

## **Перспективные нетканые материалы на основе термостойких волокон для теплозащиты**

**И. Д. Краев, С. Е. Истягин, Н. М. Скляревская,  
Е. Г. Сурнин, С. Б. Бибииков, М. А. Севостьянов**

---

Исследованы физические, механические и термические свойства новых нетканых материалов на основе термостойких волокон. Проведен анализ существующих нетканых материалов различных волокнистых составов, а также эффективных гидрофобизирующих композиций. Разработана методика изготовления гидрофобизированных нетканых материалов с применением растворов фторсодержащего латекса. Определены значения объемной плотности образцов, проведен термогравиметрический анализ, исследованы механические свойства (значения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве), водопоглощение и другие технические характеристики разработанного материала, изготовлена экспериментальная партия.

**Ключевые слова:** нетканый материал, волокнистая структура, гидрофобизирующий состав, арамид, ОПАН, фторсодержащий латекс.

**DOI: 10.30791/1028-978X-2024-6-47-56**

---

### **Введение**

Нетканые материалы (НМ) широко применяемые в различных технических областях (строительстве, легкой промышленности, машиностроении, сельском хозяйстве и др. [1]), обладают большим числом полезных свойств, например: хорошими теплозвукоизоляционными характеристиками [2, 3], низкими показателями поверхностной и объемной плотности, высокой фильтрующей способностью [4, 5] и т.д. Комплекс эксплуатационных свойств НМ зависит от показателей толщин, плотности, химического состава, геометрических размеров, формы, используемых волокон; типов функционализации и используемых модифицирующих веществ; технологических параметров изготовления [6]. Натуральные волокна (хлопок, банановые, джутовые и многие другие) широко используют для изготовления НМ, обладают некоторыми преимуществами, по сравнению с материалами на базе синтетических волокон, например, при учете экологических аспектов применения [7]. Среди НМ на основе синтетических волокон распространены материалы, изготовленные из полиэстера и полипропилена [8, 9].

В работе [10] представлен НМ на основе синтетических волокон полиэстера, модифицированный композициями, содержащими минеральные включения (белый туф, перлит), для улучшения теплоизоляционных характеристик. В работе [11] приведено описание теплоизоляционного материала для подземных трубопроводов, представляющего собой НМ из волокон полиэтилентерефталата (ПЭТ) с базальтовой тканью.

Перспективным направлением по расширению эксплуатационных характеристик НМ является использование смесевых составов на основе волокон различного химического строения, отличающихся по геометрии. В работе [12] рассмотрен смесевой НМ, полученный из волокон полиэстера в сочетании с волокнами животного происхождения, в определенных соотношениях для снижения коэффициентов теплопроводности, по сравнению со свойствами НМ на одном типе волокон. В работе [13] продемонстрированы теплоизоляционные свойства НМ, изготовленных из текстильных отходов (волокон шерсти, полиакрилонитрила). Показана возможность регулирования теплофизических характеристик материалов путем использования различных смесевых составов НМ. Такие

материалы, полученные из смеси волокон джута, полипропилена и полиэстера, обладают комплексом ценных эксплуатационных характеристик и применяются в производстве автомобильных кресел [14]. Применение смеси льняных и ПЭТ (10, 20 и 30 масс. %) волокон позволило придать акустическим конструкциям хорошие регулируемые звукопоглощающие характеристики [15]. В [16] представлен НМ из смеси волокон крапивы и полипропилена в экспериментально установленном массовом соотношении 30/70 %, обеспечивающий максимально высокую сорбцию сырой нефти и дизельного топлива.

Среди синтетических НМ можно выделить отдельную группу материалов, состоящих из волокон, обладающих высокими прочностными характеристиками, в сочетании с огне- и термостойкостью, например: арамидные, полиимидные, оксодиазольные [17], а также из окисленного полиакрилонитрила (ОПАН) [18]. Для обеспечения работоспособности в экстремальных условиях (при повышенных температурах и действии внешних агрессивных сред) при решении задач электромагнитной совместимости в [19, 20] исследованы свойства облегченных функционализированных НМ, изготовленных из метаарамидных волокон с нанесением электропроводящих составов. В [21] предложен арамидный НМ для использования в качестве основы композиционных слоистых материалов конструкционного назначения и межслойной изоляции в сухих трансформаторах. Волокна из ОПАН марки Zoltek OX™ применяют в производстве огне-, термостойких НМ для авиационной и автомобильной промышленности [22].

В работе [23] представлены результаты исследований термических, теплофизических и механических характеристик НМ из ОПАН, в том числе модифицированных аэрогелем; подобраны технологические параметры и составы, обеспечивающие наилучший комплекс свойств. С целью регулирования эксплуатационных характеристик интерес представляют работы по получению НМ из смеси различных термостойких волокон.

В [24] описан огнестойкий, фильтрующий иглопробивной НМ с поверхностной плотностью 400 – 550 г/м<sup>2</sup>, изготовленный из смеси волокон ОПАН и метаарамида в различных массовых соотношениях. В [25] представлен НМ из смеси волокна ОПАН с вязким и бикомпонентным волокнами для формирования подкладочного слоя огне- и теплозащитной одежды.

Смесевые НМ на основе термостойких волокон нашли широкое применение в системах тепло-

защиты авиационных и ракетных комплексов. В [26] рассмотрены свойства, способы изготовления, гидрофобизация и калибровка НМ для обеспечения теплозащиты космического аппарата на основе различных смесей высокомодульных термостойких волокон.

