

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

**ТЕХНОЛОГИЯ  
ТЕКСТИЛЬНОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В ДЕКАБРЕ 1957 ГОДА, ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

**№ 5 (407)  
2023**

*Журнал включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»*

Журнал представлен в Научной электронной библиотеке (НЭБ) и имеет импакт-фактор РИНЦ

Журнал включен в Международные базы данных: SCOPUS и CAS(pt), индексирующие научные издания

Электронный вариант журнала размещен на сайте <http://ttp.ivgpu.com>

Издание Ивановского государственного политехнического университета

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

Главный редактор  
Заместитель главного редактора

*Е.В. РУМЯНЦЕВ (д.х.н., ректор)*  
*Н.Л. КОРНИЛОВА (д.т.н., проф.)*

**Редакционная коллегия (Россия):**

*А.А. БИКБУЛАТОВА (д.т.н., проф.), М.В. БОЛСУНОВСКАЯ (к.т.н., проф.), Н.А. ГРУЗИНЦЕВА (д.т.н., проф.),  
Б.Н. ГУСЕВ (д.т.н., проф.), Т.Р. ДЕБЕРДЕЕВ (д.т.н., проф.), Г.П. ЗАРЕЦКАЯ (д.т.н., проф.),  
Н.Ю. КАЗАКОВА (д.т.н., проф.), Е.Н. КАЛИНИН (д.т.н., проф.), А.М. КИСЕЛЕВ (д.т.н., проф.),  
М.В. КИСЕЛЕВ (д.т.н., проф.), К.И. КОБРАКОВ (д.т.н., проф.), Ж.Ю. КОЙТОВА (д.т.н., проф.),  
А.Р. КОРАБЕЛЬНИКОВ (д.т.н., проф.), В.Е. КУЗЬМИЧЕВ (д.т.н., проф.), Н.А. КУЛИДА (д.т.н., проф.),  
А.Г. МАКАРОВ (д.т.н., проф.), Е.Н. НИКИФОРОВА (д.т.н., проф.), О.И. ОДИНЦОВА (д.т.н., проф.),  
Н.В. ПЕРЕБОРОВА (д.т.н., проф.), А.Б. ПЕТРУХИН (д.э.н., проф.), А.Ф. ПЛЕХАНОВ (д.т.н., проф.),  
Н.П. ПРОРОКОВА (д.т.н., проф.), К.Э. РАЗУМЕЕВ (д.т.н., проф.), Л.В. РЕДИНА (д.т.н., проф.),  
П.Н. РУДОВСКИЙ (д.т.н., проф.), В.Е. РУМЯНЦЕВА (д.т.н., проф.), А.В. СИЛАКОВ (д.э.н., проф.),  
Г.Г. СОКОВА (д.т.н., проф.), Е.Я. СУРЖЕНКО (д.т.н., проф.), М.Н. ТИТОВА (д.э.н., проф.),  
О.В. ТОЛОЧКО (д.т.н., проф.), А.В. ТРУЕВЦЕВ (д.т.н., проф.), А.В. ФИРСОВ (д.т.н., проф.),  
В.В. ХАММАТОВА (д.т.н., проф.), С.Ю. ХАШИРОВА (д.х.н., проф.), С.В. ХЕЙЛО (д.т.н., проф.),  
О.Г. ЦИРКИНА (д.т.н., проф.), Ю.С. ШУСТОВ (д.т.н., проф.), С.С. ЮХИН (д.т.н., проф.)*

**Международная редакционная коллегия:**

*ADOLPHE С. DOMINIQUE (д.т.н., Франция), GERŠAK JELKA (д.т.н., Словения), UDVAL LODOI (д.т.н., Монголия),  
Е.В. ВАНКЕВИЧ (д.э.н., Беларусь), А.А. КУЗНЕЦОВ (д.т.н., Беларусь), С.В. ЛОМОВ (д.т.н., Бельгия),  
Д.Б. РЫКЛИН (д.т.н., Беларусь), С.Ш. ТАШПУЛАТОВ (д.т.н., Узбекистан), Н.Н. ЯСИНСКАЯ (д.т.н., Беларусь)*

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

*В.С. БЕЛГОРОДСКИЙ (д.с.н., проф.), А.В. ДЕМИДОВ (д.т.н., проф.),  
А.Р. НАУМОВ (д.х.н., проф.), М.Г. БАЛЫХИН (д.э.н., проф.)*

Ответственный секретарь *Е.Н. КАЛИНИН*

*Адрес редакции: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21.  
Тел.: (4932) 41-75-02.  
E-mail: [ttp@ivgpi.ru](mailto:ttp@ivgpi.ru)  
<http://ttp.ivgpi.ru>*

---

Издание зарегистрировано в Министерстве печати РФ. Регистрационный №796.  
Сдано в набор 02.10.2023. Подписано в печать 31.10.2023. Формат 60x84 1/8.  
Усл. печ. л. 30,23. Заказ 6021. Тираж 400 экз.

---

«Известия вузов. Технология текстильной промышленности»  
Издание Ивановского государственного политехнического университета  
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21  
E-mail: [ttp@ivgpi.ru](mailto:ttp@ivgpi.ru)

Издательско-полиграфический комплекс «ПресСто»  
153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8  
Тел. 8-930-330-26-30  
E-mail: [pressto@mail.ru](mailto:pressto@mail.ru)

Ministry of Science and Higher Education  
of Russian Federation

PROCEEDINGS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**TEXTILE  
INDUSTRY  
TECHNOLOGY**

Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti

PEER-REVIEWED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

ESTABLISHED IN DECEMBER OF 1957, 6 ISSUES PER YEAR

**№ 5 (407)  
2023**

*The journal is included in the «List of the leading peer-reviewed journals and publications issued in the Russian Federation, in which the major scientific results of dissertations for the degrees of doctor and candidate of sciences should be published»*

The journal is presented  
in the Scientific Electronic Library  
and has an RSCI impact factor

The journal is included  
in the Scopus and CAS(pt)  
bibliographic databases

The on-line version  
of the journal is available at  
<http://ttp.ivgpu.com>

Published by Ivanovo State Polytechnical University

**EDITORIAL BOARD**

**Chief editor**

*E.V. RUMYANTSEV (d.ch.s., rector)*

**Deputy of chief editor**

*N.L. KORNILOVA (d.en.s., prof.)*

**Editorial board (Russia):**

*A.A. BIKBULATOVA (d.en.s., prof.), M.V. BOLSUNOVSKAYA (k.en.s., prof.), N.A. GRUZINTSEVA (k.en.s., prof.), B.N. GUSEV (d.en.s., prof.), T.R. DEBERDEEV (d.en.s., prof.), G.P. ZARETSKAYA (d.en.s., prof.), N.Yu. KAZAKOVA (d.en.s., prof.), E.N. KALININ (d.en.s., prof.), A.M. KISELEV (d.en.s., prof.), M.V. KISELEV (d.en.s., prof.), K.I. KOBRAKOV (d.en.s., prof.), Zh.Yu. KOYTOVA (d.en.s., prof.), A.R. KORABELNIKOV (d.en.s., prof.), V.E. KUZMICHEV (d.en.s., prof.), N.A. KULIDA (d.en.s., prof.), A.G. MAKAROV (d.en.s., prof.), E.N. NIKIFOROVA (d.en.s., prof.), O.I. ODINTSOVA (d.en.s., prof.), N.V. PEREBOROVA (d.en.s., prof.), A.B. PETRUKHIN (d.ec.s., prof.), A.F. PLEKHANOV (d.en.s., prof.), N.P. PROROKOVA (d.en.s., prof.), K.E. RAZUMEEV (d.en.s., prof.), L.V. REDINA (d.en.s., prof.), P.N. RUDOVSKY (d.en.s., prof.), V.E. RUMYANTSEVA (d.en.s., prof.), A.V. SILAKOV (d.ec.s., prof.), N.A. G.G. SOKOVA (d.en.s., prof.), E.Ya. SURZHENKO (d.en.s., prof.), M.N. TITOVA (d.ec.s., prof.), O.V. TOLOCHKO (d.en.s., prof.), A.V. TRUEVTSEV (d.en.s., prof.), A.V. FIRSOV (d.en.s., prof.), V.V. KHAMMATOVA (d.en.s., prof.), S.Yu. KHASHIROVA (d.ch.s., prof.), S.V. KHEYLO (d.en.s., prof.), O.G. TSIRKINA (d.en.s., prof.), Yu.S. SHUSTOV (d.en.s., prof.), S.S. YUKHIN (d.en.s., prof.)*

**International editorial board:**

*ADOLPHE C. DOMINIQUE (d.en.s., France), GERŠAK JELKA (d.en.s., Sloveniya), UDVAL LODOI (d.en.s., Mongoliya), E.V. VANKEVICH (d.ec.s., Belarus), A.A. KUZNETSOV (d.en.s., Belarus), S.V. LOMOV (d.en.s., Belgium), D.B. RYKLIN (d.en.s., Belarus), S.Sh. TASHPULATOV (d.en.s., Uzbekistan), N.N. YASINSKAYA (d.en.s., Belarus)*

**EDITORIAL COUNCIL**

*V.S. BELGORODSKY (d.soc.s., prof.), A.V. DEMIDOV (d.en.s., prof.),  
A.R. NAUMOV (d.ch.s., prof.), M.G. BALYKHIN (d.ec.s., prof.)*

Executive secretary *E.N. KALININ*

*Address: 153000, Ivanovo, Sheremetev av., 21.  
Tel.: +7(4932)41-75-02.  
E-mail: [ttp@ivgpu.ru](mailto:ttp@ivgpu.ru)  
<http://ttp.ivgpu.ru>*

---

Registered with the Ministry of Printing of Russian Federation. Registration no. 796.  
Passed for typesetting on 02.10.2023. Signed for printing on 31.10.2023. Format 60×84 1/8.  
30.23 conventional sheets. Order 6021. Circulation of 400.

---

«Proceedings of higher education institutions. Textile Industry Technology»  
Published by Ivanovo State Polytechnical University  
153000, Ivanovo, Sheremetev av., 21  
E-mail: [ttp@ivgpu.ru](mailto:ttp@ivgpu.ru)

Publishing-printing complex «PresSto»  
153025, Ivanovo, Dzerzhinskogo, 39, building 8  
Tel. 8-930-330-26-30  
E-mail: [pressto@mail.ru](mailto:pressto@mail.ru)

УДК 691: 624.001

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_5

**ПОЛИЭФИРКЕТОНКЕТОН И КОМПОЗИТЫ НА ЕГО ОСНОВЕ (ОБЗОР)\***

**POLYETHERKETONKETONE AND COMPOSITES BASED ON IT (REVIEW)**

*Ж.И. КУРДАНОВА<sup>1,2</sup>, К.Т. ШАХМУРЗОВА<sup>1,2</sup>, А.А. ЖАНСИТОВ<sup>1,2</sup>, И.Н. ФОМИЧЕВА<sup>1</sup>, С.Ю. ХАШИРОВА<sup>1,2</sup>*

*ZH.I. KURDANOVA<sup>1,2</sup>, K.T. SHAKHMURZOVA<sup>1,2</sup>, A.A. ZHANSITOV<sup>1,2</sup>, I.N. FOMICHEVA<sup>1</sup>,  
S.Yu. KHASHIROVA<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Тулский государственный университет,

<sup>2</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова)

<sup>1</sup>Tula State University,

<sup>2</sup>Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov)

E-mail: kurdanova09@mail.ru, shahmurzova.kamila@yandex.ru, azamat-z@mail.ru, new\_kompozit@mail.ru

*Обобщены литературные сведения по методам получения и свойствам композиционных материалов на основе полиэфиркетонкетонов. Приведены примеры использования полиэфиркетонкетонов в различных отраслях промышленности. Рассмотрены основные промышленные марки ПЭКК, описаны их свойства и механизмы кристаллизации. Особое внимание уделено волокнистым композитам на основе ПЭКК. Показана возможность получения полых волокон растворной технологией для изготовления фильтрационных мембран. Обсуждены способы получения композиционных материалов на основе полиэфиркетонкетонов промышленных марок и стекло- и углеволокон. Показаны результаты влияния углеродных волокон на кристаллическую морфологию в композитах. Рассмотрено влияние на механические свойства композитов способа укладки волокон и способов обработки композитов. Рассмотрены способы улучшения адгезии между волокном и полимерной матрицей. Показана возможность применения полиэфиркетонкетонов в качестве связующего для получения угленасыщенных композитов.*

*Literary information on methods of production and properties of composite materials based on polyetherketoneketones is summarized. Examples of the use of polyetherketoneketones in various industries are given. The main industrial grades of PEKK are considered, their properties and crystallization mechanisms are described. Particular attention is paid to fiber composites based on PEKK. The possibility of producing hollow fibers using solution technology for the manufacture of filtration membranes has been demonstrated. Methods for producing composite materials based on industrial grade polyetherketoneketones and glass and carbon fibers*

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и инновациям Тульской области в рамках договора № 10 от 09.07.2022 «Разработка высокоэффективной импортозамещающей технологии производства высокотехнологичного полиэфиркетонкетона с длительным сроком службы».

