were carried out using methods of infrared spectroscopy, scanning electron and optical microscopy, mechanical tests and evaluation of their wettability. On the spectra of modified filaments, peaks characteristic of the groups included in the modifiers are identified, which suggests a physicochemical interaction between the functional groups of organosilanes and hydroxyl groups of fibrous materials, an additional confirmation of which is the results of thermal moisture treatment. It is established that a uniform film coating is formed on the surface of the modified elementary filaments. The results of mechanical tests of modified fibrous materials indicate a significant improvement in strength compared to unmodified fibrous materials: the relative breaking load of the PAN-TF increases by an average of 44 %, HCTT - by 52 %, BT – by 42 %. A comparative analysis of the wetting of modified reinforcing systems with an epoxy oligomer was carried out, indicating the effective effect of organosilane finishes on increasing the maximum height of the capillary rise of the boundary of the epoxy oligomer solution and the average wetting rate of the threads. Evaluation of kinetic wetting data of modified reinforcing systems has shown that A-174 is the most effective organosilane that improves adhesion compatibility in the matrix/filler system. The physico-chemical features of the modification of fibrous materials by organosilane finishes are formulated.*

Keywords: *polyacrylonitrile technical flagellum, hydrate cellulose technical thread, basalt threads, organosilane finishes, modification, chemical composition, strength, wettability.*

For citation: Zubova, N.G. (2023). Physico-chemical features of modification of fibrous materials by organosilane finishes. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 177-184. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.024. <https://elibrary.ru/UMRQWT>.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективным способом направленного регулирования адгезионного взаимодействия между компонентами армированных пластиков, обеспечивающего монолитность и прочность готовых изделий, является модификация волокнистых систем органосилановыми аппретатами, образующими стабильные и прочные связи между наполнителем и полимерным связующим [1–5].

Среди широкого ассортимента промышленно выпускаемых крупнотоннажных волокнистых наполнителей можно выделить армирующие системы, обладающие поверхностной активностью и способностью при модификации к повышению межфазной адгезии и устойчивости к разрывным нагрузкам, к которым относятся полиакрилонитрильный технический жгут (ПАН-ТЖ), гидратцеллюлозная техническая нить (ГЦТН) и базальтовые нити (БН) [6–10].

178

В предыдущих работах [11–13] проведен выбор режимов обработки указанных армирующих систем органосилановыми аппретатами: 3-аминопропилтриэтоксисиланом (АГМ-9), 3-глицидоксипропилтриметоксисиланом (А-187), 3-метакрилоксипропилтриметоксисиланом (А-174), показано увеличение прочности и адгезионной совместимости волокнистых наполнителей с эпоксидной смолой ЭД-20. На основании проведенных исследований определена оптимальная концентрация водных растворов органосиланов АГМ-9, А-187 и А-174 при обработке исследуемых волокнистых наполнителей – 5 % (оптимальная концентрация водного раствора АГМ-9 при обработке БН – 2 %) и оптимальное время модификации – 60 с.

Целью настоящей работы являлось установление физико-химических особенностей процесса аппретирования технических нитей в зависимости от природы используемого мо-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2023

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНОСИЛАНОВЫМИ АППРЕТАМИ

дификатора. Для достижения поставленной цели определены задачи исследования: оценка химического состава, характера поверхности и механических свойств модифицированных волокнистых материалов, изучение кинетики их смачивания эпоксидным олигомером.

МЕТОДЫ

Анализ химического элементного состава модифицированных волокнистых материалов проводили на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе MIRA 2 LMU, оснащенной системой микроанализа Aztec Live Advanced Ultim Max 40 [14], спектральный анализ модифицированных волокнистых материалов – на Фурье-спектрофотометре инфракрасном IRTracer-100 (рабочий диапазон длин волн 4000–400 см⁻¹) [15].

Термовлажностную обработку модифицированных волокнистых материалов осуществляли путем их многократной промывки в дистиллированной воде при температуре 45±5 °С. Однократную промывку нитей проводили в течение 5 мин.

Оптические исследования поверхности элементарных нитей проводили на микроскопе МИКРОМЕД Р-1 [16].