Для улучшения и расширения рабочих эксплуатационных свойств НМ, а также для устранения их недостатков применяют различные модифицирующие составы и добавки. Чаще всего НМ пропитывают растворами композиций, придающих им требуемые свойства. Известны, полимерные композиты, армированные НМ, к одному из основных преимуществ которых относятся высокие показатели прочности в z-направлении [27]. Распространенными недостатками НМ, связанными с их развитой пористой структурой, являются высокие показатели влаго- и водопоглощения. Для устранения данных проблем применяют различные гидрофобизирующие составы. В [28] предложено обеспечение гидрофобизации текстильного арамидного материала путем использования композиции на основе групп парафинов. С целью сохранения высокой термической стабильности гидрофобизированных НМ применяют составы на основе кремнийорганических соединений [29].

Фторидные реагенты перспективны при изготовлении супергидрофобных покрытий, благодаря значительному снижению свободной поверхностной энергии, а также обладают хорошей химической стойкостью. Например, известно применение фторопластов, которые наносят на поверхность волокон из растворов или используют в виде суспензий [30, 31]. В [32, 33] показана высокая эффективность применения гидрофобизирующих составов на основе низкомолекулярных фторолигомеров и фторированных парафинов для защиты пористых систем от воздействия влаги.

После распада СССР были утрачены технологии и производства НМ на основе термостойких высокомодульных волокон (фенилон, терлон, лола и т.д.). До настоящего времени их производство не налажено, в связи с чем работы по созданию материалов аналогов крайне актуальны.

Цель работы — исследование гидрофобизации нетканых материалов на основе полиоксадиазольных, арамидных и углеродных волокон для улучшения их эксплуатационных характеристик.

## **Материалы и методы исследования**

В работе исследована гидрофобизация образцов НМ на основе полиоксадиазольных, арамид-

ных и углеродных волокон в водных растворах фторсодержащего латекса в сочетании с амино-функциональным аппретом.

Выбор данных волокон в качестве основы НМ был обусловлен высокой термостойкостью и повышенными механическими характеристиками. Водный фторсодержащий латекс на ряду с возможностью обеспечения рабочей температуры не менее 200 °С, перспективен в качестве гидрофобизатора (ГФ), в связи с простотой нанесения и отсутствием вредных токсичных выделений при производстве материалов. Выбранные НМ изготовлены по иглопробивной технологии, обладали схожей плотностью и толщиной.

### Методика изготовления образцов гидрофобизированных НМ

Методика изготовления образцов гидрофобизированных НМ (ГНМ) включала следующие стадии:

- раскрой заготовок НМ;
- приготовление водных растворов фторсодержащего латекса, в том числе в сочетании с амино-функциональным аппретом;
- пропитка заготовок НМ в приготовленных растворах путем полного погружения в пропиточных ваннах;
- сушка полученных пропитанных заготовок НМ в сушильном шкафу в течение 4 ч при температуре 160 °С.

При изготовлении экспериментальных образцов ГНМ использовали следующее оборудование: весы лабораторные VIBRALN 8201CE; верхнеприводную мешалку DW-90; сушильный шкаф ШС-80-01-СПУ до 200 °С.

### Методы исследования

Значения объемной плотности образцов НМ и ГНМ определены по ГОСТ 17177-94.

Термогравиметрический анализ (ТГА) образцов НМ проводили с использованием прибора TG 209 F1 Libra по ГОСТ 29127-91. Класс точности прибора — I. Механические свойства (значения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве) образцов НМ изучали на универсальной машине марки Zwick/Roell Z100 по ГОСТ 15902.3-79. Водопоглощение образцов НМ и ГНМ исследовали по методу из раздела 2 ГОСТ 17177-94.

Значения краевого угла смачивания (КУС) образцов НМ и ГНМ определены с использованием дистиллированной воды (ГОСТ Р 58144–2018) и глицерина (ЧДА; ГОСТ 6824–96) на приборе ОСА-15ЕС. Исследования проводили при температуре окружающей среды  $20 \pm 3$  °С и относительной влажности 50 – 55 %. На каждом образце проведено 10 измерений для каждой из жидкостей и по результатам средних значений рассчитана свободная энергия поверхности (СЭП). Значения СЭП, рассчитанные на приборе ОСА методом Оуэнса, Вендта, Рабеля и Кьелбле (ОВРК), составляли сумму из двух частей энергии: полярной и дисперсионной. Класс точности прибора — I. Данный метод широко применяют при исследовании СЭП и КУС различных материалов. Для расчёта СЭП задавали начальные значения СЭП, полярной и дисперсионной энергий для применяемых жидкостей при температуре исследования. В расчетах использовали значения энергий при комнатной температуре из исследований Гебхардта для воды и Ван Осса для глицерина [34], приведённые в табл. 1.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проведения сравнительного анализа влияния состава волокнистой структуры на свойства НМ изготовлены образцы, состоящие из 100 % арамидных волокон, 100 % волокон ОПАН, 100 % полиоксадиазольных волокон, а также смесей арамидных и ОПАН волокон, составов: 30 и 70 %; 70 и 30 %.

Таблица 1

Свободная энергия поверхности, полярная и дисперсионная энергии тестовых жидкостей [34]

Table 1

Surface free energy, polar and dispersion energies of test liquids [34]

| Тестовая жидкость | Свободная энергия поверхности, мН/м | Полярная энергия, мН/м | Дисперсионная энергия, мН/м |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Вода              | 72,8                                | 26,0                   | 46,8                        |
| Глицерин          | 64,0                                | 34,0                   | 30,0                        |

### Термические и механические свойства

Результаты испытаний механических характеристик (разрывная нагрузка и относительное удлинение) образцов НМ различных составов при комнатной температуре приведены в табл. 2.

Согласно результатам исследований механических свойств образцов (табл. 2), отмечено значительное влияние состава на показатели механических характеристик образцов. Наибольшие значения разрывной нагрузки характерны для образцов НМ на основе арамидных волокон, наименьшие — для образцов НМ на основе волокон ОПАН. При изготовлении образцов НМ на основе смеси различных волокон, в данном случае арамидных и ОПАН, можно регулировать механические характеристики. С повышением массовой концентрации арамидных волокон в смешанной структуре наблюдается увеличение разрывной нагрузки.