*are discussed. The results of the influence of carbon fibers on crystalline morphology in composites are shown. The influence of the method of laying fibers and methods of processing composites on the mechanical properties of composites is considered. Methods for improving adhesion between the fiber and the polymer matrix are taken into consideration. The possibility of using polyetherketoneketones as a binder for the production of carbon-filled composites has been demonstrated.*

**Ключевые слова:** полиэфиркетонкетон, ацилирование, кислота Льюиса, диспергатор, термические свойства, реологические свойства.

**Keywords:** polyether ketone ketone, acylation, Lewis acid, dispersant, thermal properties, rheological properties.

### *Введение*

Трендовым направлением развития химии и технологии высокомолекулярных соединений является создание полимеров и материалов на их основе с повышенной тепло-, термо- и хемостойкостью, предназначенных для работы в агрессивных средах, в условиях повышенных механических нагрузок и высоких температур [1-4]. Среди тепло- и термостойких полимеров особое место занимают полиарилэфиркетоны различного химического строения: полиэфиркетоны, полиэфирэфиркетоны, полиэфиркетонкетоны и др. [5].

Полиэфиркетонкетон (ПЭКК) представляет собой высокотемпературный полукристаллический термопласт, обладающий высокой термостойкостью, химической стойкостью и способностью выдерживать высокие механические нагрузки. ПЭКК широко используется в химической и автомобильной промышленности для производства конструкционных компонентов, включая зубчатые колеса, мелкие прецизионные (вращательные) детали, втулки, валы, изнашиваемые пластины, уплотнения шаровых кранов, подшипники скольжения. ПЭКК благодаря устойчивости к стерилизации, инертности и выдающейся химической стойкости широко используется в медицинских целях и для изготовления изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, таких, как имплантаты, кухонная посуда и стоматологические инструменты, а также перспективен для изготовления нанопермембран [6].

Преимуществами ПЭКК перед другими пластиками являются:

- температура непрерывного использования 250 – 260 °С, кратковременное воздействие до 300 °С;

- очень высокая жесткость, прочность на растяжение и сжатие, ударопрочность;

- превосходные свойства сопротивления горению, низкий уровень образования дыма;

- устойчивость практически ко всем органическим и неорганическим химическим веществам (чувствительность только к очень агрессивным реагентам, таким, как концентрированная серная и азотная кислота, метилхлорид);

- высокая диэлектрическая прочность, обеспечивающая хорошие изоляционные свойства;

- высокое напряжение пробоя;

- высокие барьерные свойства (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и т. д.);

- превосходный контроль скорости износа и коэффициента трения.

ПЭКК является прекрасным материалом для создания композиционных материалов благодаря возможности регулирования технологичности матрицы за счет варьирования в структуре изофталойлхлоридных звеньев.

### *Основное содержание*

На сегодняшний день основными производителями ПЭКК являются: Arkema (Франция), Rallis (Индия), RTP Company (США), Shandong Kaisheng New Materials Co., Ltd (Китай), Polymics, Ltd (США), Solvay (Бельгия), Oxford Performance Materials (США) [7].

Основные марки ПЭКК, выпускаемые Arkema, Kepstan® РЕКК с различным соотношением изомерных звеньев терефтало-

илхлорида (Т) и изофталоилхлорида (I) и угле- и стеклонаполненные композиты на их основе, а именно:

- РЕКК Kepstan® 8000 (Т/І 80/20): выпускается в виде порошка, гранул, применяется для экструзии и литья под давлением;

- РЕКК Kepstan® 7000 (Т/І 70/30): выпускается в виде порошка, гранул, применяется для изготовления пленок методом экструзии, SLS и нитей для 3D-печати методом FDM;

- РЕКК Kepstan® 6000 (Т/І 60/40): выпускается в виде порошка, гранул, применяется для изготовления пленок методом экструзии, термоформования, для изготовления 3D-нитей для печати методом FDM;

- РЕКК-GF30 Kepstan® 6010G30 – стеклонаполненная марка (30% стекловолокна): выпускается в виде гранул, применяется для экструзии и литья под давлением;

- РЕКК-CF30 Kepstan® 8010C30 – угле-наполненная марка (30 % углеволокна): выпускается в виде гранул, применяется для экструзии и литья под давлением;

- РЕКК-CF40 Kepstan® 8010C40 – угле-наполненная марка (40 % углеволокна): выпускается в виде гранул, применяется для экструзии и литья под давлением;

- РЕКК-GF30 Kepstan® 8010G30 – стеклонаполненная марка (30 % стекловолокна): выпускается в виде гранул, применяется для экструзии и литья под давлением;

- РЕКК-GF40 Kepstan® 8010G40 – стеклонаполненная марка (40 % стекловолокна): выпускается в виде гранул, применяется для экструзии и литья под давлением.

Свойства некоторых промышленных марок Kepstan® РЕКК приведены в табл. 1 [8].

Т а б л и ц а 1

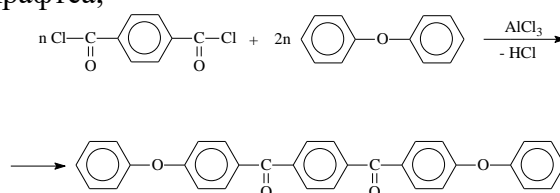
Свойства	Kepstan® 8000	Kepstan® 7000	Kepstan® 6000	Kepstan® 6010G30	Kepstan® 8010C30
Модуль упругости при растяжении, МПа	3800	3800	2900	11 000	24 300
Модуль упругости при изгибе, МПа	3900	3900	3000	10800	-
Температура плавления, 10°С/мин, °С	357	331	302	302	360
Удлинение при разрыве, %	30	20	50	2,5	1,5
Температура стеклования, 10 °С/мин	165	162	160	160	165
Кислородный индекс, %	35	35	38	38	-
Удельное объемное сопротивление, Ом*см	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>5</sup>
Показатель текучести расплава, ПТР, см <sup>3</sup> /10мин (380 °С, 5 кг)	15	35	35	12	18
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,29	1,29	1,27	1,5	1,39
Водопоглощение, %	0,5	0,5	0,6	0,4	0,4

ПЭКК, имеющий полностью *n*-фениленовые связи, полученный из дифенилоксида и терефталоилхлорида, имеет слишком высокую температуру плавления (384 °С) из-за высокой регулярности и жесткости цепи, что затрудняет его переработку [9, 10]. Кроме того, высокая вязкость расплава и очень плохая текучесть приводят к трудностям в производстве композитов, армированных непрерывным волокном [11-13]. Для решения данной проблемы в структуру ПЭКК были введены *m*-фениленовые связи (изофталоилхлорид), что вызвало заметное снижение температуры плавления и повысило технологичность полимера. Поэтому промышленные марки ПЭКК – это сополимеры на основе терефталоилхлорида

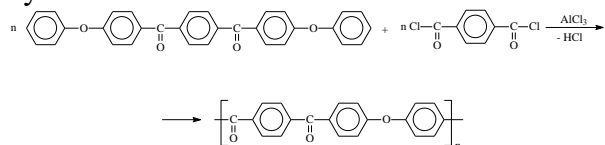
(Т) и изофталоилхлорида (I) с их различным соотношением.

Традиционным методом синтеза ПЭКК является электрофильное замещение по реакции Фриделя-Крафтса [14-20], протекающее в две стадии:

- на первой стадии получают 4-(феноксibenзоил)бензол взаимодействием хлорангидрида терефталевой кислоты с дифениловым эфиром в 1,2-дихлорбензоле в присутствии катализаторов Фриделя-Крафтса;



- на второй стадии 4-(феноксibenзоил)бензол взаимодействует с хлорангидридом терефталевой и/или изофталевой кислоты с образованием высокомолекулярного полимера. При этом в процессе синтеза полимер осаждается из раствора на ранней стадии и продолжает полимеризоваться в суспензии:



Понимание структуры кристаллизации является основополагающим при создании композиционных материалов и для применения в аддитивных технологиях.

Как и другие ПАЭК, сополимеры ПЭКК кристаллизуются с двухцепочечной орторомбической элементарной ячейкой – «форма I» [21]. В дополнение к форме I в зависимости от условий кристаллизации и соотношения Т/І ПЭКК может кристаллизоваться с двумя дополнительными формами, называемыми формой II и III [21-26]. Форма II была идентифицирована по рентгеновским измерениям с появлением дополнительного пика (020) при  $2\theta=16^\circ$  и индексируется одной или двухцепочечной орторомбической решеткой. Способность образовывать вторую кристаллическую фазу значительно благоприятствует высокой жесткости цепи и низкой молекулярной подвижности. Сополимеры ПЭКК имеют высокое соотношение кетоновых связей, что увеличивает жесткость молекулы и способствует появлению формы II. Точнее, кетоновые связи имеют высокие энергетические барьеры вращательной конформации, которые повышают жесткость цепи. Появление формы II для ПЭКК тесно связано с условиями кристаллизации и соотношением Т/І. Форма II проявляется при высоком отношении Т/І. Фактически, как кетоновые связи, терефталоиловые соединения имеют высокую жесткость цепи, способствующую появлению формы II. Появление формы II, по-видимому, усиливается при кристаллизации из растворителя или в условиях кристаллизации с низкой подвижностью, таких, как холодная кристаллизация, тогда как форма I наблюдается только

при кристаллизации из состояния плавления, соответствующего кристаллизации с высокой подвижностью цепи. В дополнение к формам I и II в литературе [27] сообщалось о промежуточной морфологии, называемой формой III. Эта дочерняя форма наблюдалась при высоких температурах отжига и предположительно соответствовала процессу рекристаллизации формы II в более стабильную форму.

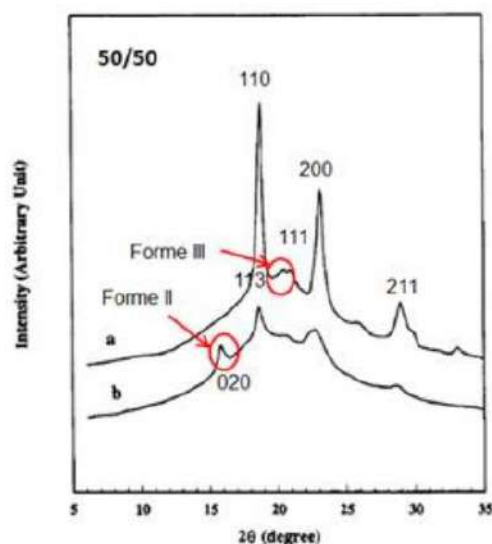


Рис. 1

В работах [27, 28] изучены механизмы изотермической кристаллизации ПЭКК. После отжига наблюдалась дополнительная эндотерма во время плавления, которая возникла при температуре примерно на  $10^\circ\text{C}$  выше температуры отжига. Эта дополнительная эндотерма объясняется плавлением вторичной кристаллизации, связанной с ростом межламеллярной кристаллической структуры внутри ламелей. Вторичная кристаллизация появляется после длительного отжига или медленного охлаждения. Как и большинство термопластичных полимеров, ПЭКК кристаллизуется со сферолитическим ростом путем наложения цепей и отложений (рис. 2). Кристаллические ламели разделены аморфной зоной, включающей концы цепей, участки цепей, принадлежащие двум соседним кристаллическим ламелям, и запутанные сегменты цепей. Толщина ламелей зависит от условий кристаллизации.



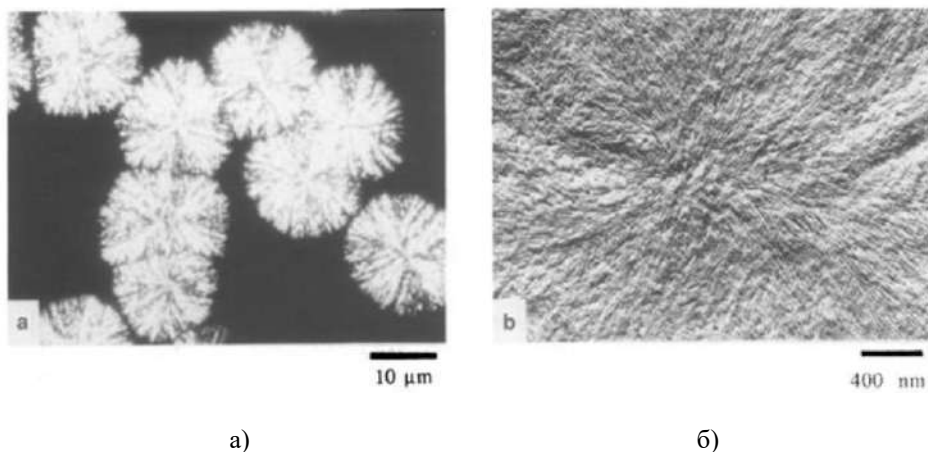


Рис. 2

Благодаря возможности регулирования степени кристалличности ПЭКК является перспективным материалом для изготовления волокон [29]. Прочность, жесткость/гибкость и другие механические, термические, термомеханические свойства волокон и тканей можно варьировать по желанию путем регулирования кристалличности ПЭКК, тем самым избегая необходимости смешивания с другими полимерами или пластификаторами, которые могут привести к проблемам разделения фаз. Кроме того, волокна из полиэфиркетонкетона демонстрируют исключительно хорошую стабильность размеров и низкую ползучесть при повышенных температурах, обладают высокой устойчивостью к обычным органическим растворителям и низким влагопоглощением [29]. Также перспективным направлением применения ПЭКК является изготовление наночистратационных мембран из полых волокон растворным методом электропрядения. Единственным отходом в этом процессе является разбавленный водный раствор кислоты, менее токсичный, чем обычные органические растворители, используемые при растворении полимеров. Основным препятствием при прядении волокон из РЕКК является солубилизация, которая в основном проводится в кислоте, и в долгосрочной перспективе существует риск коррозии фильер, традиционно изготавливаемых из нержавеющей стали. Авторы [30] в своей работе нашли решение проблемы коррозии фильеры. Они изготовили устойчивые к растворителям фильеры с ис-

пользованием технологий 3D-печати методом стереолитографии. Полые волокна из РЕКК 8002 PL Kerstan® были изготовлены методом фазового разделения, индуцированного нерастворителем (водой). Морфология полученных волокон в зависимости от скорости потока жидкости приведена на рис. 3: (a–b) – 2 мл/мин, 2 об/мин; (c–d) – 3 мл/мин, 2 об/мин; (e–f) – 3 мл/мин, 3 об/мин; (g–h) – 4 мл/мин, 3 об/мин.