Результаты механических испытаний исследуемых армирующих систем были получены на разрывной машине ФМ 27 (скорость нагружения образцов элементарных волокон при растяжении – 25±2,5 мм/мин) [17].

Кинетические данные смачиваемости образцов исследуемых волокон при измерении высоты капиллярного поднятия 50 % раствора эпоксидного олигомера в ацетоне получены на катетометре КМ-8 (температура проведения эксперимента 23±2 °С) [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами исследования проведен энергодисперсионный анализ химического элементного состава ПАН-ТЖ и ГЦТН, результаты которого позволили установить, что в составе модифицированных волокнистых материалов появляются кремниевые группы (таблица 1).

Таблица 1 – Данные энергодисперсионного анализа волокнистых материалов

Table 1 – Data of energy dispersion analysis of fibrous materials

Наименования волокнистого материала	Концентрация, вес %						
	[C]	[N]	[O]	[Na]	[S]	[Zn]	[Si]
ПАН-ТЖ	67,37	25,21	6,50	0,92	–	–	–
ПАН-ТЖ+А-187	68,37	24,36	6,82	0,05	–	–	0,40
ПАН-ТЖ+А-174	68,40	24,41	6,79	0,04	–	–	0,36
ГЦТН	59,07	–	38,56	0,75	1,24	0,38	–
ГЦТН +А-187	60,03	–	38,92	0,14	0,49	0,03	0,39
ГЦТН +А-174	60,01	–	38,89	0,15	0,54	0,04	0,37

Подтверждением изменения химического состава армирующих систем являются результаты ИК-спектроскопии (рис. 1, а–в), свидетельствующие, что на спектрах модифицированных волокнистых материалов (кривые 2–4) в областях 2400–2360 см⁻¹ идентифицируются пики, соответствующие валентными колебаниями ОН-групп, входящих в состав поверхностных анионов [O₃Si-OH]³⁻ [19], в областях 1053 и 880 см⁻¹ появляются пики, характерные для валентных колебаний связи SiO [20].

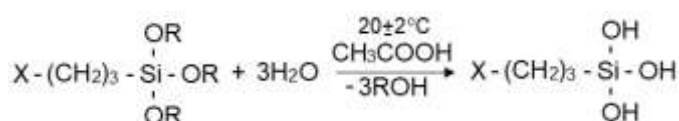
Дополнительным подтверждением физико-химического взаимодействия между органосилановыми аппретам и исследуемыми волокнистыми материалами является незна-

чительное изменение массы модифицированных ПАН-ТЖ (0,3–0,8 %), ГЦТН (0,5–2,9 %) и БН (0,5–1,3 %) после их многократной термовлажностной обработки (рис. 2, а–в).

Представленные результаты свидетельствуют о фиксации аппретов на волокне.

Данные энергодисперсионного анализа, ИК-спектроскопии и результаты термовлажностной обработки модифицированных технических нитей (ТН) позволяют предположить физико-химическое взаимодействие между функциональными группами органосилановых аппретов и гидроксильными группами волокнистых материалов по реакциям [21, 1, 3]:

I стадия – образование силанолов:



где X – органofункциональная группа силанов (аминовая, эпоксидная, метакриловая); R – ал-

коксигруппа (метоксильная или этоксильная);

II стадия – взаимодействие силинолов с гидроксильными группами ТН:

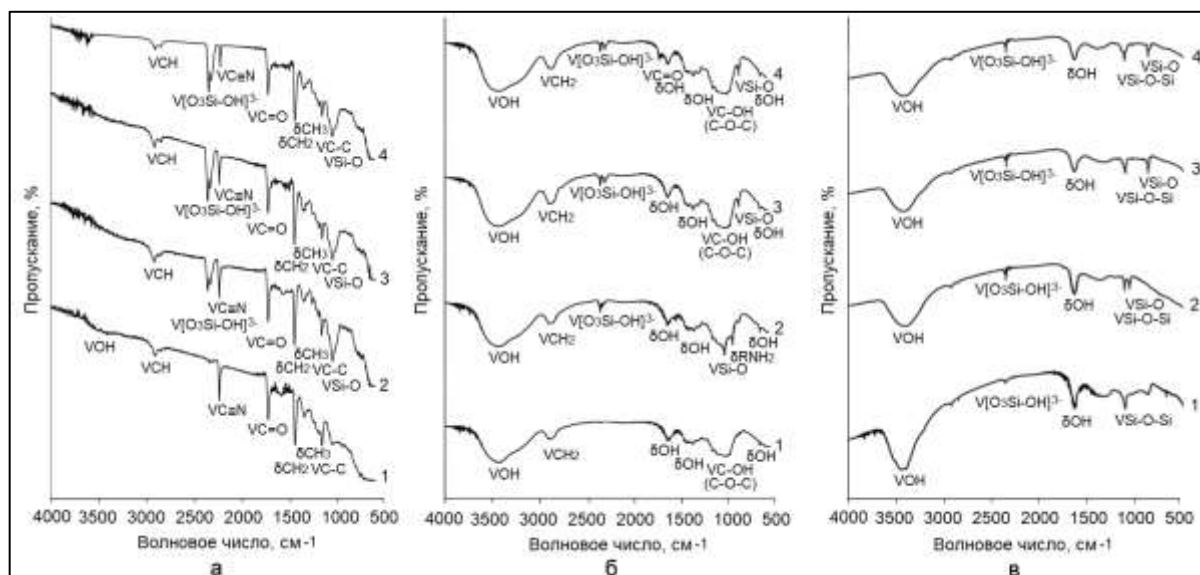
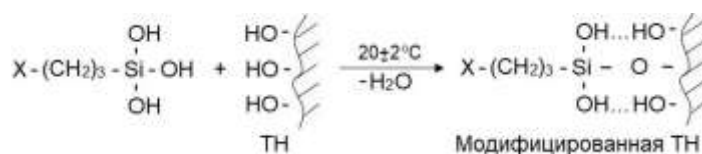


Рисунок 1 – ИК-спектры волокнистых материалов (а – ПАН-ТЖ; б – ГЦТН; в – БН):
 1 – немодифицированный волокнистый материал; 2 – волокнистый материал+АГМ-9;
 3 – волокнистый материал+А-187; 4 – волокнистый материал+А-174

Figure 1 – IR spectra of fibrous materials (a – PAN-TF; b – HCTT; c – BT): 1 - unmodified fibrous material;
 2 - fibrous material+AGM-9; 3 - fibrous material+A-187; 4 - fibrous material+A-174

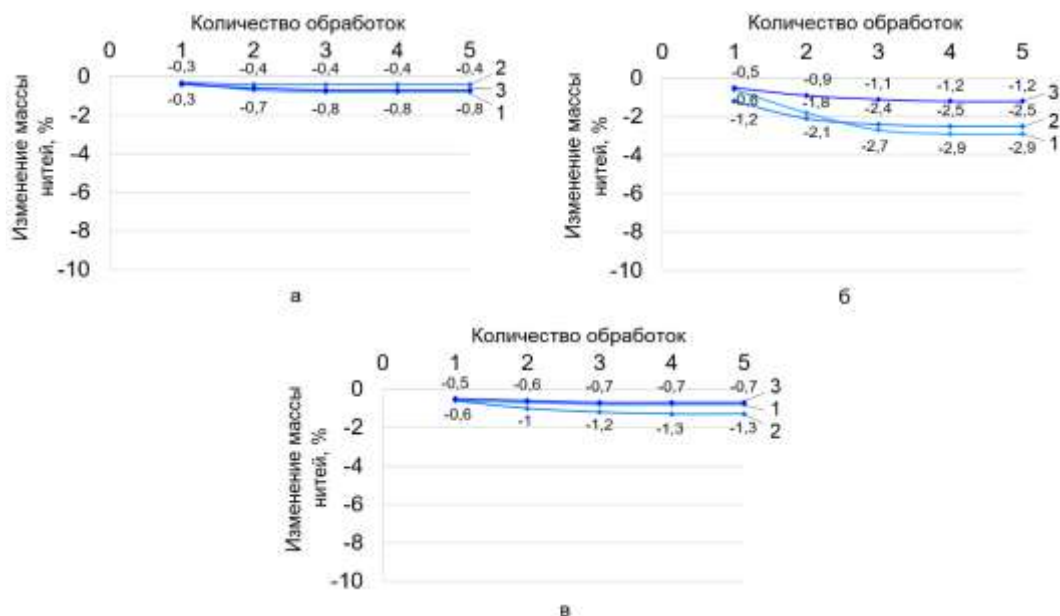


Рисунок 2 – Изменение массы модифицированных волокнистых материалов после термовлажностной обработки (а – ПАН-ТЖ; б – ГЦТН; в – БН): 1 – немодифицированный волокнистый материал;
 2 – волокнистый материал+АГМ-9; 3 – волокнистый материал+А-187; 4 – волокнистый материал+А-174