Изготовление образцов НМ методом смешивания ОПАН и арамидных волокон дает возможность расширения термических характеристик, а также обеспечения более высокой стойкости к действию неблагоприятных атмосферных факторов, таких как УФ излучение, окисление и т.п., по сравнению со свойствами образцов, состоящих только из арамидных волокон.

Термические характеристики исходных образцов НМ без гидрофобизации разного структурного состава определяли методом термогравиметрического анализа (ТГА).

По результатам проведенного ТГА (рис. 1) у образца НМ на основе арамидных волокон (кривая 3) наблюдалась наибольшая потеря массы при наименьших характеристических температурах деструкции (начало, перегиб, конец).

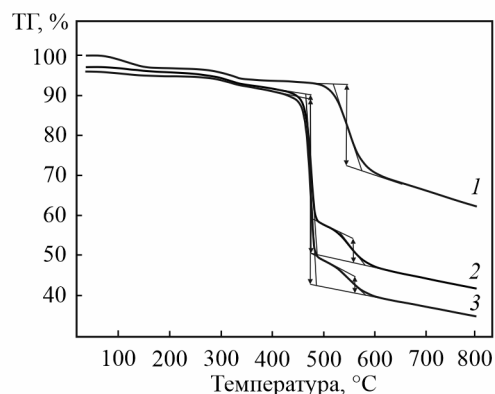


Рис. 1. ТГА образцов НМ на основе волокон: 1 — ОПАН (100 %); 2 — арамидные (70 %) и ОПАН (30 %); 3 — арамидные (100 %).

Fig. 1. TGA of fiber-based NM samples: 1 — OPAN (100 %); 2 — aramid (70 %) and OPAN (30 %); 3 — aramid (100 %).

При сравнении термогравиметрических кривых образцов НМ (кривые 1 – 3), отмечалось снижение потери массы с увеличением в структуре образца волокон ОПАН. НМ обладают набором полезных эксплуатационных свойств, при этом распространенным недостатком является высокое водо- и влагопоглощение.

### Краевой угол смачивания образцов до и после гидрофобизации

По результатам проведенных исследований и расчетов (табл. 3) отмечено значительное увеличение КУС и СЭП на образцах НМ всех составов после обработки 3 %-м раствором гидрофобизатора

Таблица 2

Механические характеристики образцов НМ различных составов (толщина  $5,0 \pm 0,1$  мм и поверхностная плотность  $500 \pm 20$  г/м<sup>2</sup>)

Table 2

Mechanical characteristics of NM samples of various compositions (thickness  $5.0 \pm 0.1$  mm and surface density  $500 \pm 20$  g/m<sup>2</sup>)

| Состав НМ                              | Разрывная нагрузка, МПа |                  | Относительное удлинение, % |             |
|--|-------------------------|------------------|----------------------------|-------------|
|  | вдоль                   | поперек          | вдоль                      | поперек     |
| Полиоксадиазольные волокна (100 %)     | $0,29 \pm 0,02$         | $0,18 \pm 0,01$  | $77 \pm 2$                 | $116 \pm 3$ |
| Арамидные волокна (100 %)              | $0,52 \pm 0,03$         | $0,31 \pm 0,02$  | $60 \pm 2$                 | $77 \pm 2$  |
| Волокна ОПАН (100 %)                   | $0,04 \pm 0,005$        | $0,02 \pm 0,005$ | $128 \pm 3$                | $169 \pm 3$ |
| Арамидные волокна (70 %) и ОПАН (30 %) | $0,32 \pm 0,02$         | $0,22 \pm 0,01$  | $53 \pm 2$                 | $90 \pm 2$  |
| Арамидные волокна (30 %) и ОПАН (70 %) | $0,09 \pm 0,005$        | $0,05 \pm 0,005$ | $76 \pm 2$                 | $131 \pm 3$ |

Таблица 3

Результаты измерения краевого угла смачивания КУС, полярной и дисперсионной энергий на образцах НМ и расчета СЭП

| Состав НМ                                    | Гидрофобизация | Краевой угол смачивания, °С | Свободная энергия поверхности, мН/м | Полярная энергия, мН/м | Дисперсионная энергия, мН/м |
|--|----------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Арамидные волокна (100 %)                    | –              | 68 ± 0,1                    | Капли впитываются в материал        |                        |                             |
|  | +              | 135 ± 0,1                   | 1,20 ± 0,01                         | 0,54 ± 0,01            | 0,66 ± 0,01                 |
| Смесь волокон арамидные (70 %) и ОПАН (30 %) | –              | 63 ± 0,1                    | Капли впитываются в материал        |                        |                             |
|  | +              | 126 ± 0,1                   | 1,55 ± 0,01                         | 0,25 ± 0,01            | 1,30 ± 0,01                 |
| Смесь волокон арамидные (30 %) и ОПАН (70 %) | –              | 57 ± 0,1                    | Капли впитываются в материал        |                        |                             |
|  | +              | 119 ± 0,1                   | 1,71 ± 0,01                         | 1,21 ± 0,01            | 0,50 ± 0,01                 |
| Полиоксадиазольные волокна (100 %)           | –              | 72 ± 0,1                    | Капли впитываются в материал        |                        |                             |
|  | +              | 138 ± 0,1                   | 1,98 ± 0,01                         | 0,88 ± 0,01            | 1,10 ± 0,01                 |

Table 3

Results of measuring the SOS, polar and dispersion energies on NM samples and calculating the surface free energy