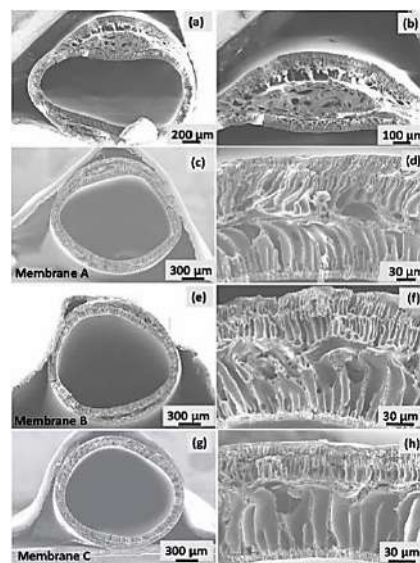


Рис. 3

По мере увеличения скорости потока буровой жидкости волокна становились полностью однородными и симметричными. Мембрана показала превосходную химическую и термическую стабильность в форме полых волокон с характеристиками в диапазоне наночистратации.

В другой работе [31] авторы предлагают способ изготовления пористых мембран из промышленной марки РЕКК 8002 PL Kerstan® с использованием N-метил-2-пирролидона в качестве растворителя при комнатной температуре методом электро-

прядения. ПЭКК был предварительно модифицирован с получением растворимых дитиолоновых производных. Схематично процесс изготовления волокон приведен на рис. 4.



Рис. 4

Мембраны, полученные таким способом, также продемонстрировали химическую и термическую стабильность и эффективность в диапазоне нанофильтрации с растворами диметилформамида.

Следующим активно развивающимся направлением в области применения ПЭКК является создание высокоэффективных композитов на основе стекло- и углеродных волокон, которые находят применение в аэрокосмической и авиационной промышленности [32].

В работе [33] изучены композиты на основе ПЭКК промышленных марок Arkema РЕКК 6002 (50 масс. % ПЭКК и 50 масс. % углеродных волокон) и Arkema РЕКК 7002 (34 масс. % ПЭКК и 66 масс. % углеродных волокон). Композиты представляли собой препреги из непрерывных углеродных волокон, пропитанных ПЭКК.

Влияние углеродных волокон на кристаллическую морфологию исследовали с помощью оптической микроскопии. На рис. 5 показан рост кристаллов смолы РЕКК 6002, кристаллизованной из расплава при 270 °С в течение 2 часов в присутствии углеродного волокна. Наблюдались две различные кристаллические фазы. Первая соответствует объемной кристаллизации матрицы со сферолитическими кристаллическими образованиями, вторая – так называемой транскристаллической фазе [34-36], возникающей на поверхности волокон и растущей перпендикулярно им. Фактически углеродные волокна действовали, как зародыши, из которых выросли кристаллические объекты.

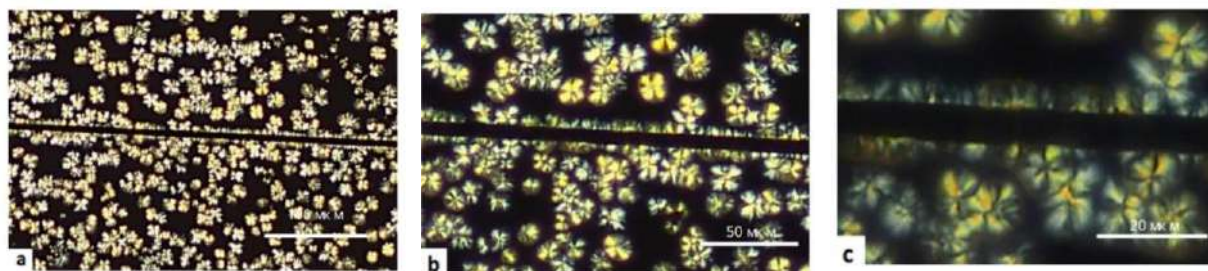


Рис. 5

Влияние углеродных волокон на механические свойства исследовали путем изготовления композиционных пластин из препрегов РЕКК 6002 и 7002 с разной ориентацией углеродных волокон при различных термических режимах (рис. 6). Поскольку испытание на растяжение однонаправленных композитов дает информацию в основном о механических свойствах волокна, тогда как испытание композитов под углом  $\pm 45^\circ$  дает больше информации о матрице,

были изготовлены пластины двух типов: однонаправленные 8-слойные пластины толщиной 1 мм и 16-слойные пластины  $\pm 45^\circ$  толщиной 2 мм. Для изготовления композитов под углом  $\pm 45^\circ$  ленты-препреги сначала разрезали прямо или под углом 45 градусов, сваривали кромку к кромке и снова отрезали до размеров пластины  $200 \times 300 \text{ мм}^2$ , после чего слои укладывались друг на друга.



Рис. 6

Для изготовления композитных пластин с полностью кристаллизованной матрицей, аморфной матрицей, высокотемпературной и низкотемпературной кристаллизованной матрицей, соответствующей потенциально высокому и низкому количеству транскристаллической фазы, были протестированы пять различных тепловых режимов обработки соответственно. Поскольку матрица РЕКК 7002 кристаллизуется очень быстро, были изготовлены только композиты с полностью закристаллизованной матрицей. Композитные пластины изготавливались двумя разными способами: автоклавированием и прессованием. Использование пресса связано с возможностью быстрого охлаждения композита после консолидации до  $20 \text{ }^\circ\text{C мин}^{-1}$ , что позволяет получать композиты РЕКК 6002 с аморфной матрицей. Автоклав использовался для кристаллизации матрицы при высокой температуре

из-за значительного перегрева пресса. Для кристаллизации из расплава при  $260 \text{ }^\circ\text{C}$  во время охлаждения температура пресса снижалась до  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ , а затем повышалась до  $260 \text{ }^\circ\text{C}$  для достижения заданной температуры. Кинетика кристаллизации РЕКК 6002 является наиболее важной при  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому можно быть уверенным, что полимер начнет кристаллизоваться до стабилизации при  $260 \text{ }^\circ\text{C}$ . Все композитные пластины, изготовленные с помощью автоклава и пресса, уплотнялись при давлении  $0,7 \text{ МПа}$ .

Результаты измерения модуля упругости полностью закристаллизованных композитов РЕКК 6002 и 7002, изготовленных в автоклаве и прессованием, испытанных при комнатной температуре и при  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  (выше температуры стеклования обеих матриц), представлены в табл. 2.

Таблица 2

Температура	Композит РЕКК 7002		Композит РЕКК 6002	
	Комнатная	$180 \text{ }^\circ\text{C}$	Комнатная	$180 \text{ }^\circ\text{C}$
Однонаправленные композиты ПЭКК (автоклав)				
Модуль упругости, ГПа	115	97	113	83
16-слойные пластины $\pm 45^\circ$ (прессование)				
Модуль упругости, ГПа	17,8	1,2	17,3	1,7
Модуль сдвига, ГПа	4,6	0,33	5,1	0,49
16-слойные пластины $\pm 45^\circ$ (автоклав)				
Модуль упругости, ГПа	17,9	1,64	16,5	1,9
Модуль сдвига, ГПа	4,4	0,39	5,6	0,53

Из табл. 2 видно падение модуля упругости при испытаниях на растяжение выше температуры стеклования примерно на 27 % для композитов РЕКК 6002 и на 16 % для композитов РЕКК 7002, тогда как направление растяжения при испытании такое же, как и у углеродных волокон. Это доказывает то, что даже для однонаправленного композита механические свойства зависят от свойств матрицы. Модуль упругости композитов РЕКК 7002, по-видимому, выше, чем у композитов РЕКК 6002, что связано с большей кристалличностью РЕКК 7002. Кроме того, можно заметить, что снижение модуля упругости больше, чем для однонаправленных композитов. Это подтверждает тот факт, что механические свойства композита  $\pm 45^\circ$  более чувствительны к свойствам матрицы, чем у однонаправленных композитов, которые в большей степени зависят от свойств волокна. При комнатной температуре модуль упругости и модуль сдвига уменьшаются примерно на 11 % и 28 % соответственно для квазиаморфного композита РЕКК 6002 по сравнению с полностью закристаллизованным композитом РЕКК 6002. При  $180^\circ\text{C}$  это явление становится гораздо более важным при уменьшении на 80 % и 90 % модуля упругости и модуля сдвига соответственно. Отсюда можно сделать вывод, что даже для композитов ПЭКК, армированных углеродными волокнами, кристалличность матрицы играет очень важную роль.

При сравнении образцов из 16-слойных пластин  $\pm 45^\circ$ , полученных автоклавированием и прессованием, видно, что при  $180^\circ\text{C}$  разница составляет 27 % и 11 % для модуля упругости и 15 % и 8 % для модуля сдвига для композита РЕКК 7002 и 6002 соответственно. Это может быть связано с тем, что пластины пресса не идеально параллельны, что создает неравномерное давление на композит во время консолидации, тогда как в автоклаве давление равномерно по всей поверхности композита. Благодаря этому исследованию стало возможным прогнозировать кристалличность и связан-

ные с ней механические свойства композитов ПЭКК в зависимости от любых условий термической обработки с учетом влияния потенциальных макромолекулярных изменений при высоких температурах.

Используемые в качестве высокоэффективного наполнителя углеродные нанотрубки (УНТ) могут усиливать межфазную адгезию между полимерной матрицей и волокном [37]. Добавление небольшого количества УНТ позволяет значительно улучшить свойства материала [38-41]. Диспергирование УНТ в композитной системе в основном включает диспергирование УНТ в матрицу [42] и введение УНТ между слоями. УНТ равномерно диспергируют в матрице с помощью сухого измельчения (например, шаровой мельницы) или механического перемешивания в суспензии и ультразвуке, затем смесь нагревают, чтобы расплавить полимерную матрицу и покрыть ею волокна.

В работе [43] описаны препреговые ленты УНТ/УВ/ПЭКК, изготовленные методом влажной порошковой пропитки. УНТ и диспергатор поливинилпирролидон (ПВП) сначала диспергировали в абсолютном этаноле с помощью ультразвука, затем добавляли порошок ПЭКК и продолжали механическое диспергирование в течение 4 часов. Приготовленную суспензию перенесли в погружной бак и протягивали через него УВ для пропитки полимером. После плавления и пластификации были получены ленты препрега УНТ/УВ/ПЭКК.

В работе [44] из препреговых лент УНТ/УВ/ПЭКК были получены ламинаты, в которых распределение полимерной матрицы и волокна более равномерное и с меньшей пористостью, чем в препрегах. Ламинаты получали прессованием при давлении 2 МПа и температуре  $340^\circ\text{C}$  в течение 15 минут, затем форму охлаждали до комнатной температуры и извлекали из нее ламинат. На рис. 7 показаны кривые «напряжения–деформации» при изгибе ламинатов с различным содержанием УНТ при содержании УВ 65 мас. %.

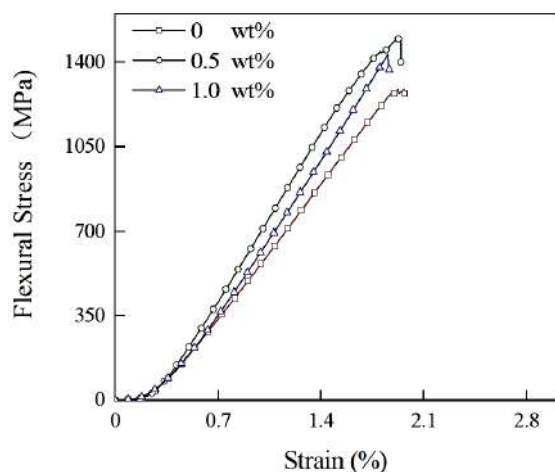


Рис. 7

Как видно из рис. 7, прочность на изгиб и модуль упругости ламинатов увеличиваются, а затем уменьшаются с увеличением содержания УНТ. Прочность на изгиб достигает максимума 1494 МПа при содержании УНТ 0,5 масс. %. По сравнению с ламинатом без добавления УНТ прочность на изгиб увеличилась на 15,99 %. Это указывает на то, что УНТ служит связующим между слоями ламината и увеличивает прочность связи между слоями. Когда содержание УНТ достигает 1,0 масс. %, прочность на изгиб и модуль упругости ламината имеют тенденцию к снижению. Это связано с тем, что излишки УНТ агломерируются внутри материала и распределяются неравномерно. Кроме того, было доказано, что чем выше содержание УНТ, тем лучше электропроводность, теплопроводность материала и тем выше скорость кристаллизации ПЭКК. При введении 0,5 масс.