Figure 2 - Change in the mass of modified fibrous materials after thermal moisture treatment
 (a – PAN-TF; b – HCTT; c – BT): 1 - unmodified fibrous material; 2 - fibrous material+AGM-9;
 3 - fibrous material+A-187; 4 - fibrous material+A-174

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНОСИЛАНОВЫМИ АППРЕТАМИ

При модификации волокнистых материалов всеми исследуемыми аппретирующими составами наблюдается значительное повышение относительной разрывной нагрузки

ки: при обработке ПАН-ТЖ прочность возрастает в среднем на 44 %, при обработке ГЦТН – на 52 %, при обработке БН – на 42 % (рис. 3).

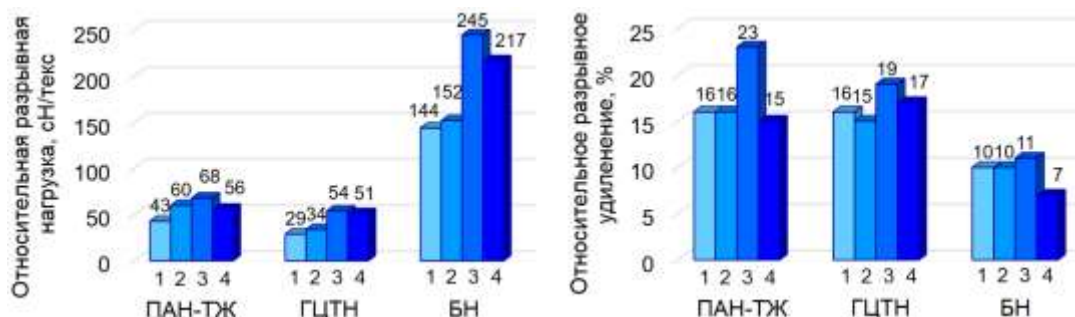


Рисунок 3 – Результаты механических испытаний ПАН-ТЖ, ГЦТН и БН:

1 – немодифицированный волокнистый материал; 2 – волокнистый материал+АГМ-9;
3 – волокнистый материал+А-187; 4 – волокнистый материал+А-174

Figure 3 – Results of mechanical tests of PAN-TF, HCTT and BT: 1 - unmodified fibrous material; 2 - fibrous material +AGM-9; 3 - fibrous material+A-187; 4 - fibrous material+A-174

По степени влияния органосиланов на изменение относительной разрывной нагрузки волокнистых материалов исследуемые аппрету располагаются в следующем порядке:

- при модификации ПАН-ТЖ: А-187 (прочность улучшается на 58 %) > АГМ-9 (прочность улучшается на 40 %) > А-174 (прочность улучшается на 30 %);

- при модификации ГЦТН: А-187 (прочность улучшается на 86 %) > А-174 (прочность улучшается на 76 %) > АГМ-9 (прочность улучшается на 17 %);

- при модификации БН: А-187 (прочность улучшается на 70 %) > А-174 (прочность улучшается на 51 %) > АГМ-9 (прочность улучшается на 6 %).

Полученные данные свидетельствуют о большей эффективности А-187, обусловленной, очевидно, высокой реакционной способ-

ностью силана, сопровождаемой не только гидролизом алкоксигрупп, но и раскрытием эпоксидного кольца органofункциональной группы [1]. Кроме того, активность органосиланов возрастает при взаимодействии с волокнистыми материалами, содержащими поверхностные гидроксильные группы, что подтверждает высокую эффективность А-187 при модификации гидратцеллюлозных и базальтовых нитей.