Таблица 4

Механические характеристики образцов НМ и ГНМ (толщина 5,0 ± 0,1 мм)

| Состав НМ и ГНМ                                 | Разрывная нагрузка, МПа |             | Относительное удлинение, % |         |
|---|-------------------------|-------------|----------------------------|---------|
|   | вдоль                   | поперек     | вдоль                      | поперек |
| Полиоксадиазольные волокна (100 %)              | 0,29 ± 0,2              | 0,18 ± 0,01 | 77 ± 2                     | 116 ± 3 |
| Полиоксадиазольные волокна (100 %) + 5 % ГФ     | 0,31 ± 0,2              | 0,20 ± 0,01 | 81 ± 2                     | 111 ± 3 |
| Арамидные волокна (100 %)                       | 0,52 ± 0,3              | 0,31 ± 0,02 | 60 ± 1                     | 77 ± 2  |
| Арамидные волокна (100 %) + 5 % ГФ              | 0,54 ± 0,3              | 0,32 ± 0,02 | 57 ± 1                     | 76 ± 2  |
| Арамидные волокна (70 %) и ОПАН (30%)           | 0,32 ± 0,2              | 0,22 ± 0,01 | 52 ± 1                     | 90 ± 2  |
| Арамидные волокна (70 %) и ОПАН (30 %) + 5 % ГФ | 0,34 ± 0,2              | 0,22 ± 0,01 | 52 ± 1                     | 93 ± 2  |

Table 4

Mechanical characteristics of NM and GNM samples (thickness 5.0 ± 0.1 mm)

на основе фторорганического латекса. Капли жидкостей впитывались в материал образцов исходных НМ (без гидрофобизации) в первые секунды исследований, независимо от состава волокнистой

структуры. Вид капель глицерина на образцах НМ на основе арамидных волокон в исходном состоянии и после гидрофобизации представлены на рис. 2.

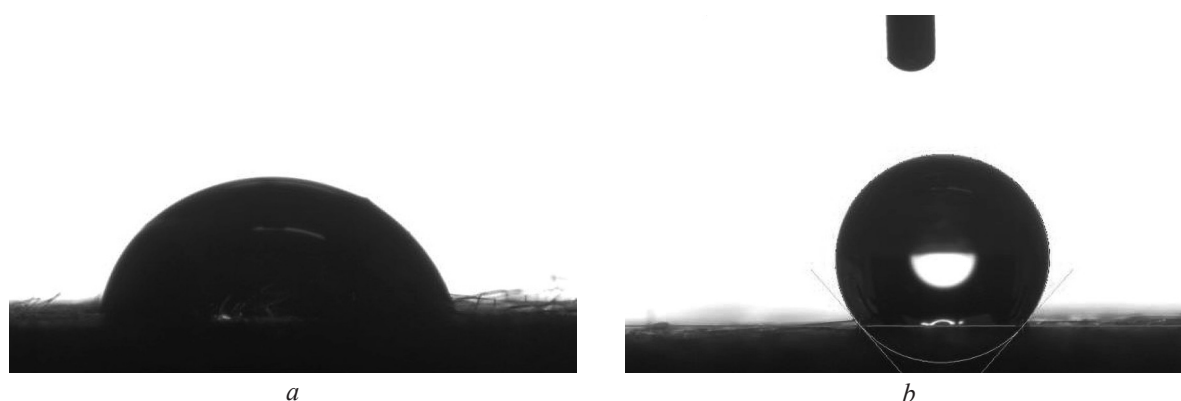


Рис. 2. Вид капли глицерина на образцах НМ на основе арамидных волокон: *a* — в исходном состоянии (видео фиксация процесса поглощения ее капли); *b* — с гидрофобизацией.

Fig. 2. Drop of glycerin on NM samples (based on aramid fibers): *a* — in the initial state (video recording of the process of absorption of its drop); *b* — with hydrophobization.

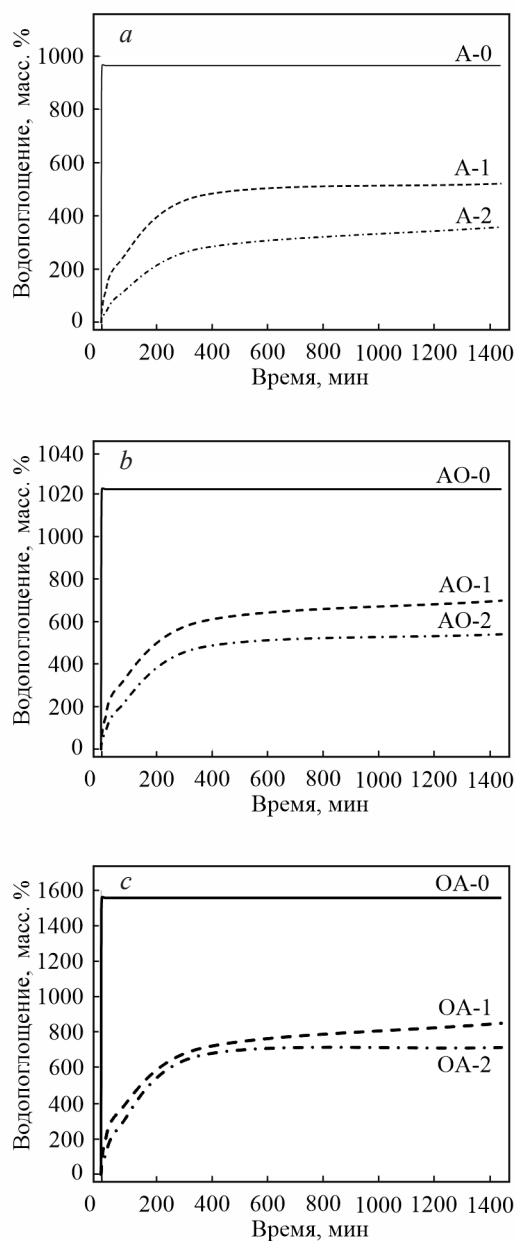


Рис. 3. Водопоглощение образцов НМ и ГНМ на основе (а) арамидных волокон: А-0 (исходный), А-1 (с ГФ 3%), А-2 (с ГФ 5%); (б) арамидных (70 %) и ОПАН (30 %) волокон: АО-0 (исходный), АО-1 (с ГФ 3 %), АО-2 (с ГФ 5 %); (в) арамидных (30 %) и ОПАН (70 %) волокон: ОА-0 (исходный), ОА-1 (с ГФ 3 %), ОА-2 (с ГФ 5 %).