% УНТ кристалличность ПЭКК имеет максимум, а при увеличении содержания УНТ до 1,0 масс. % кристалличность ПЭКК снижается.

Резюмируя проведенные исследования, можно сделать вывод о том, что ламинат с содержанием 0,5 масс. % имеет большой потенциал для применения в авиакосмической промышленности, обладая оптимальным комплексом свойств.

В работе [45] исследованы композиты на основе ПЭКК марки Kerstan-6003 PL Arkema и стеклоткани. Препреги СВ/ПЭКК изготавливались следующим образом. Стеклоткань разрезалась на квадратные листы (250 мм × 250 мм) и взвешивалась на весах. Затем клей (универсальный спрей 3М) равномерно распылялся на ткань, и производилось повторное взвешивание. Клей служил временным связующим для удержания порошка ПЭКК на стеклоткани. После этого ткань погружалась в порошок ПЭКК, помещалась под гидравлический пресс и нагревалась до 330 °С при давлении 0,6 МПа в течение 10 мин. Композитные ламинаты изготавливались путем укладки слоев препрега (толщиной 0,12 мм) в форму. Полученную стопку затем нагревали до температуры 330 °С со скоростью 5 °С/минуту. Ламинаты с размерами (125 мм×125 мм) и (250 мм×62,5 мм) уплотняли под давлением 0,3 МПа в течение 30 мин. После охлаждения давление сбрасывали, ламинаты извлекались из формы и проверялись на наличие дефектов. Ламинаты изготавливались на основе различных массовых процентов ПЭКК.

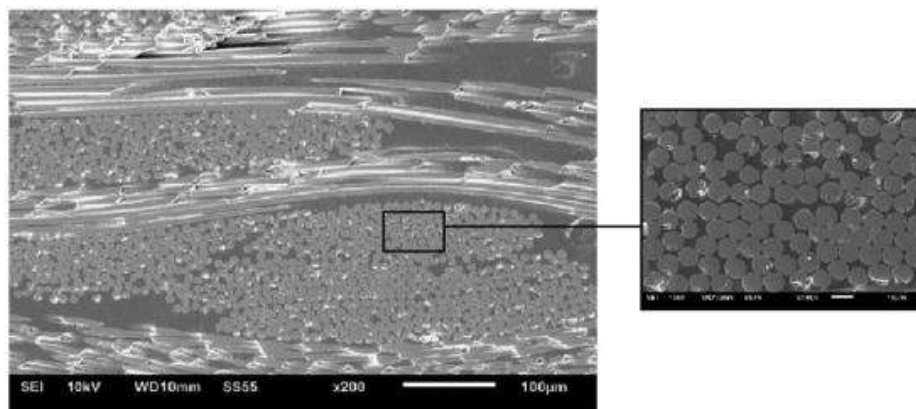


Рис. 8

Для оценки влияния толщины образца на предел прочности при растяжении ламинатов СВ/ПЭКК изготовлены 4-, 8-, 12- и 16-слойные образцы различной толщины. Перед проведением механических испытаний несколько образцов были разрезаны, отполированы и исследованы под оптическим микроскопом для изучения их микроструктуры и распределения волокон в их поперечных сечениях. На рис. 8 представлена микрофотография 4-слойного СВ/ПЭКК с оптимальным содержанием ПЭКК (т. е. 0,4 или 40 масс. %), где видно, что стекловолокно полностью пропитано полимером ПЭКК.

Полученные экспериментальные данные показали, что прочность на растяжение ламинатов СВ/ПЭКК не зависит от толщины образца или количества слоев, при этом прочность на растяжение составляет порядка 300 МПа, что доказывает потен-

циал таких композитов с термопластичной матрицей для использования в аэрокосмических приложениях.

Для снижения стоимости и сохранения механических свойств получены и изучены трехкомпонентные композиты на основе ПЭКК, стекловолокна и слюды 9 [46]. Стекловолокна представляют собой рубленые пряди, имеющие длину 3-6 мм. Перед использованием слюда и СВ были покрыты раствором сульфированного ПЭКК в диметилформамиде. Слюда и стекловолокно предварительно измельчались. ПЭКК и наполнители смешивались на смесителе. Затем смесь прессовали при 165 °С в формах в виде листов. Образцы нагревали до 350 °С в течение нескольких минут и погружали в ледяную воду. Результаты исследования механических свойств приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Состав	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Удлинение, %
ПЭКК/УВ			
100:0	4,20	102,0	62,1
95:5	5,64	130,2	51,0
90:10	8,45	175,4	40,1
80:20	12,57	200,3	18,3
70:30	13,53	215,1	7,5
60:40	13,94	195,6	3,2
ПЭКК/УВ/слюда			
70:25:5	14,08	220,9	6,0
70:20:10	14,85	230,2	6,7
70:15:15	16,08	235,5	7,1
70:10:20	16,89	22,1	5,2
70:5:25	17,25	210,3	4,8
70:0:30	18,14	180,4	4,0

С увеличением содержания СВ в материалах увеличивался модуль упругости при растяжении, уменьшалось предельное удлинение, а предел прочности при растяжении достигал максимального значения при массовой доле СВ  $\geq 30$  %. Поскольку композиты, содержащие 30 масс. % СВ, продемонстрировали самую высокую прочность на растяжение, общее содержание наполнителя в композитах впоследствии поддерживалось на постоянном уровне 30 масс. %, а слюда использовалась для постепенной замены СВ (табл. 3). Модуль упругости композитов возрастал по мере замены

СВ слюдой, которая имеет более высокий модуль, чем СВ. Интересно, что самая высокая прочность на растяжение и предельное удлинение получены в точке, где 50 масс. % СВ заменено слюдой.

На свойства полимерных композитов влияет множество факторов, таких, как свойства и распределение наполнителей, морфология системы и характер границы раздела фаз. В целом композиты, содержащие два и более наполнителя, из-за наличия больших пустот и неоднородного распределения наполнителей в системе проявляют пониженные механические свойства по

сравнению с композитами, содержащими однокомпонентные наполнители. Улучшение механических свойств в этом случае может быть объяснено тем, что СВ и слюда по-разному склонны двигаться и ориентироваться в процессе смешения расплавов, а мелкозернистые частицы способны располагаться среди крупных частиц, облегчая течение расплава.

В работе [47] показано, что ПЭКК может быть использован в качестве связующего для увеличения межфазной адгезии между полиэфирэфиркетонем и УВ. Олигомер ПЭКК имеет химическую структуру, аналогичную ПЭЭК, что обеспечивает хорошую совместимость с матрицей ПЭЭК [48]. ПЭКК легко проникает в пучки и ткани УВ благодаря хорошей растворимости. Однако ПЭКК в качестве связующего не показал явного влияния на механические характеристики композитов УВ/ПЭЭК при непосредственном нанесении ПЭКК на неактивированные УВ [49]. Причина заключалась в том, что ван-дер-ваальсовое притяжение между связующим и УВ играло роль физического сшивания без более прочного связывания из-за отсутствия активных функциональных групп в УВ. Для решения этой проблемы авторами [47] предложен метод активации поверхности УВ кислотой Мельдрума (2,2-диметил-1,3-диоксан-4,6-дион) с последующим нанесением раствора олигомера ПЭКК (ПЭКК/дихлорметан).

Результаты механических измерений композитов УВ/ПЭЭК показали, что прочность на сдвиг, прочность на изгиб и модуль упругости для модифицированных композитов УВ/ПЭЭК достигли 82,8 МПа, 519,2 МПа и 26,9 ГПа соответственно, показывая увеличение на 70, 37 и 48% по сравнению с композитами без модификации УВ. Улучшение можно объяснить интенсивным взаимодействием между волокнами и матрицей, полученным за счет водородной связи между активированным УВ и ПЭКК, а также хорошей совместимостью между ПЭКК и матрицей ПЭЭК. Исследования поверхностей излома композитов УВ/ПЭЭК с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 9) под-

твердили эти предположения. В композите без покрытия УВ/ПЭЭК было мало остаточного ПЭЭК, прилипшего к поверхностям УВ. При наблюдении вдоль направления УВ обнаружено большое количество трещин и пустот на границах раздела «волокно–матрица» во время разрушения. Эти явления характерны для слабой адгезии между волокнами и матрицей и указывали на то, что доминирующим механизмом разрушения образцов являлось нарушение сцепления волокон с матрицей, сопровождающееся выдергиванием УВ [50]. Простое нанесение ПЭЭК на чистые УВ (рис. 9, В) или активация УВ (рис. 9, С), по-видимому, приводили к более сильному взаимодействию между волокнами и матрицей, поскольку большее количество ПЭЭК прилипло к УВ и меньше пустот обнаружено на границах раздела для сломанных образцов. Однако трещины свидетельствуют о том, что слабые места этих двух образцов все еще находятся на границах раздела волоконной матрицы. Для композитов ПЭКК/чистые УВ/ПЭЭК покрытие ПЭКК улучшило смачиваемость УВ и способствовало пропитке матрицей ПЭЭК УВ и ткани; но взаимодействие между волокнами и матрицей было в основном притяжением Ван-дер-Ваальса, которое было относительно слабым.

Для композитов с активированными УВ несмотря на то, что полярные группы (например, -ОН и -СООН) увеличивают взаимодействие между УВ и ПЭКК [51], смачиваемость была довольно плохой, на что указывали блоки чистой матрицы ПЭЭК на УВ (рис. 9, С-і) и зазоры между ними (рис. 9, С-іі). Соответственно, механические свойства этих двух композитов продемонстрировали небольшое улучшение по сравнению с чистыми УВ/ПЭЭК. В композитах ПЭКК/активированные УВ/ПЭЭК (рис. 9, D) УВ были обернуты прочной матрицей, так что контуры УВ практически не наблюдались в поперечных сечениях. При этом такие дефекты, как большие отверстия и трещины на границах раздела «волокно–матрица», были сведены к минимуму, и наблюдалась деформация и разрыв смолы.

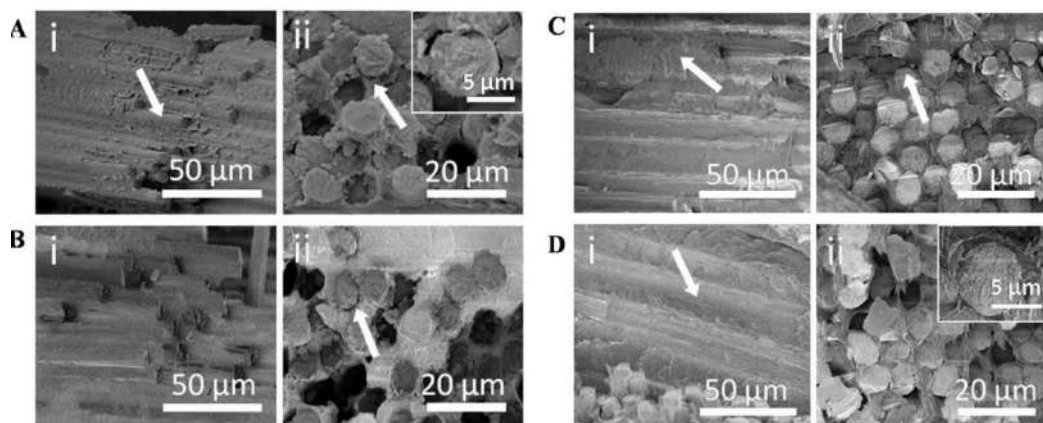


Рис. 9

Таким образом, предложен эффективный способ усиления межфазной адгезии между УВ и ПЭКК путем применения ПЭКК в качестве связующего. Этот метод модификации прост в реализации и может применяться для производства крупногабаритных композиционных материалов, содержащих непрерывные УВ волокна или углеткани, демонстрируя потенциал для промышленного применения.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, ПЭКК является перспективным полимером для получения высокоэффективных волокон за счет использования технологии электропрядения, волоконных мембран по растворной технологии, связующих для получения волокнистых композиционных материалов в расплаве и открывает большие возможности для развития многих высокотехнологичных отраслей промышленности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Lakshman R.V.* Polyetherketones // *Journal of Macromolecular Science*. 1995, 4. P. 661...712.
2. *Quiroga Cortes L., Causse N., Dantras E., Lonjon A., Lacabanne C.* Morphology and dynamical mechanical properties of polyether ketone (PEKK) with meta-phenyl links // *J. Appl. Polym. Sci.* 2016, 133. P. 1...8.
3. *Hay A.S.* Aromatic polyethers // *Advances in Polymer Science*. 1967, 4. P. 496...527.
4. *Мирошниченко Д.А., Корнилова Н.Л., Мусов И.В., Слонов А.Л., Хаширова С.Ю.* Исследование упругодеформационных характеристик мононитей из суперконструкционных полимеров // *Изв. вузов*.