Увеличению устойчивости ТН к разрывным нагрузкам способствует образование на поверхности модифицированных элементарных нитей равномерного плёночного покрытия, способствующего снижению их дефектности, о чём свидетельствуют результаты оптических исследований волокнистых материалов (на примере гидратцеллюлозных нитей) (рис. 4, а–д).

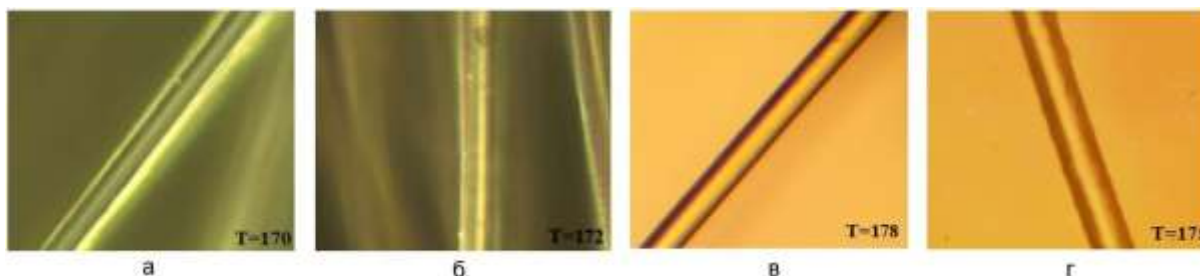


Рисунок 4 – Микрофотографии образцов элементарных ГЦТН (n=800):

а – немодифицированный волокнистый материал; б – волокнистый материал+АГМ-9;
в – волокнистый материал+А-187; г – волокнистый материал+А-174

Figure 4 – Micrographs of samples of elementary HCTT (n=800): a - unmodified fibrous material; b - fibrous material +AGM-9; c - fibrous material+A-187; d - fibrous material+A-174

Учитывая, что модифицированные нити, отличающиеся повышенной прочностью, целесообразно использовать в качестве армирующих систем при получении полимерных композитов, изучена их способность к смачиванию олигомерными связующими.

Для оценки адгезионной совместимости модифицированных ПАН-ТЖ, ГЦТН и БН проведен анализ кинетических кривых и параметров процесса смачивания волокнистых материалов раствором эпоксидного олигомера (рис. 5, а–в), который показал, что аппретирование силаном А-174 (кривая 4) исследуемых нитей в большей степени улучшает смачивающую способность армирующих систем: максимальная высота капиллярного поднятия жидкости ПАН-ТЖ, ГЦТН и БН повышается на 22, 90 и 50 % соответственно, средняя скорость смачивания – на 50, 43 и

73 % соответственно. Обработка гидратцеллюлозных и базальтовых нитей аппретом А-187 (кривая 3) также положительно влияет на смачиваемость нитей эпоксидным олигомером: максимальная высота капиллярного поднятия границы жидкости повышается на 41 и 23 % соответственно, средняя скорость смачивания – на 23 и 46 % соответственно.

Известно, что наиболее прочное адгезионное взаимодействие компонентов происходит между полярными армирующими волокнами и терморезактивной матрицей [6]. Исследуемые в настоящей работе органосиланы обладают способностью повышать полярность обрабатываемых поверхностей [2], что, вероятно, и является причиной увеличения адгезионной совместимости модифицированных ПАН-ТЖ, ГЦТН и БН с раствором эпоксидного олигомера.