Fig. 3. Water absorption of NM and GNM samples based on (a) aramid fibers: A-0 (initial), A-1 (with hydrophobization (HP) 3 %), A-2 (with HP 5 %); (b) aramid (70 %) and OPAN (30 %) fibers: AO-0 (initial), AO-1 (with 3 % HP), AO-2 (with 5 % HP); (c) aramid (30 %) and OPAN (70 %) fibers: OA-0 (initial), OA-1 (with 3 % HP), OA-2 (with 5 % HP).

### Водопоглощение образцов НМ до и после гидрофобизации

Проведена оценка водопоглощения различных образцов НМ и ГНМ (рис. 3).

Из рис. 3 видно значительное влияние концентрации ГФ на показатели водопоглощения образцов НМ и ГНМ. Для исходных образцов НМ без ГФ насыщение водой до практически 1000 масс. % наступало уже в течении 1 – 3 мин. С ростом концентрации ОПАН волокон в структуре НМ отмечено более ускоренное водопоглощение. При увеличении концентрации ГФ для образцов ГНМ показатели водопоглощения снижались при одинаковом времени экспозиции, по сравнению с образцами исходных НМ и ГНМ, пропитанными растворами ГФ меньших концентраций.

### Механические свойства образцов ГНМ

Проведена сравнительная оценка механических свойств образцов НМ и ГНМ с одинаковой волокнистой структурой (табл. 4).

Согласно полученным результатам (табл. 4), механические характеристики образцов ГНМ соответствуют характеристикам аналогичных исходных образцов НМ. Обработка гидрофобизирующим составом при концентрациях до 8 % не приводила к изменению механических характеристик образцов НМ.

Таблица 5

Технические характеристики экспериментальной партии ГНМ состава (Арамидные волокна (70%) и ОПАН (30 %) + 3 % ГФ)

Table 5

Technical characteristics of the experimental batch of GNM composition (Aramid fibers (70 %) and OPAN (30 %) + 3 % GF)

| №  | Характеристика                         | Значение                       |
|----|--|--------------------------------|
| 1  | Толщина, мм                            | 4,8 ± 0,1                      |
| 2  | Плотность, кг/м <sup>3</sup>           | 110,0 ± 0,4                    |
| 3  | Краевой угол смачивания, град.         | 129                            |
| 4  | Водопоглощение за 1 мин, масс. %       | 11,5                           |
| 5  | Разрывная нагрузка вдоль, МПа          | 0,32 ± 0,02                    |
| 6  | Разрывная нагрузка поперек, МПа        | 0,21 ± 0,01                    |
| 7  | Предел прочности при отрыве, МПа       | 0,10 ± 0,01                    |
| 8  | Рабочий диапазон температур, °С        | -60 – +300                     |
| 9  | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | 0,083±0,006                    |
| 10 | Горючесть                              | Трудногоряемый, самозатухающий |

Свойства экспериментальной партии ГНМ состава (Арамидные волокна (70 %) и ОПАН (30 %) + 3 % ГФ).

Экспериментальная партия ГНМ в количестве более 50 п.м на основе смеси арамидных (70 %) и ОПАН (30 %) волокон, гидрофобизированных раствором латекса (3 масс. %), изготовлена во ФГБНУ ВНИИФ.

Технические характеристики изготовленной экспериментальной партии ГНМ представлены в табл. 5.

## Выводы

Использование смешанных волокнистых структур расширяет диапазон технических характеристик нетканых материалов и изделий на их основе. Это механические, термические свойства, стойкость к действию внешних воздействующих факторов и др.

Использование гидрофобизирующих составов на базе водных растворов фторсодержащего латекса при концентрациях от 3 до 5 масс. % позволило увеличить значения КУС от 57 – 72° (на исходных НМ) до 119 – 138° (на образцах ГНМ), а также значительно снизить водопоглощение гидрофобизированных образцов на 30 – 50 % (в зависимости от состава волокнистой структуры), по сравнению с исходными аналогичными НМ.

Установлено, что ГФ при концентрациях до 8% не влияет на уровень механических свойств ГНМ, по сравнению с исходными НМ. При концентрациях более 9 %, происходит упрочнение материалов, но также увеличиваются показатели плотности и теплопроводности, что является существенным недостатком для технического применения.

Показана практическая значимость и полезность применения пористо-волокнистых структур из термостойких волокон и водных растворов фторсодержащего латекса в сочетании с амино-функциональным аппретом для гидрофобизации.

Технология изготовления ГНМ проста в исполнении и легко масштабируется с использованием промышленного оборудования.

*Статья опубликована в рамках Шестого международного молодежного научно-практического форума “Нефтяная столица” (22 – 23 марта 2023 г.).*

## Литература/References

1. Zezhao Ding, Aijaz Ahmed Babar, Chao Wang, Peng Zhang, Xianfeng Wang, Jianyong Yu, Bin Ding.

Spunbonded needle-punched nonwoven geotextiles for filtration and drainage applications: Manufacturing and structural design. *Composites Communications*, 2021, v. 25, art. 100481. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100481>.