Технология текстильной промышленности. 2022. №5 (401). С. 65...71.

5. *Шахмурзова К.Т., Курданова Ж.И., Хаширова С.Ю., Беев А.А., Лигидов М.Х., Пахомов С.И., Микутаев А.К.* Полиэфиркетоны. Получение, свойства и применение // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2015. № 3 (58). С. 3...11.

6. *Choupin T., Fayolle B., Regnier G., Paris C., Cinquin J., Brule B.* Isothermal crystallization kinetic modeling of poly(etherketoneketone) (PEKK) copolymer // *Polymer*. 2017, 111. P. 73...82.

7. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/polyetherketoneketone-market-7783>

8. <https://www.arkema.com/global/en/products/product-families/pekk-kepstan/>.

9. *Botkin J.H., Cotter R.J., Matzner M., Kwiatkowiak G.T.* Poly (aryl ether ketone) block and chain-extended copolymers. 3. Preparation and characterization of poly (ether ketone ketone)/poly (ether sulfone) block copolymers // *Macromolecules*. 1993, 26. P. 2372...2376.

10. *Ke Y.C., Fang Z.J., Wang J.Z., Wu Z.W.* Structure, crystallization, and properties of poly (aryl ether ketone ketone) s containing meta-phenyl links and their copolymers // *Journal of applied polymer science*. 1996, 8. P. 1293...1303.

11. *Daoust D., Godard P., Devaux J., Legras R., Strazielle C.* Chemical modification of poly (ether ether ketone) for size exclusion chromatography at room temperature: 2. On the reliability of the derivatization procedure for PEEK molecular-mass determination—application to PEEK-carbon fibre composite // *Polymer*. 1994, 25. P. 5498...5503.

12. *Bangarusampath D.S., Ruckdäschel H., Altstadt V., Sandler J.K., Garray D., Shaffer M.S.* Rheology and properties of melt-processed poly (ether ether ketone)/multi-wall carbon nanotube composites // *Polymer*. 2009, 24. P. 5803...5811.

13. *Ray D., Comer A.J., Lyons J., Obande W., Jones D., Higgins R.M.O. et al.* Mechanical characterization of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave // *J Appl Polym Sci*. 2015, 132. P. 41643...41653.



14. Patent KP102250301B1. A process for producing a polyetherketone-eketone having an improved crystallization rate and polyether ketone thereof. 2018.
15. Patent KR102262524B1. Method for preparing poly ether ketone ketone. 2017.
16. Patent WO2009089722A1. A process for preparing a polyether ether ketone. 2009.
17. Patent EP3438085A1. Process for producing polyether ketone ketone. 2017.
18. Patent WO2018115035A1. Poly(ether ketone ketone) polymers, corresponding synthesis methods and polymer compositions and articles made there-from. 2016
19. Patent US 2019/0040189. Process for producing polyether ketone ketone. 2019.
20. Patent US 4816556. Ordered polyetherketones. 1989
21. *Cheng S.Z.D., Ho R.-M., Hsiao B.S., Gardner K.H.* Polymorphism and crystal structure identification in poly (aryl ether ketone ketone)s // *Macromolecular Chemistry and Physics.* – 1996, 1. P. 185...213.
22. *Hsiao B.S., Gardner K.H., Cheng S.Z.D.* Crystallization of poly (aryl ether ketone ketone) copolymers containing terephthalate/isophthalate moieties // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics.* – 1994. 16. P. 2585...2594.
23. *Gardner K.C.H., Hsiao B.S., Faron K.L.* Polymorphism in poly (aryl ether ketone) s // *Polymer.* – 1994, 11. P. 2290...2295.
24. *Ho R.M., Cheng S.Z.D., Hsiao B.S., Gardner K.H.* Crystal morphology and phase identification in poly (aryl ether ketone) s and their copolymers. 3. Polymorphism in a polymer containing alternated terephthalic acid and isophthalic acid isomers // *Macromolecules.* 1995, 6. P. 1938...1945.
25. *Coulson M., Quiroga Cortés L., Dantras E., Lonjon A., Lacabanne C.* Dynamic rheological behavior of poly (ether ketone ketone) from solid state to melt state // *Journal of Applied Polymer Science.* 2018, 27. P. 46456.
26. *Blundell D.J., Newton A.B.* Variations in the crystal lattice of PEEK and related parasubstituted aromatic polymers: 2. Effect of sequence and proportion of ether and ketone links // *Polymer.* 1991, 2. P. 308...313.
27. *Gardner K.C.H., Hsiao B.S., Matheson R.R., Wood B.A.* Structure, crystallization and morphology of poly (aryl ether ketone ketone) // *Polymer.* 1992, 12. P. 2483...2495.
28. *Quiroga Cortes L., Caussé N., Dantras E., Lonjon A., Lacabanne C.* Morphology and dynamical mechanical properties of poly ether ketone ketone (PEKK) with meta phenyl links // *Journal of Applied Polymer Science.* 2016, 19.
29. Patent WO2010107976A1. Gilbert W. Rudman Gregory S. O'brien Christopher A. Bertelo. Polyetherketoneketone nonwoven mats. 2010.
30. *Aristizábal L.S., Lakshmeesha Upadhyaya, Tepper M., Roth H., Ramírez-Martínez M., Wessling M., Nunes S.P.* Poly(aryl ether ketone) hollow fibers preparation with acid resistant spinnerets // *Journal of Membrane Science.* 2023, 674.
31. *Aristizábal L.S., Lakshmeesha Upadhyaya, Falca G., Gebreyohannes A.Y., Aijaz M.O., Karim M.R., Nunes S.P.* Acid-free fabrication of polyaryletherketone membranes // *Journal of Membrane Science.* 2022. 660.
32. *Baran I., Warnet L.L., Remko A.* Assessment of failure and cohesive zone length in co-consolidated hybrid C/PEKK butt joint // *Engineering Structures.* 2018. 168.
33. *Choupin T.* Mechanical performances of PEKK thermoplastic composites linked to their processing parameters. Paris, ENSAM, 2017.
34. *Lee Y., Porter R.S.* Crystallization of poly (ether-etherketone)(PEEK) in carbon fiber composites // *Polymer engineering & science.* 1986, 26. P. 633...639.
35. *Chen E.J.H., Hsiao B.S.* The effects of transcrystalline interphase in advanced polymer composites // *Polymer Engineering & Science.* 1992, 32. P. 280...286.
36. *Gao S.L., Kim J.K.* Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part 1. Crystallinity and interface adhesion // *Composites Part A: Applied science and manufacturing.* 2000, 31. P. 517...530.
37. *Sun S., Jin Z., Liu X., Han Z., Wang Y.* In situ consolidation process-based fabrication and interlaminar modification mechanism associated with CF/PEEK multiscale nanocomposites characterized by interlaminar doping of CNTs // *Composites Science and Technology.* 2022, 222. P. 109356.
38. *Zhang D., Huang Y.* The bonding performances of carbon nanotube (CNT)-reinforced epoxy adhesively bonded joints on steel substrates // *Progress in Organic Coatings.* 2021, 159. P. 106407.
39. *He Y., Zhang J., Yao L., Tang J., Che B., Ju S., Jiang D.* A multi-layer resin film infusion process to control CNTs distribution and alignment for improving CFRP interlaminar fracture toughness // *Composite Structures.* 2021, 260. P. 113510.
40. *Yildiz K., Gürkan İ., Turgut F., Cebeci F.Ç., Cebeci H.* Fracture toughness enhancement of fuzzy CNT-glass fiber reinforced composites with a combined reinforcing strategy // *Composites Communications.* 2020, 21. P. 100423.
41. *Szatkowski P., Czechowski L., Gralewski J., Szatkowska M.* Mechanical Properties of Polylactide Admixed with Carbon Nanotubes or Graphene Nanopowder // *Materials.* 2021, 14. P. 5955.
42. *Ashrafi B., Diez-Pascual A.M., Johnson L., Genest M., Hind S., Martínez-Rubi Y., González-Domínguez J.M., Martínez M.T., Simard B., Gómez-Fatou M.A.* Processing and properties of PEEK/glass fiber laminates: Effect of addition of single-walled carbon nanotubes // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2012, 43. P. 1267...1279.
43. *Qiao L., Zhu K., Tan H., Yan X., Zheng L., Dong S.* Effect of carbon nanotubes on the electrical, thermal, mechanical properties and crystallization behavior of continuous carbon fiber reinforced polyether-etherketone composites // *Materials Research Express.* 2021, 8. P. 045312.
44. *Yan X., Qiao L., Tan H., Liu C., Zhu K., Lin Z., Xu S.* Effect of Carbon Nanotubes on the Mechanical, Crystallization, Electrical and Thermal Conductivity Properties of CNT/CCF/PEKK Composites // *Materials.* 2022, 15. 4950.

45. *Nassir N.A., Birch R.S., Cantwell W.J., Wang Q.Y., Liu L.Q., Guan Z.W.* The perforation resistance of glass fibre reinforced PEKK composites // *Polymer Testing*. 2018, 72. P. 423...431.

46. *Gan D., Cao W., Song C., Wang Zh.* Mechanical properties and morphologies of poly (ether ketone ketone)/glass fibers/mica ternary composites // *Materials Letters*. 2001, 51. P. 120...124.

47. *Hassan E.A.M., Ge D., Yang L., Zhou J., Liu M., Yu M., Zhu S.* Highly boosting the interlaminar shear strength of CF/PEEK composites via introduction of PEKK onto activated CF // *Composites: Part A*. 2018, 112. P. 155...160.

48. Patent US EP2208207A1 David B, George I B, Tim H. High temperature substrate protective structure. 2010.

49. *Giraud I., Franceschi S., Perez E., Lacabanne C., Dantras E.* Influence of new thermoplastic sizing agents on the mechanical behavior of poly (ether ketone ketone)/carbon fiber composites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2015, 132.

50. *Sause M.G.R.* In situ monitoring of fiber-reinforced composites: theory, basic concepts, methods, and applications. Springer, 2016, 242.

51. *Tiwari S., Sharma M., Panier S., Mutel B., Mitschang P., Bijwe J.* Influence of cold remote nitrogen oxygen plasma treatment on carbon fabric and its composites with specialty polymers // *Journal of Materials Science*. 2011, 46. P. 964...974.

## REFERENCES

1. *Lakshman R.V.* Polyetherketones // *Journal of Macromolecular Science*. 1995, 4. P. 661...712.

2. *Quiroga Cortes L., Causse N., Dantras E., Lonjon A., Lacabanne C.* Morphology and dynamical mechanical properties of polyether ketone (PEKK) with metaphenyl links // *J. Appl. Polym. Sci.* 2016, 133. P. 1...8.

3. *Hay A.S.* Aromatic polyethers // *Advances in Polymer Science*. 1967, 4. P. 496...527.

4. *Miroshnichenko D.A., Kornilova N.L., Musov I.V., Slonov A.L., Khashirova S.Yu.* Investigation of elastic-deformation characteristics of monothreads from of superstructural polymers // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022, 5 (401). P. 65...71.

5. *Shakhmurzova K.T., Kurdanova Zh.I., Khashirova S.Yu., Beev A.A., Ligidov M.Kh., Pakhomov S.I., Mikitaev A.K.* Polyetherketones. Obtaining, properties and application // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2015, № 3 (58). C. 3...11.

6. *Choupin T., Fayolle B., Regnier G., Paris C., Cinquin J., Brule B.* Isothermal crystallization kinetic modeling of poly(etherketoneketone) (PEKK) copolymer // *Polymer*. 2017, 111. P. 73...82.

7. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/polyetherketoneketone-market-7783>

8. <https://www.arkema.com/global/en/products/product-families/pekk-kepstan/>.

9. *Botkin J.H., Cotter R.J., Matzner M., Kwiatkowiak G.T.* Poly (aryl ether ketone) block and chain-

extended copolymers. 3. Preparation and characterization of poly (ether ketone ketone)/poly (ether sulfone) block copolymers // *Macromolecules*. 1993, 26. P. 2372...2376.

10. *Ke Y.C., Fang Z.J., Wang J.Z., Wu Z.W.* Structure, crystallization, and properties of poly (aryl ether ether ketone ketone) s containing meta-phenyl links and their copolymers // *Journal of applied polymer science*. 1996, 8. P. 1293...1303.

11. *Daoust D., Godard P., Devaux J., Legras R., Strazielle C.* Chemical modification of poly (ether ether ketone) for size exclusion chromatography at room temperature: 2. On the reliability of the derivatization procedure for PEEK molecular-mass determination—application to PEEK-carbon fibre composite // *Polymer*. 1994, 25. P. 5498...5503.

12. *Bangarusampanth D.S., Ruckdäschel H., Altstädt V., Sandler J.K., Garray D., Shaffer M.S.* Rheology and properties of melt-processed poly (ether ether ketone)/multi-wall carbon nanotube composites // *Polymer*. 2009, 24. P. 5803...5811.

13. *Ray D., Comer A.J., Lyons J., Obande W., Jones D., Higgins R.M.O. et al.* Mechanical characterisation of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave // *J Appl Polym Sci.* – 2015, 132. P. 41643...41653.