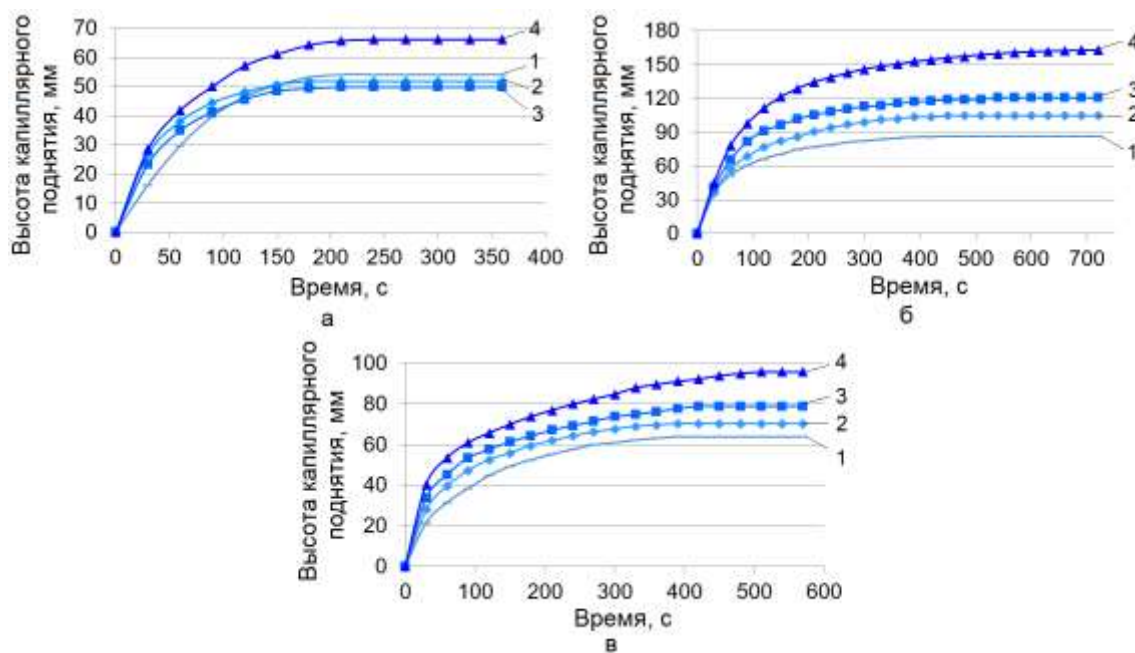


Рисунок 5 – Кинетические кривые смачивания модифицированных волокнистых материалов (а – ПАН-ТЖ; б – ГЦТН; в – БН) раствором эпоксидного олигомера: 1 – немодифицированный волокнистый материал; 2 – волокнистый материал+АГМ-9; 3 – волокнистый материал+А-187; 4 – волокнистый материал+А-174

Figure 5 – Kinetic curves of wetting of modified fibrous materials (a - PAN-TF; b - HCTT; c - BT) with an epoxy oligomer solution: 1 - unmodified fibrous material; 2 - fibrous material+AGM-9; 3 - fibrous material+A-187; 4 - fibrous material+A-174

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментов и полученных данных сформулированы следующие физико-химические особенности аппретирования волокнистых материалов органосилановыми модификаторами:

- физико-химическое взаимодействие

между органосилановыми аппретами и волокнистыми материалами, обеспечивающее фиксацию модификаторов;

- улучшение прочности аппретированных волокнистых материалов в результате образования модифицирующего пленочного покрытия, снижающего дефектность нити;

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНОСИЛАНОВЫМИ АППРЕТАМИ

- различный модифицирующий эффект органосиланов, определяемый их химической природой: большей эффективностью по улучшению прочности волокон обладает А-187, для которого характерен гидролиз алкоксигрупп и раскрытие эпоксидных колец органофункциональной группы в процессе модификации;

- влияние химической природы исследуемых волокон: увеличение устойчивости нитей к разрывным нагрузкам проявляется в большей степени для волокнистых материалов, содержащих поверхностные гидроксильные группы – гидратцеллюлозных и базальтовых нитей;