2. Thirumurugan V., Karthikeyan S., K. Vinesh Kumar Reddy, Murugan E. A Study on the effects of physical properties and thermal properties of nonwoven fabric. *IJRAMT*, 2021, v. 2, no. 5, pp. 8–10.
3. Онипченко Н.А., Грузинцева Н.А. Актуальность использования нетканых материалов с повышенными теплозащитными свойствами. Молодые ученые — развитию национальной технологической инициативы (поиск), 2021. № 1, с. 835 – 836.
- Onipchenko N.A., Gruzincev N.A., Aktualnost ispolzovania netkanih materialov s povishennimi teplozashitnimi svoystvami [The relevance of the use of nonwovens with increased thermal protection properties]. *Molodie uchenie — razvitiyu nacionalnoy tehnologicheskoy iniciativi (poisk)* [Young Scientists — Development of the National Technology Initiative (search).], 2021, no. 1, pp. 835 – 836. (In Russ.).
4. Thilagavathi G, Muthukumar N, Neelakrishnan S, Santhosh Egappan R. Development of polyester needle-punched nonwoven fabrics for filter press applications. *Journal of Industrial Textiles*, 2019, v. 48, no. 10, pp. 1566 – 1579. <https://doi.org/10.1177/1528083718769929>.
5. Xing Zhang, Yuxiao Wang, Wanjun Liu, Xiangyu Jin. Needle-punched electret air filters (NEAFs) with high filtration efficiency, low filtration resistance, and superior dust holding capacity. *Separation and Purification Technology*, 2022, v. 282, part B, art. 120146. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120146>.
6. Xiaoming Zhao, Yuanjun Liu, Tenglong Liang. Influence of the needle number on the heat insulation performance of pre-oxidized fibre felts. *Fibresand Textiles in Eastern Europe*, 2018, v. 26, no. 3, pp. 80 – 86.
7. Bhuvaneshwari M., Sangeetha K. Development of natural fiber nonwovens for thermal insulation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018, v. 13, no. 21, pp. 14903 – 14907.
8. Karimi F., Soltani P., Zarrebini M., Hassanpour A. Acoustic and thermal performance of polypropylene nonwoven fabrics for insulation in buildings. *Journal of Building Engineering*, 2022, v. 50, art. 104125. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104125>.
9. Merve Kucukali Ozturk, Mohanapriya Venkataraman, Rajesh Mishra. Influence of structural parameters on thermal performance of polypropylene nonwovens. *Polymers Advanced Technologies*, 2018, v. 29, no. 12, pp. 3027 – 3034. <https://doi.org/10.1002/pat.4423>.
10. Eyupoglu C., Eyupoglu S., Merdan N. Improvement of thermal insulation properties of polyester nonwoven and estimation of thermal conductivity coefficients using artificial neural network. *ASTM International*, 2019, v. 47, no. 2, pp. 1075 – 1086. <https://doi.org/10.1520/JTE20180129>.
11. Ting-Ting Li, Xiayun Zhang, Haokai Peng, Qian Jiang, Wenna Dai, Ching-Wen Lou, Jia-Horng Lin.