14. Patent KP102250301B1. A process for producing a polyetherketone-eketone having an improved crystallization rate and polyether ketone thereof. 2018

15. Patent KR102262524B1. Method for preparing poly ether ketone ketone. 2017.

16. Patent WO2009089722A1. A process for preparing a polyether ether ketone. 2009.

17. Patent EP3438085A1. Process for producing polyether ketone ketone. 2017.

18. Patent WO2018115035A1. Poly(ether ketone ketone) polymers, corresponding synthesis methods and polymer compositions and articles made therefrom. 2016.

19. Patent US 2019/0040189. Process for producing polyether ketone ketone. 2019.

20. Patent US 4816556. Ordered polyetherketones. 1989.

21. *Cheng S.Z.D., Ho R.-M., Hsiao B.S., Gardner K.H.* Polymorphism and crystal structure identification in poly (aryl ether ketone ketone)s // *Macromolecular Chemistry and Physics*. 1996, 1. P. 185...213.

22. *Hsiao B.S., Gardner K.H., Cheng S.Z.D.* Crystallization of poly (aryl ether ketone ketone) copolymers containing terephthalate/isophthalate moieties // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 1994. 16. P. 2585...2594.

23. *Gardner K.C.H., Hsiao B.S., Faron K.L.* Polymorphism in poly (aryl ether ketone) s // *Polymer*. 1994, 11. P. 2290...2295.

24. *Ho R.M., Cheng S.Z.D., Hsiao B.S., Gardner K.H.* Crystal morphology and phase identification in poly (aryl ether ketone) s and their copolymers. 3. Polymorphism in a polymer containing alternated terephthalic acid and isophthalic acid isomers // *Macromolecules*. 1995, 6. P. 1938...1945.

25. Coulson M., Quiroga Cortés L., Dantras E., Lonjon A., Lacabanne C. Dynamic rheological behavior of poly (ether ketone ketone) from solid state to melt state // *Journal of Applied Polymer Science*. 2018, 27. P. 46456.
26. Blundell D.J., Newton A.B. Variations in the crystal lattice of PEEK and related parasubstituted aromatic polymers: 2. Effect of sequence and proportion of ether and ketone links // *Polymer*. 1991,2. P. 308...313.
27. Gardner K.C.H., Hsiao B.S., Matheson R.R., Wood B.A. Structure, crystallization and morphology of poly (aryl ether ketone ketone) // *Polymer*. 1992, 12. P. 2483...2495.
28. Quiroga Cortes L., Caussé N., Dantras E., Lonjon A., Lacabanne C. Morphology and dynamical mechanical properties of poly ether ketone ketone (PEKK) with meta phenyl links // *Journal of Applied Polymer Science*. 2016, 19.
29. Patent WO2010107976A1. Gilbert W. Rudman Gregory S. O'brien Christopher A. Bertelo. Polyetherketoneketone nonwoven mats. 2010.
30. Aristizábal L.S., Lakshmeesha Upadhyaya, Tepper M., Roth H., Ramírez-Martínez M., Wessling M., Nunes S.P. Poly(aryl ether ketone) hollow fibers preparation with acid resistant spinnerets // *Journal of Membrane Science*. 2023, 674.
31. Aristizábal L.S., Lakshmeesha Upadhyaya, Falca G., Gebreyohannes A.Y., Aijaz M.O., Karim M.R., Nunes S.P. Acid-free fabrication of polyaryletherketone membranes // *Journal of Membrane Science*. 2022. 660.
32. Baran I., Warnet L.L., Remko A. Assessment of failure and cohesive zone length in co-consolidated hybrid C/PEKK butt joint // *Engineering Structures*. 2018. 168.
33. Choupin T. Mechanical performances of PEKK thermoplastic composites linked to their processing parameters. Paris, ENSAM, 2017.
34. Lee Y., Porter R.S. Crystallization of poly (etheretherketone)(PEEK) in carbon fiber composites // *Polymer engineering & science*. 1986, 26. P. 633...639.
35. Chen E.J.H., Hsiao B.S. The effects of transcrystalline interphase in advanced polymer composites // *Polymer Engineering & Science*. 1992, 32. P. 280...286.
36. Gao S.L., Kim J.K. Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part 1. Crystallinity and interface adhesion // *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 2000, 31. P. 517...530.
37. Sun S., Jin Z., Liu X., Han Z., Wang Y. In situ consolidation process-based fabrication and interlaminar modification mechanism associated with CF/PEEK multiscale nanocomposites characterized by interlaminar doping of CNTs // *Composites Science and Technology*. 2022, 222. P. 109356.
38. Zhang D., Huang Y. The bonding performances of carbon nanotube (CNT)-reinforced epoxy adhesively bonded joints on steel substrates // *Progress in Organic Coatings*. 2021, 159. P. 106407.
39. He Y., Zhang J., Yao L., Tang J., Che B., Ju S., Jiang D. A multi-layer resin film infusion process to control CNTs distribution and alignment for improving CFRP interlaminar fracture toughness // *Composite Structures*. 2021, 260. P. 113510.
40. Yildiz K., Gürkan İ., Turgut F., Cebeci F.Ç., Cebeci H. Fracture toughness enhancement of fuzzy CNT-glass fiber reinforced composites with a combined reinforcing strategy // *Composites Communications*. 2020, 21. P. 100423.
41. Szatkowski P., Czechowski L., Gralewski J., Szatkowska M. Mechanical Properties of Polylactide Admixed with Carbon Nanotubes or Graphene Nanopowder // *Materials*. 2021, 14. P. 5955.
42. Ashrafi B., Díez-Pascual A.M., Johnson L., Genest M., Hind S., Martínez-Rubi Y., González-Domínguez J.M., Martínez M.T., Simard B., Gómez-Fatou M.A. Processing and properties of PEEK/glass fiber laminates: Effect of addition of single-walled carbon nanotubes // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012, 43. P. 1267...1279.
43. Qiao L., Zhu K., Tan H., Yan X., Zheng L., Dong S. Effect of carbon nanotubes on the electrical, thermal, mechanical properties and crystallization behavior of continuous carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone composites // *Materials Research Express*. 2021, 8. P. 045312.
44. Yan X., Qiao L., Tan H., Liu C., Zhu K., Lin Z., Xu S. Effect of Carbon Nanotubes on the Mechanical, Crystallization, Electrical and Thermal Conductivity Properties of CNT/CCF/PEKK Composites // *Materials*. – 2022, 15. 4950.
45. Nassir N.A., Birch R.S., Cantwell W.J., Wang Q.Y., Liu Q., Guan Z.W. The perforation resistance of glass fibre reinforced PEKK composites // *Polymer Testing*. 2018, 72. P. 423...431.
46. Gan D., Cao W., Song C., Wang Zh. Mechanical properties and morphologies of poly (ether ketone ketone)/glass fibers/mica ternary composites // *Materials Letters*. 2001, 51. P. 120...124.
47. Hassan E.A.M., Ge D., Yang L., Zhou J., Liu M., Yu M., Zhu S. Highly boosting the interlaminar shear strength of CF/PEEK composites via introduction of PEKK onto activated CF // *Composites: Part A*. 2018, 112. P. 155...160.
48. Patent US EP2208207A1 David B, George I B, Tim H. High temperature substrate protective structure. 2010.
49. Giraud I., Franceschi S., Perez E., Lacabanne C., Dantras E. Influence of new thermoplastic sizing agents on the mechanical behavior of poly (ether ketone ketone)/carbon fiber composites // *Journal of Applied Polymer Science*. 2015, 132.
50. Sause M.G.R. In situ monitoring of fiber-reinforced composites: theory, basic concepts, methods, and applications. Springer, 2016, 242.
51. Tiwari S., Sharma M., Panier S., Mutel B., Mitschang P., Bijwe J. Influence of cold remote nitrogen oxygen plasma treatment on carbon fabric and its composites with specialty polymers // *Journal of Materials Science*. 2011, 46. P. 964...974.

Рекомендована лабораторией технологии полимерных материалов и композитов Тульского государственного университета. Поступила 16.09.23.

## ТЕРМОХРОМНЫЕ ПОЛИМЕРЫ, ВОЛОКНА И МАТЕРИАЛЫ: ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА

## THERMOCHROMIC POLYMERS, FIBERS AND MATERIALS: PRODUCTION AND PROPERTIES

*E.S. САШИНА, А.П. МИХАЙЛОВСКАЯ, М.А. БАКАЕВА, А.Ю. КУЛЕШОВА*

*E.S. SASHINA, A.P. MIKHAILOVSKAYA, M.A. BAKAEVA, A.YU. KULESHOVA*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: e.sashina@mail.ru

*Рассмотрены способы получения волокнообразующих полимеров и текстильных изделий с термохромными свойствами. Для термохромных волокон рассмотрен способ введения термохромного красителя в расплав (полипропилен) или раствор (целлюлоза, полиакрилонитрил). Анализируется влияние состава термохромной композиции и полимерной матрицы на цветовой эффект.*

*Methods for obtaining dyes, fiber-forming polymers and textile products with thermochromic properties are considered. For thermochromic fibers, a method for introducing a thermochromic dye into a melt (polypropylene) or solution (cellulose, polyacrylonitrile) is considered. The influence of the composition of the thermochromic composition on the color effect is analyzed.*

**Ключевые слова:** термохромные красители, микрокапсулирование, термохромные полимеры, текстильный материал с термохромным эффектом.

**Keywords:** thermochromic dyes, microencapsulation, thermochromic polymers, textile material with thermochromic effect.

### *Введение*

На сегодняшний день разработано и успешно применяется множество красителей, обладающих способностью обесцвечиваться или изменять собственный цвет в зависимости от изменения условий окружающей среды, и в частности температуры. Термохромные красители активно используются в качестве температурных датчиков на различных объектах, а также в декоративных целях: окраска автомобилей, посуды и сувениров, печатной продукции, детских товаров и игрушек, упаковки для косметики и фармацевтики. Представляют особый интерес волокнистые материалы, обладающие термохромными свойствами.

Так, применение термохромного текстиля возможно в бытовой сфере для декорирования текстильных изделий, для медицинской, детской и профессиональной одежды, где требуется индикация температуры. Несмотря на популярность данного направления, механизмы термохромного поведения и алгоритм управления ими пока до конца не изучены, попытки создания термохромного текстиля сталкиваются с отсутствием отечественной базы красителей и технологий их применения, высокой стоимостью. В данной статье будут рассмотрены перспективы и особенности применения термохромных красителей в текстиле.

### Термохромные красители

Согласно определению Дж. Дзя, написавшего обзор по термохромизму в 1963 году [1], термохромизмом считается легко заметное обратимое изменение цвета, вызванное точкой кипения растворителя в случае раствора или точкой плавления твердых веществ. Ныне данное определение упрощено до «свойства веществ изменять цвет из-за изменения температуры» [2]. В общем виде различают реверсивные (обратимые) и нереверсивные меняющие цвет системы. В случае обратимого термохромизма система возвращает свой цвет при установлении изначальной температуры. Для необратимого термохромизма характерен цветовой переход без возможности вернуть прежний цвет. Красители, способные к термохромному переходу, могут иметь органическую, металлоорганическую и неорганическую природу.

К неорганическим системам, способным проявлять свойство термохромизма, относятся комплексы переходных металлов. Выделяют несколько возможных механизмов цветового перехода в неорганических соединениях при нагреве:

- фазовый переход при условии разного цвета фаз (например,  $\text{Cu}_2\text{HgI}_4$ , имеющий красный цвет при 20 °С и черный при 70 °С);

- уменьшение ширины запрещенной зоны полупроводников (белый  $\text{ZnO}$  при прокаливании становится желтым);

- изменение геометрии лиганда (например,  $(\text{Et}_2\text{NH}_2)_2\text{CuCl}_4$  имеет ярко-зеленый цвет при 20 °С, находясь в квадратном плоском состоянии, и желтый при 43 °С при тетраэдрической форме лиганда);

- изменение координационного числа ( $\text{CoCl}_2$  в изопропанолe существует в своей розовой октаэдрической геометрии комплекса на основе  $\text{Co}^{2+}$  при 25 °С и меняет цвет на синий в тетраэдрической геометрии при 75 °С).

Ограничивающими применение неорганических соединений факторами являются высокие температуры и в большинстве своем необратимый характер их цветового перехода. Высокая температура тер-

мохромного перехода неорганических соединений дает возможность ее использования для окраса боевой одежды пожарных (БОП). В соответствии с ГОСТ Р 53264-2009 «Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного» БОП подразделяется на 3 уровня: БОП-1 устойчива к воздействию температуры до 300 °С не менее 300 с, БОП-2 способна выдержать температуру среды до 200 °С не менее 240 с, БОП-3 выдерживает температуру среды до 200 °С не менее 180 с. Так как времени удержания тепла при критических температурах немного, яркий температурный индикатор будет способен продемонстрировать пожарным, что в скором времени теплозащитные свойства костюма ухудшатся. Для подобного назначения подходит координационное соединение диэтилендиаминнитрата меди (II)  $[\text{Cu}(\text{N,N}\text{-этилендиамин})_2](\text{NO}_3)_2$ , имеющее температуру термохромного перехода с красного цвета на фиолетовый 150 °С. Причиной термохромного перехода данного соединения является изменение геометрии комплекса.