- улучшение смачивающей способности аппретированных волокнистых наполнителей раствором эпоксидного олигомера, обусловленное повышением полярности используемых компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Функциональные наполнители для пластмасс / под ред. М. Ксантоса. Санкт-Петербург : Научные основы и технологии, 2010. 462 с.
2. Моцарев Г.В., Соболевский М.В., Розенберг В.Р. Карбофункциональные органосиланы и органосилоксаны. Москва : Химия, 1990. 240 с.
3. Цвайфель Х., Маер Р.Д., Шиллер М. Добавки к полимерам : Справочник. Санкт-Петербург : ЦОП «Профессия», 2016. 1088 с.
4. Kumar R., Obrai S., Sharma A. Chemical modifications of natural fiber for composite material // Der Chemica Sinica. 2011. V. 2. № 4. P. 219–228.
5. Epoxyorganosilane finishing compositions for fibrous fillers of thermosetting and thermoplastic binders / A.V. Shapagin, N.A. Gladkikh, A.A. Poteryaev [et al.] // Polymers. 2022. V. 14. № 1. P. 59–73. doi 10.3390/polym14010059.
6. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. Санкт-Петербург : Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
7. Устинова Т.П., Левкина Н.Л., Борисова Н.В. Физико-химические и технологические особенности получения ПАН-волокон и нитей : учеб. пособие. Энгельс : ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2019. 44 с.
8. Роговина С.З., Прут Э.В., Берлин А.А. Композиционные материалы на основе синтетических полимеров, армированных волокнами природного происхождения // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2019. Т. 61. № 4. С. 291–315. doi 10.1134/S2308112019040084.
9. Артеменко С.Е., Кадыкова Ю.А. Физико-химические основы технологии базальтопластиков. Структура и свойства : монография. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. 144 с.
10. Wei B., Cao H., Song S. Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings // Composites. Part A : Applied Science and Manufacturing. 2011. V. 42. № 1. P. 22–29.

doi10.1016/j.compositesa.2010.09.010.

11. Корчина Л.В., Зубова Н.Г., Устинова Т.П. Выбор режима модификации ПАН-жгутика аппретированными добавками // Современные твердофазные технологии : теория, практика и инновационный менеджмент : материалы международной научно-инновационной молодежной конференции. Тамбов : ТГТУ, 2013. С. 228–230.

12. Gerasimova V.M., Zubova N.G., Ustinova T.P. Influence of hydrate cellulose fibers modification parameters on their properties // Fibre Chemistry. 2016. № 48. P. 50–52. doi : 10.1007/s10692-016-9736-z.

13. Effectiveness of modifying viscose technical and basalt yarns used to reinforce epoxy plastics / V.M. Gerasimova, N.G. Zubova, S.G. Kalganova [et al.] // Fibre Chemistry. 2019. № 3. P. 191–194. doi : 10.1007/s10692-019-10072-x.

14. Андреева В.Д., Горшков И.И. Электронная микроскопия материалов : учеб. пособие. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 139 с.

15. Инфракрасная спектроскопия полимеров / под ред. И. Деханта. Москва : Химия, 1976. 472 с.

16. Кобляков А.И., Кукин Г.Н., Соловьев А.И. Лабораторный практикум по текстильному материаловедению : учеб. пособие для вузов. Москва : Легкая промышленность, 1986. 334 с.

17. ГОСТ 10213.2-2002. Волокно штапельное и жгут химические. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. Технические условия : введ. 01.11.2003. Москва : Издательство стандартов, 2003.

18. Бычкова Е.В., Кадыкова Ю.А., Левкина Н.Л. Смачивание в композиционных материалах. Саратов : СГТУ, 2012. 20 с.

19. Кадыкова Ю.А. Физико-химические закономерности создания полимерматричных композитов функционального назначения на основе базальтовых дисперсно-волокнистых наполнителей, углеродных и стеклянных волокон : автореф. дисс. ... Д-ра. техн. наук. Саратов, 2013. 44 с.

20. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. Москва : Издательство иностранной литературы, 1963. 590 с.

21. Сытник Р.Д. Модифицирование поверхности силикатных стекол расплавами и растворами. Харьков : Майдан, 1997. 188 с.

Информация об авторах

Н. Г. Зубова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и естественнонаучные дисциплины» Балаковского инженерно-технологического института – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

REFERENCES

1. Xantos, M. (Ed.). (2010). Functional Fillers for Plastics. Saint Petersburg: Scientific foundations and technologies. (In Russ.).
2. Motsarev, G.V., Sobolevsky, M.V. & Rosen-