- Thermally bonded PET–basalt sandwich composites for heat pipeline protection: Preparation, stab resisting, and thermal-insulating properties. *Applied Sciences*, 2018, v. 8, no. 4, pp. 135 – 137. <https://doi.org/10.3390/app8040510>.
12. Surjit R., Murugan R., Karthik T. Thermal and sound insulation properties of chiengora blended nonwoven fabrics. *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, 2019, v. 44, no. 3, pp. 306 – 313.
  13. El Wazna M., Gounni A., El Bouari A., El Alami M., Cherkaoui O. Development, characterization and thermal performance of insulating nonwoven fabrics made from textile waste. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, v. 48, no. 7, pp. 1167 – 1183. <https://doi.org/10.1177/1528083718757526>.
  14. Thirumurugan V., Kumar M.R., Das Subrata. Thermal insulation properties of jute, polypropylene and recycled polyester nonwoven fabrics for automotive textiles. *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, 2021, v. 46, no. 2, pp. 186 – 190.
  15. Muthukumar N., Thilagavathi G., Neelakrishnan S., Poovaragan P.T. Sound and thermal insulation properties of flax/low melt PET needle punched nonwovens. *Journal of Natural Fibers*, 2019, v. 16, no. 2, pp. 245 – 252. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1414654>.
  16. Brindha R., Thilagavathi G., Viju S. Development of nettle–polypropylene-blended needle-punched nonwoven fabrics for oil spill cleanup applications. *Journal of Natural Fibers*, 2020, v. 17, pp. 1439 – 1453. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1578717>.
  17. Makarov B.P., Shablygin M.V., Matrokhin A.Yu., Mikhailova M.P. A method for producing nonwoven fabric based on arselon fiber for filtration of air mixtures. *Fibre Chemistry*, 2020, v. 51, pp. 437 – 439. <https://doi.org/10.1007/s10692-020-10128-3>.
  18. Каменев Д.В., Федченко О.А. Нетканый огнестойкий утеплительный материал. Патент РФ № 208877 У1. Заявл. 01.03.2021. Оpubл. 19.01.2022.
    - Kamenev D.V., Fedchenko O.A. Netkaniy ognestoykiy uteplyitel'nyy material [Non-woven fire-resistant insulation material]. Patent RF 208877 U1. Declared 01.03.2021. Publ. 19.01.2022. (In Russ.).
  19. Yanfen Zhou, Wenyue Li, Lele Li, Zhenhua Sun, Liang Jiang, Jianwei Ma, Shaojuan Chen, Xin Ning & Feng – Lei Zhou. Lightweight and highly conductive silver nanoparticles functionalized meta-aramid nonwoven fabric for enhanced electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Science*, 2021, v. 56, pp. 6499 – 6513.
  20. Lele Li, Baojie Sun, Wenyue Li, Liang Jiang, Yanfen Zhou, Jianwei Ma, Shaojuan Chen, Xin Ning, Feng-Lei Zhou. Flexible and highly conductive AgNWs/PEDOT:PSS functionalized aramid nonwoven fabric for high-performance electromagnetic interference shielding and joule heating. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, v. 306, no. 11, art. 2100365. <https://doi.org/10.1002/mame.202100365>.
  21. Буринский С.В., Цыбук И.О., Антонова Е.А., Лысенко В.А., Крисковец М.В. Способ получения термостойкого нетканого материала. Патент РФ № 2667359 С1. Заявл. 22.05.2017. Оpubл. 18.09.2018.
    - Burinsky S.V., Tsybuk I.O., Antonova E.A., Lysenko V.A., Kriskovets M.V. Sposob polucheniya termostoykogo netkanogo materiala [A method for producing heat-resistant nonwoven fabric]. Patent RF № 2667359 C1. Declared 22.05.2017. Publ. 18.09.2018. (In Russ.).
  22. Alan Handermann. Oxidized polyacrylonitrile fiber properties, products and applications. *Zoltek Whitepaper*, 2017, pp. 120 – 132.
  23. Xiaoming Zhao, Yuanjun Liu, Tenglong Liang. Study on the thermal insulation performance of PAN pre-oxidised fibre felts. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2020, v. 28, no. 3(141), pp. 27 – 37.
  24. Супрунюк О.К. Огнестойкий нетканый фильтрующий материал. Патент РФ № 2736019 С1. Заявл. 12.05.2020. Оpubл. 11.11.2020.
    - Suprunjuk O.K. Ognestoykiy netkaniy filtruyushiy material [Fire-resistant non-woven filter material]. Patent RF № 2736019 C1. Declared 12.05.2020. Publ. 11.11.2020. (In Russ.).
  25. Каменев Д.В., Федченко О.А. Нетканый огнестойкий утеплительный материал. Патент РФ № 203722 У1. Заявл. 22.06.2020. Оpubл. 16.04.2021.
    - Kamenev D.V., Fedchenko O.A. Netkaniy ognestoykiy material [Non-woven fire-resistant insulation material]. Patent RF № 203722 U1. Declared 22.06.2020. Publ. 16.04.2021. (In Russ.).
  26. Кондрашов Э.К., Кузьмин В.В., Минаков В.Т., Пономарева Е.А. Нетканые материалы на основе термостойких полимерных волокон и межплиточные уплотнения. *Труды ВИАМ*, 2013, № 7. с. 5 – 17.
    - Kondrashev E.K., Kuzmin V.V., Minakov V.T., Ponomareva E.A. Netkanie materialy na osnove termostoykih polimernih volokon i mezhplitochnye uplotneniya [Nonwovens based on heat-resistant polymer fibers and interlayer seals]. Trudi VIAM [Proceedings of VIAM], 2013, no. 7, pp. 5 – 17. (In Russ.).
  27. Prabina Kumar Patnaika, Priyadarshi Tapas Ranjan Swain, Srimant Kumar Mishra, Abhilash Purohit, Sandhyarani Biswas. Recent developments on characterization of needle-punched nonwoven fabric reinforced polymer composites – A review. *Materials Today: Proceedings*, 2020, v. 26, part 2, pp. 466 – 470. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.086>.
  28. Хартерт Р. Текстильный материал, имеющий водоотталкивающую аппретуру, и способ его получения. Патент РФ № 2707937 С2. Заявл. 18.05.2016. Оpubл. 02.12.2019.
    - Khartert R. Textilniy material, imeyushiy vodoottalkivayushuyu appreturu, i sposob ego polucheniya [Textile material having a water-repellent finish, and the method of its preparation]. Patent RF № 2707937 C2. Declared 18.05.2016. Publ. 02.12.2019. (In Russ.).
  29. Юлдашев Р.И., Мингазов Р. Р. Лабораторные исследования гидрофобизирующей способности кремнийорганических соединений. *Булатовские чтения*, 2019, т. 2, с. 225 – 228.



- Uldashev R.I., Mingazov R.R. Laboratornie issledovaniya gidrofobiziruyushey sposobnosti kremniyorganicheskikh soedineniy [Laboratory studies of the hydrophobic ability of organosilicon compounds]. Bulatovskiye chteniya [Bulatov Readings], 2019, v. 2, pp. 225 – 228. (In Russ.).
- 30. Yanling Tian, Haoyang Li, Meng Wang, Chengjuan Yang, Zhen Yang, Xianping Liu. Insights into the stability of fluorinated super-hydrophobic coating in different corrosive solutions. *Progress in Organic Coatings*, 2021, v. 151, pp. 123 – 125. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106043>
- 31. Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Куш П.П. Фторполимерные композиционные материалы и защитные покрытия для экстремальных условий арктической зоны. *Российский химический журнал*, 2020, т. 64, № 4, с. 20-29. DOI: 10.6060/rcj.2020644.2.
- Kiryukhin D.P., Kichigina G.A., Kushch P.P. Ftorpolimernye kompozicionnye materialy i zashchitnye pokrytiya dlya ekstremal'nyh uslovij arkticheskoy zony [Fluoropolymer composite materials and protective coatings for extreme conditions of the Arctic zone]. *Rossiyskiy himicheskij zhurnal [Russian Chemical Journal]*, 2020, v. 64, no. 4, pp. 20 – 29. (In Russ.).
- 32. Беспалов А.С., Нефедов Н.И., Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Бузник В.М. Особенности гидрофобизации высокопористых керамических материалов с помощью фторолигомеров. *Композиционные материалы*, 2019, № 5(77), с. 41 – 51.
- Bepalov A.S., Nefedov N.I., Deev I.S., Kurshev E.V., Lonskiy S.L., Buznik V.M. Osobennosti gidrofobizacii visokoporistih kerfmicheskikh materialov s pomoshyu ftoroligomerov [Features of hydrophobization of highly porous ceramic materials using fluoroligomers]. *Kompozicionnye materialy [Composite Materials]*, 2019, no. 5(77), pp. 41 – 51. (In Russ.).
- 33. Комаров М.В., Потемин Н.О., Кумеева Т.Ю., Пророкова Н.П. Гидрофобизация полиэфирных волокнистых материалов фторсодержащими полимерами и олигомерами. *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы*, 2020, № 1, с. 192 – 197.
- Komarov M.V., Potemin N.O., Kumeeva T.U., Prokopova N.P. Gidrofobizaciya poliefirnih voloknistih materialov ftorsoderjashimi polimersmi i oligomerami [Hydrophobization of polyester fibrous materials with fluorinated polymers and oligomers]. *Fizika voloknistih materialov: struktura, svoystva, naukoemkie tehnologii i materialy [Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials]*, 2020, no. 1, pp. 192 – 197. (In Russ.).
- 34. Яковец Н.В., Крутько Н.П., Опанасенко О.Н. Определение свободной поверхностной энергии порошкообразных смолисто-асфальтеновых веществ методом Оуэнса-Вендта-Рабея-Каелбле. *Свиридовские чтения*, Минск, БГУ, 2012. с. 253 – 260.
- Jakovec N.V., Krutko N.P., Opanasenko O.N. Opredelenie svobodnoy poverhnastnoy energii poroshkoobraznih smolisto-asfaltenovih veshstv metodom Ouensa-Vendta-Rabelya-Kaelble [Determination of the free surface energy of powdered resinous asphaltene substances by the Owens-Wendt-Rabel-Kaelble method]. *Sviridovskie chteniya [Sviridov Readings]*, Minsk, BGU Publ., 2012, pp. 253 – 260. (In Russ.).