В качестве примера металлоорганического красителя можно привести гибридные молекулы  $[(\text{PyCH}_2\text{NH}_3)_6]\cdot[\text{Pb}_5\text{I}_{22}]\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  с неорганическим 2D слоем [3], их оранжевая при комнатной температуре окраска переходит в красный цвет при 80 °С, а также полиэтилендиокситиофенполистиролсульфонат с добавкой хлорида меди ( $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), меняющий цвет при обезвоживании около 65-70 °С [4].

Красители органической природы имеют, как правило, температурный переход ниже такового для неорганических красителей и чаще обладают обратимым характером. Нагревание вызывает изменение цвета хромофора, а при удалении источника тепла цвет возвращается к своему термически более стабильному состоянию. Механизм обратимого термохромизма может быть различным [5]:

- внутримолекулярная перегруппировка путем разрыва ковалентных связей (например, спирооксазины);

- холестические жидкие кристаллы, проявляющие одновременно свойства жидко-

стей и присущую кристаллическим веществам анизотропию свойств (основания Шиффа, бифенилы, азобензолы, толаны, пиридины и др.);

- стереоизомерия в молекулах, имеющих разные цвета стереоизомеров (биантроны);

- макромолекулярные системы с переходами электронной плотности (политиофены, полисиланы, полидиацетилен, полианилины).

Первые два механизма наиболее распространены. Таким образом, термохромные красители органической природы – обычно жидкие кристаллы или лейкокрасители.

Холестерические жидкие кристаллы способны к обратимому цветовому переходу и реагируют на небольшие температурные колебания, что обуславливает их применение в качестве высокочувствительных температурных индикаторов. Первым исследованным холестерическим жидкокристаллическим соединением является холестерил бензоат, открытый Ф. Рейнцем. Молекулярная цепочка жидкокристаллических полимеров имеет спиральную структуру, которая может преобразовываться при различных температурах. Размер спирали молекулярной структуры и показатель преломления определяют цвет материала. Поэтому жидкие кристаллы могут демонстрировать сложное термохромное поведение. Так, композиция из 45% пеларгоната холестерина и 55% олеата холестерина способна к четырёхкратной смене цвета: 31-32 °С – красный цвет, 32-33 °С – зеленый цвет, 33-34 °С – синий цвет, 34-36 °С – фиолетовый цвет. При этом смена пропорций в смеси тех же холестериков до 65% пеларгоната холестерина и 35% олеата холестерина увеличивает температуру цветового перехода: 35,5-45 °С – красный цвет, 45,5-46 °С – зеленый цвет, 46-46,5 °С – синий цвет, 46,5-48 °С – фиолетовый цвет. Но в целом высокая стоимость и слабый эффект изменения цвета являются недостатками этого класса термохромных красителей. Наиболее популярными являются термохромные лейкокрасители, работающие по меха-

низму внутримолекулярной перегруппировки и представляющие собой композицию из красителя, проявителя цвета и гидрофобных нелетучих органических растворителей. Такие композиции считаются наиболее подходящими для текстильных изделий: термохромный переход зависит исключительно от температуры плавления растворителей и обладает многократной обратимостью. Когда температура достигает точки плавления, растворитель претерпевает фазовый переход из твердого состояния в жидкое, при этом краситель и проявитель растворяются в растворителе, что приводит к изменению цвета из-за разрыва связей в структуре красителя и перестройки хромофора в результате протонирования (рис. 1 – зависимость строения кристаллического фиолетового лактона от pH: а – неокрашенный (pH>4); б – окрашенный (pH<4)).

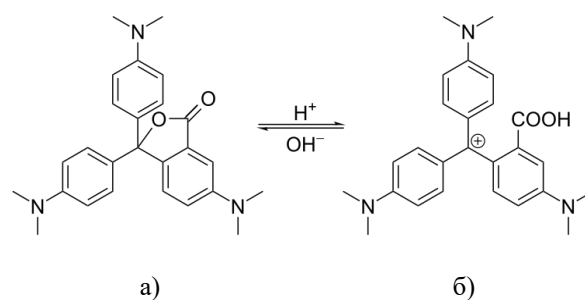


Рис. 1

При понижении температуры до точки заморозания растворитель переходит в твердое состояние, а красители возвращаются к исходному цвету. Цвет системы зависит от используемого лейкокрасителя, а температуру перехода можно регулировать с помощью подбора растворителей. Температура цветового перехода зависит только от растворителя, например, для систем с додеканолом цветовой переход наблюдается при расплавлении растворителя около 28 °С (рис. 2 – термограмма композиции фиолетовый лактон/проявитель/додеканол (1/5/300). Измерения выполнены на приборе DSC 8500 (PerkinElmer) со скоростью нагрева 10 °С/мин).

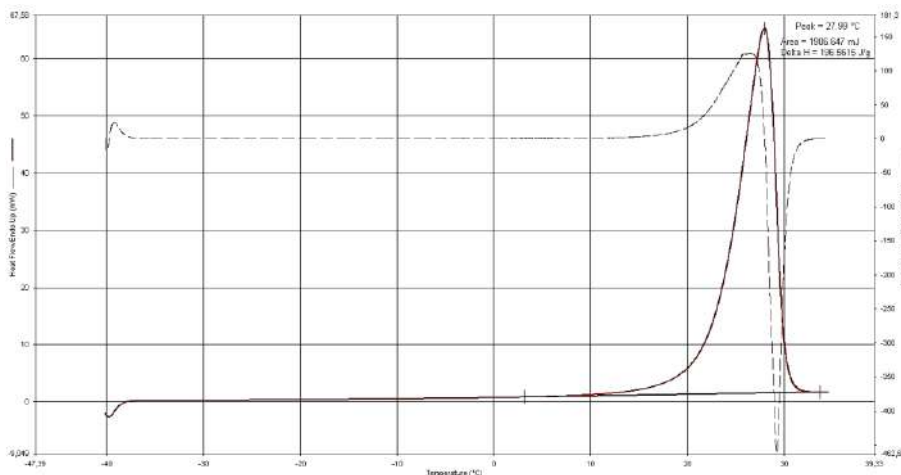


Рис. 2

Насыщенность цвета определяется содержанием красителя, а при одинаковом содержании красителя увеличивается до определенного максимума при возрастании количества проявителя в композиции (рис. 3 – зависимость светлоты  $L$  термохромной композиции от температуры в режиме нагрева, точка перехода 23 °С, масс. соотношение краситель/проявитель/растворитель: 1 – 1/0,5/300; 2 – 1/1/300; 3 – 1/1,5/300; 4 – 1/2/300).

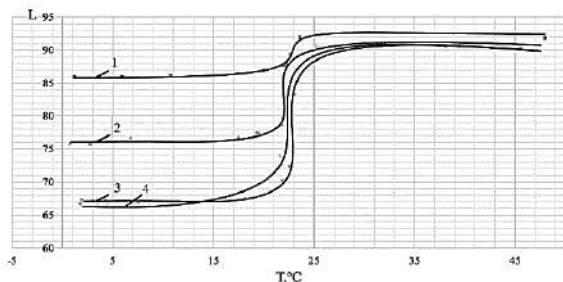


Рис. 3

#### *Капсулирование термохромных красителей*

Термохромные красители любой природы нельзя использовать для непосредственного окрашивания из-за их высокой чувствительности к окислению, низкого сродства к окрашиваемой поверхности и утечки растворителя при нагревании. Поэтому их капсулируют в полимерную оболочку с типичными размерами микрокапсул 2-50 мкм [6, 7]. Дополнительное преимущество микрокапсулирования состоит в защите чувствительных к УФ-излучению

красителей. Применение микрокапсулированных красителей позволяет комбинировать несколько термохромных красителей, в результате чего получается ряд узких цветовых диапазонов.

Учитывая задачу капсулирования гидрофобной красящей композиции, необходимо понимать, что в качестве оболочек не подходят водорастворимые или проницаемые при набухании вещества. Оболочка капсулы должна быть прозрачной, чтобы не исказить зрительное восприятие цвета термохромного красителя в составе капсулы. Таким образом, подходящими являются полиуретановые, полисилоксановые, полиамидные, полиэфирные, карбамидные или эпоксидные оболочки.

Приемы, используемые для микрокапсулированных продуктов, основаны на процессах пленкообразования в гетерогенных системах на границе раздела жидкость-жидкость. Существуют следующие способы создания полимерных оболочек:

- 1) пленкообразование из растворов пленкообразующих веществ за счет регулирования их растворимости в данной среде (понижение температуры раствора, его pH, испарение части растворителя, добавление осадителя);
- 2) пленкообразование из расплавов пленкообразующих веществ;
- 3) пленкообразование в результате полимеризации или поликонденсации низкомолекулярных веществ на поверхности капсулируемого вещества.

Для микрокапсулирования термохромных красителей обычно используются физико-химические и химические процессы, такие, как коацервация и межфазная полимеризация. Окончательный выбор способа микрокапсулирования зависит от области применения и таких факторов, как размер частиц, толщина стенки, непроницаемость, термическая стабильность, совместимость и адгезия с окружающими химическими веществами. Капсулируемое вещество вводят в исходный раствор пленкообразующего, размешивают до мелкодисперсного состояния. Это возможно при правильном подборе компонентов и растворителей: гидрофильное пленкообразующее и гидрофобное капсулируемое вещество. При этом используют поверхностно-активные вещества, в зависимости от природы которых будет достигаться необходимая степень дисперсности и исключается обращение фаз (обволакивание пленкообразующего полимера капсулируемым веществом). Далее тем или иным способом вызывают возникновение фазы пленкообразующего полимера, которая выделяется в виде мелких капелек и при перемешивании системы обволакивает частицы капсулируемого вещества, образуя непрерывную оболочку (рис. 4 – микрофотографии частиц капсулированной термохромной композиции, выполненные при помощи сканирующего электронного микроскопа *Sigma VP ZEISS* (ускоряющее напряжение 10 кВ, детектор *InLens*)).

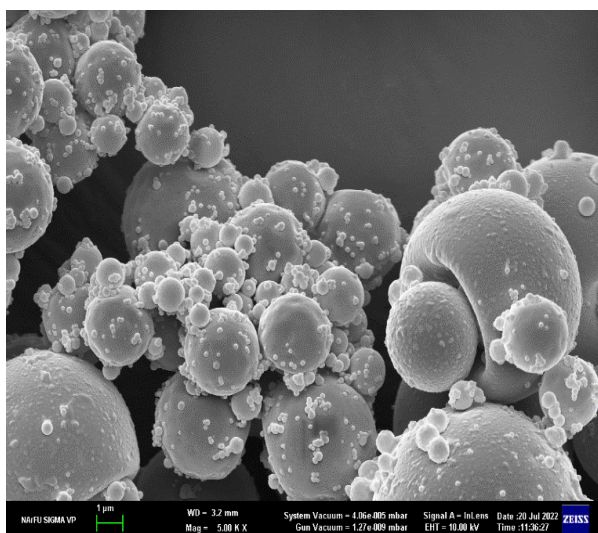


Рис. 4

Для образования оболочки на поверхности частиц капсулируемого вещества важно, чтобы капсулируемое вещество не было растворимо в растворителе и осадителе, используемых для образования полимерной оболочки, а также имело большее поверхностное натяжение, чем фаза, обогащенная пленкообразующим (пленка). Формирование пленки на поверхности диспергированных частиц протекает в течение длительного времени, иногда до нескольких часов. После его завершения добиваются затвердевания оболочек, понижая температуру системы или разбавляя ее осадителем. При необходимости повышения устойчивости оболочек микрокапсул (например, к воздействию жидких сред) молекулы пленкообразующего сшивают бифункциональным реагентом. Микрокапсулирование завершают отделением микрокапсул от среды с помощью центрифугирования, фильтрования или декантации с последующим промыванием и высушиванием микрокапсул.

Один из вариантов метода микрокапсулирования пленкообразованием из раствора основан на высушивании при распылении. По этому способу капсулируемое вещество диспергируют в жидкой среде, содержащей в растворенном или диспергированном виде пленкообразующее. Для осуществления стадии микрокапсулирования смесь распыляют в нагретой камере, в результате чего происходит испарение среды с образованием полимерной пленки на поверхности капсулируемого вещества. При этом необходимо, чтобы среда была легколетучей, а капсулируемое вещество – низколетучим.

#### *Полимерные волокна с термохромными свойствами*

Для производства термохромного текстиля приемлемы два способа, различающиеся по технологии: 1) получение волокон, содержащих в своей надмолекулярной структуре термохромный краситель, или 2) нанесение и фиксация красителя на готовый текстильный материал или изделие.

Для формования термохромных волокон капсулированные термочувствительные красящие композиции добавляют в расплав



или раствор волокнообразующего полимера [8, 9]. Микрокапсулированные термохромные пигменты гидрофобны и имеют микрометровые размеры частиц, отсюда следуют особенности их совмещения с полимерным расплавом, которые определяют равномерность окрашивания и возможность миграции красителя к поверхности волокон. Количество вносимого красителя определяет в первую очередь интенсивность окраски и варьируется от 2 до 8-10 %. Для полимеров, которые плохо окрашиваются в массе дисперсными красителями, например полиакрилонитрил (нитрон) [10], концентрацию красителя увеличивают (вплоть до 40 %), однако это часто влечет за собой ухудшение физико-механических свойств. Например, по данным многих исследований и нашим собственным, введение 10 % и более термохромного красителя

в полимер снижает механическую прочность волокон до 2 раз, а удлинение при разрыве до 1,5 раз [11].