- berg, V.R. (1990). Carbofunctional organosilanes and organosiloxanes. Moscow : Chemistry. (In Russ.).
3. Zweifel, H., Maier, R.D. & Schiller, M. (2016). Plastics Additives: Handbook. Saint Petersburg: CEP "Profession". (In Russ.).
4. Kumar, R., Obrai, S. & Sharma, A. (2011). Chemical modifications of natural fiber for composite material. Der Chemica Sinica, 2(4), 219-228.
5. Shapagin, A.V., Gladkikh, N.A., Poteryaev, A.A., Stepanenko, V.Yu., Nikulova, U.V. & Khasbiullin, R.R. (2022). Epoxyorganosilane finishing compositions for fibrous fillers of thermosetting and thermoplastic binders. Polymers, 14(1), 59-73. doi: 10.3390/polym14010059.
6. Perepelkin, K.E. (2009). Reinforcing fibers and fibrous polymeric composites. Saint Petersburg : Scientific foundations and technologies. (In Russ.).
7. Ustinova, T.P., Levkina, N.L. & Borisova, N.V. (2019). Physico-chemical and technological features of obtaining PAN fibers and threads. Engels: ETI (branch) of SGTU named after Gagarin Yu.A. (In Russ.).
8. Rogovina, S.Z., Prut, E.V. & Berlin, A.A. (2019). Composite materials based on synthetic polymers reinforced with natural fibers. Polymer Science. Series A, 61(4), 291-315. (In Russ.). doi: 10.1134/S2308112019040084.
9. Artemenko, S.E. & Kadykova, Yu.A. (2012). Physico-chemical fundamentals of basalt plastics technology. Structure and properties. Saratov : Saratov State Technical University. (In Russ.).
10. Wei, B., Cao, H. & Song, S. (2011). Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings // Composites. Part A : Applied Science and Manufacturing, 42(1), 22-29. doi : 10.1016/j.compositesa.2010.09.010.
11. Korchina, L.V., Zubova, N.G. & Ustinova, T.P. (2013). Selection of the mode of modification of the PAN-flagellum by applying additives. Proceedings of the international scientific and innovative youth conference " Modern solid-phase technologies: theory, practice and innovation management ". Tambov : TSTU. 228-230. (In Russ.).
12. Gerasimova, V.M., Zubova, N.G. & Ustinova, T.P. (2016). Influence of hydrate cellulose fibers modification parameters on their properties. Fibre Chemistry, (48), 50-52. Doi : 10.1007/s10692-016-9736- z.
13. Gerasimova, V.M., Zubova, N.G., Kalganova, S.G. & Ustinova, T.P. (2019). Effectiveness of modifying viscose technical and basalt yarns used to reinforce epoxy plastics. Fibre Chemistry, (3), 191-194. Doi : 10.1007/s10692-019-10072- x.
14. Andreeva, V.D. & Gorshkov, I.I. (2016). Electron microscopy of materials. Saint Petersburg: Publishing House of Polytechnical University. (In Russ.).
15. Dehant, I. (Ed.). (1976). Infrared spectroscopy of polymers. Moscow: Chemistry. (In Russ.).
16. Koblyakov, A.I., Kukin, G.N. & Soloviev, A.I. (1986). Laboratory practice on textile materials science. Moscow: Light industry. (In Russ.).
17. Staple fiber and chemical tourniquet. Methods for determining the breaking load and elongation at break. (2003). HOST 10213.2-2002 from 01. Nov. 2003. Moscow : Standards Publishing House. (In Russ.).
18. Bychkova, E.V., Kadykova, Yu.A., Levkina, N.L. (2012). Wetting in composite materials. Saratov : SSTU. (In Russ.).
19. Kadykova, Yu.A. (2013). Physico-chemical laws of the creation of polymer matrix composites of functional purpose based on basalt dispersed-fibrous fillers, carbon and glass fibers. Extended abstract of doctors thesis. Saratov. (In Russ.).
20. Bellamy, L. (1963). The Infrared spectra of complex molecules. Moscow : Foreign Languages Publishing House. (In Russ.).
21. Sytnik, R.D. (1997). Modification of the surface of silicate glasses by melts and solutions. Khar'kov : Maidan. (In Russ.).

Information about the authors

N.G. Zubova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Physics and the natural Sciences» of the Balakovo Institute of Engineering and Technology - branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 28.03.2023; одобрена после рецензирования 13.08.2023; принята к публикации 11.09.2023.

The article was received by the editorial board on 28 Mar 2023; approved after editing on 13 Aug 2023; accepted for publication on 11 Sep 2023.