*Статья поступила в редакцию — 08.12.2023 г.  
после доработки — 23.12.2023 г.  
принята к публикации — 24.12.2023 г.*

**Краев Иван Дмитриевич** — ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии науки (119334, Москва, ул. Косыгина, 4), младший научный сотрудник, специалист в области материаловедения. E-mail: kraev-job@mail.ru.

**Истягин Сергей Евгеньевич** — Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ – НИЦ “Курчатовский институт” (432010, Ульяновск, ул. Врача Михайлова, 34), инженер-технолог 2 категории, специалист в области материаловедения. E-mail: fratos19@mail.ru.

**Скляревская Наталья Михайловна** — ФГБ НУ “Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии” (143050, Московская область, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, владение 5), научный сотрудник, специалист в области материаловедения. E-mail: nezevay2@yandex.ru.

**Сурнин Евгений Георгиевич** — ООО Научно-производственная фирма “Авикс”, кандидат технических наук, генеральный директор ООО “Авикс” (399059, Грязи, Липецкая обл., ул. Гагарина, 1а), специалист в области материаловедения. E-mail: [surnin41@yandex.ru](mailto:surnin41@yandex.ru).

**Бибиков Сергей Борисович** — ФГБУН Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии науки (119334, Москва, ул. Косыгина, 4), кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, специалист в области материаловедения. E-mail: [sbb.12@yandex.ru](mailto:sbb.12@yandex.ru).

**Севостьянов Михаил Анатольевич** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Ленинский проспект, 49), кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области титановых сплавов и термической обработки материалов. E-mail: [msevostyanov@imet.ac.ru](mailto:msevostyanov@imet.ac.ru).

---

## Promising nonwoven materials based on heat-resistant fibers for thermal protection

**I. D. Kraev, S. E. Istyagin, N. M. Sklyarevskaya,  
E. G. Surnin, S. B. Bibikov, M. A. Sevostianov**

The work is aimed at conducting research on the physical, mechanical, and thermal properties of new nonwoven materials based on heat-resistant fibers. An analysis of existing nonwoven materials of various fibrous compositions, as well as effective water-repellent compositions, was carried out. A technique has been developed for the production of hydrophobized nonwoven materials using solutions of fluorine-containing latex. The main technical characteristics of the developed material were studied and an experimental batch was manufactured.

**Keywords:** non-woven material, fibrous structure, water-repellent composition, aramid, OPAN, fluorine-containing latex.

---

**Kraev Ivan** — Emanuel Institute of Biochemical Physics of RAS (119334, Moscow, Kosyгина street, b.4), junior researcher, specialist in the field of materials science, [kraev-job@mail.ru](mailto:kraev-job@mail.ru).

**Istyagin Sergey** — Ulyanovsk science-technology center VIAM - National Research Centre “Kurchatov Institute” (432010, Ulyanovsk, Mikhailov st. 34), industrial engineer of the 2nd category, specialist in the field of materials science. E-mail: [fratos19@mail.ru](mailto:fratos19@mail.ru).

**Sklyarevskaya Natalya** — All-Russian Phytopathology Research Institute (143050, Moscow region, Odintsovo district, Bolshie Vyazemy, Institute st., bd. 5), researcher, specialist in the field of materials science. E-mail: [nezevay2@yandex.ru](mailto:nezevay2@yandex.ru).

**Surnin Evgeniy** — Scientific and Production Company “Aviks” Ltd. (399059 Gryazi, Lipetsk reg., Gagarin st, 1a), PhD, general director, specialist in the field of materials science. E-mail: [surnin41@yandex.ru](mailto:surnin41@yandex.ru).

**Bibikov Sergey** — Emanuel Institute of Biochemical Physics of RAS (119334, Moscow, Kosyгина street, b.4), PhD, head of laboratory, specialist in the field of materials science. E-mail: [sbb.12@yandex.ru](mailto:sbb.12@yandex.ru).

**Sevostyanov Mikhail** — Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (119334, Moscow, Leninsky Prospekt, 49), PhD, leading researcher, specialist in the field of titanium alloys and heat treatment of materials. E-mail: [msevostyanov@imet.ac.ru](mailto:msevostyanov@imet.ac.ru).