Важной характеристикой термохромных волокон и полимерных изделий, независимо от цвета красителя и точки температурного перехода, является разница температур исчезновения–проявления цвета в цикле нагрев–охлаждение. На рис. 5 (зависимость светлоты  $L$  образцов полипропилена (толщина 1,5-2 мм) от температуры в режимах нагрев (сплошная линия) – охлаждение (пунктир), содержание красителя 5 масс. %, точка перехода: а) 65 °С; б) 28 °С) приведены кривые изменения координаты цвета в системе  $CIE\text{Lab}$  – светлоты – в цикле нагрев–охлаждение для полипропиленовых образцов с красящими композициями, имеющими температуры перехода 28 °С и 65 °С.

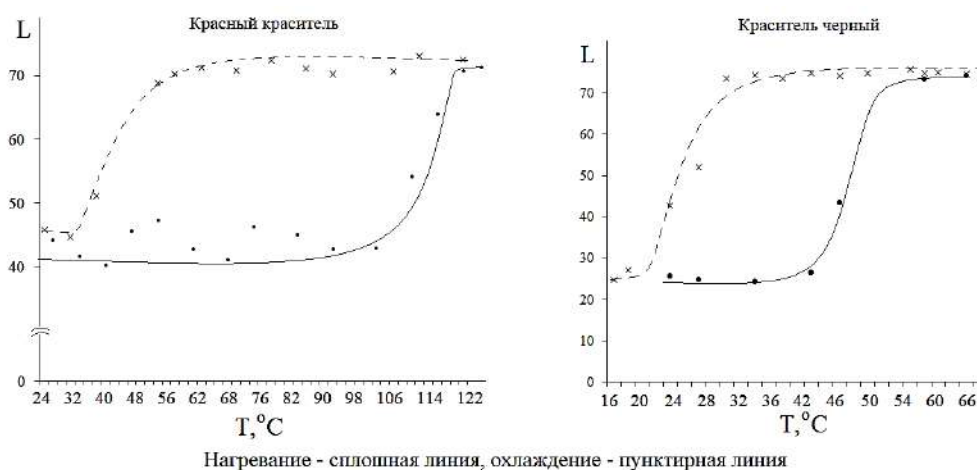


Рис. 5

Различие в температуре перехода при нагреве и охлаждении характеризуют как  $\Delta H$  = ширина гистерезиса =  $T_{\text{обесцв}} - T_{\text{восст}}$  и определяют по формулам:

$$T_{\text{обесцв}} = \frac{T_3 + T_4}{2}, \quad T_{\text{восст}} = \frac{T_1 + T_2}{2},$$

где  $T_1$  – температура полного восстановления цвета;

$T_2$  – температура частичного восстановления цвета;

$T_3$  – температура частичного обесцвечивания;

$T_4$  – температура полного обесцвечивания,

Чем ближе значения температур перехода при нагревании и охлаждении, тем меньше ширина гистерезиса. Эта характеристика довольно сложным образом зависит от состава термохромной композиции и типа проявителя, а также от свойств полимерной матрицы, включая теплопроводность и способность аккумулировать энергию. Ширина петли (разница температур) зависит от того, как долго материал отдает тепло, сохраняя фазовое состояние термохромной композиции. Площадь петли, надо полагать, характеризует энергию, теряемую в образце за один цикл, которая

идет в конечном счете на нагревание полимерного образца.

Цвет образцов материала, как правило, оказывается бледнее цвета собственно красителя, что объясняется преломлением и отражением света в оболочке микрокапсулы. Это зависит как от толщины оболочки, так и от ее материала.

Поскольку температура расплава полимера при формовании зачастую превышает порог начала деструкции капсулы или компонентов красителя, более технологичным выглядит добавление термохромной композиции в раствор полимера, например целлюлозы в N-метилморфолин-N-оксиде или ионной жидкости, полиакрилонитрила в диметилсульфоксиде или диметилацетамиде, и формование волокон осаждением в осадительную ванну. В работе [12] нами получены термохромные материалы (волокна, пленки) из растворов целлюлозы в ионной жидкости – хлориде 1-бутил-3-метилимидазолия с добавлением 5-10 % капсулированного красителя; формование проводили в изопропанол. Распределение красителя в растворе и окрашивание полученных образцов охарактеризовано как равномерное, интенсивность определяется содержанием красителя. Выявлено с использованием метода рентгеновской дифракции, что степень кристалличности образцов даже при содержании красителя 10 % мало уменьшается. Фурье-ИК-спектроскопия показала, что положение полос поглощения, принадлежащих целлюлозе, при введении красителя практически не меняется, что говорит об отсутствии специфического межмолекулярного взаимодействия, то есть полимер является инертной матрицей для размещения в ней капсулированного красителя.

Разница температур в цикле нагрев–охлаждение для целлюлозных образцов (рис. 6 – зависимость светлоты L пленок целлюлозы (толщина 1,5-2 мм) от температуры в режимах нагрев (сплошная линия) – охлаждение (пунктир), содержание красителя 5 масс. %) оказалась существенно меньше в сравнении с полипропиленом (см. рис. 5), что легко объяснимо разницей величин удельной теплоемкости дан-

ных полимеров, которая для целлюлозы составляет порядка 1500, а для полипропилена около 2000 Дж/кг·К.

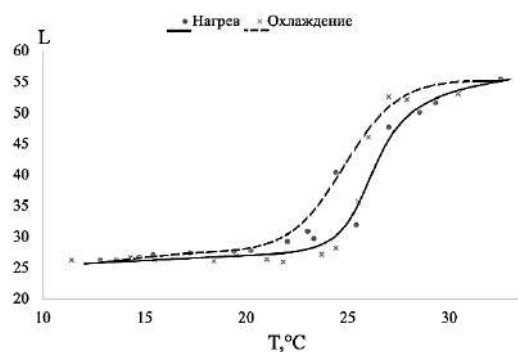


Рис. 6

Добавлением красителя в раствор полиакрилонитрила в диметилацетамиде получены термохромные образцы волокон и пленок путем испарения растворителя. Распределение красителя в структуре образцов равномерное, миграции к поверхности при высыхании растворителя не происходит. Интенсивность окраски зависит от концентрации красителя, что демонстрирует рис. 7 (зависимость светлоты L образцов полиакрилонитрила от температуры в режиме нагрева, точка перехода 28 °C, содержание красителя, масс. %: 1 – 2; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15).

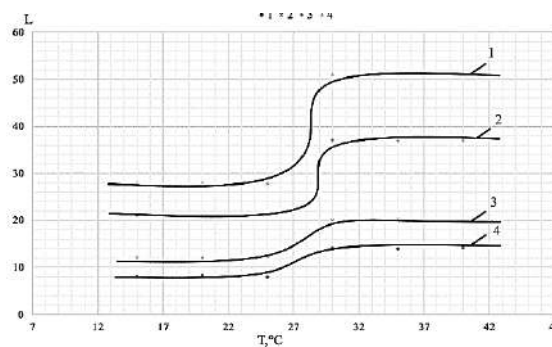


Рис. 7

Еще один способ формования волокон из раствора подразумевает электропрядение. При этом получают нановолокна, формируемые в волокнистый нетканый материал. Термохромные нановолокна получены электропрядением раствора полистирола в системе толуол/ацетон 7:3 и раствора поливинилпирролидона в этаноле с

добавлением жидких холестерических кристаллов из смесей холестерилбензоата, холестерилпеларгоната и холестерилолеилкарбоната [13]. Метод электропрядения сохраняет термохромные свойства жидкокристаллического состава, поскольку обеспечивает образование волокон малого диаметра.

*Нанесение термохромной окраски на текстильный материал методом печати*

На готовый текстильный материал термохромные краски наносят с помощью технологии шелкотрафаретной печати. Особенность техники заключается в возможности применения широкого диапазона печатных красок на различных связующих, а также использования любых материалов основы. Шелкография позволяет наносить на запечатываемый материал красочные слои различной толщины, которая зависит от структуры сетки, используемой в качестве формы. Регулируемая толщина слоя дает возможность менять интенсивность окраски, а также использовать кроющие краски на основе другого цвета.

Капсулированные красители не имеют сродства к волокну и не проникают в его структуру, поэтому фиксируются на поверхности текстильного материала за счет связующего, образующего прочную окрашенную пленку на стадии термофиксации. Кроме связующего вещества, добавляют фиксатор, мягчитель, эмульгатор, загуститель. По нашим наблюдениям, печатная композиция не должна содержать ацетон или пропилацетат, а в качестве катализаторов сшивки не допускаются аммонийные соли. Содержащиеся в краске цветочные пигменты в виде микрокапсул могут смешиваться с красками на акриловой, резиновой или масляной основе. Доля действующего вещества, как правило, составляет от пяти до тридцати процентов от общей массы печатной краски в зависимости от желаемой интенсивности цветового оттенка.

Одностадийная технология включает печатание, сушку, прогрев ткани для обеспечения взаимодействия между связующим и волокном, промывку и термическую обработку сухим горячим воздухом при температуре не более 140-160 °С в течение 2-4

мин. Качество напечатанных пигментами текстильных материалов в первую очередь зависит от используемых печатных составов, основными компонентами которых, кроме пигмента, являются связующее вещество (пленкообразующий компонент), фиксатор (сеткообразующий компонент), мягчитель, эмульгатор, загуститель.

На рис. 8 (фотографии смесовой трикотажной ткани с нанесенным методом шелкографии термохромным рисунком: а, в – до нагревания; б, г – в процессе нагревания) приведены фото устойчивых к стирке композиций состава: краситель термохромный 0,3-0,4 ч.; связующее *Helizarin Binder (BASF)* 1,2 ч.; карбамол ЦЭМ 0,4 ч.; мягчитель глицерин 0,2 ч.; загустка *Tanaprint MAXX (Tanatex Chemicals)* 8 ч.; сшивающий агент хлорид магния (5% раствор) 0,2 ч.



Рис. 8

Нанесение рисунка методом печати не приводит к существенному различию температур цветового перехода в режимах нагрев–охлаждение, обычно не более 2-4 °С (рис. 9 – зависимость светлоты L образцов полипропилена от температуры в режимах нагрев (сплошная линия) – охлаждение (пунктир) для красителя желтого с рис. 8),

что связано с малой толщиной слоя печатной краски (0,2-0,5 мм).

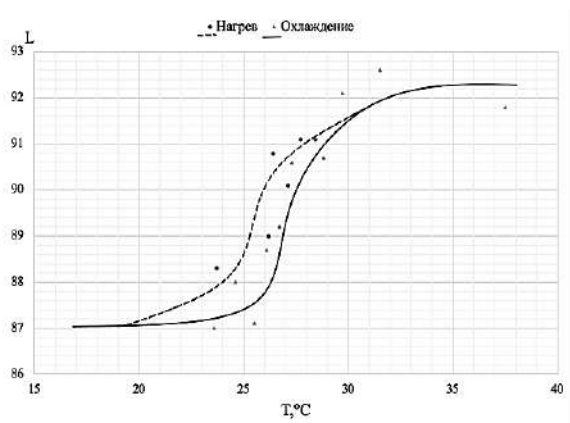


Рис. 9

Для указанного состава печатной краски устойчивость к стирке, определенная по ГОСТ 9733.4-83, составила 5 баллов.

Термохромные окраски на основе лейкокрасителей, нанесенные на текстильный материал указанным способом, устойчивы к солнечному свету, влаге, действию низких температур. Однако их не рекомендуется нагревать выше 150 °С, подвергать действию ацетона, пропилацетата или солей аммония. Капсулированные красители устойчивы к воде, этанолу, ксилолу, бутаноксиму. Устойчивость печатного рисунка к стирке определяется составом композиции, а именно природой связующего.

## ВЫВОДЫ

Для колорирования текстиля наиболее удобными являются лейкокрасители, сочетаемые с протонодонорами в среде с температурой плавления, обеспечивающей желаемую точку цветового перехода. Для создания термохромного эффекта на текстильном изделии в зависимости от площади окрашенной поверхности может быть использован метод введения термохромного красителя в структуру волокнообразующего полимера на стадии формования через расплав или раствор либо нанесения его в составе печатной пасты на готовое текстильное изделие методом шелкографии с использованием сетчатых шаблонов.

Капсулированные термохромные композиции хорошо совмещаются с расплавом гидрофобного полимера, с полярными растворителями (за исключением ацетона) и ионными жидкостями. Они совместимы с типовыми составами печатной краски, за исключением содержащих соли аммония.

Интенсивность окраски цветовой композиции зависит от концентрации красителя и до определенного предела проявителя. Она увеличивается с ростом содержания красителя до 10 масс. % без существенного изменения прочих характеристик волокнистого материала.

Цветовые характеристики термохромного текстиля могут изменяться с различной скоростью в режимах нагрев–охлаждение, что определяется как составом термохромной композиции, так и природой и теплоемкостью текстильного материала. При этом разница температур точки перехода в режимах нагрев–охлаждение зависит от того, как долго материал аккумулирует тепло, сохраняя фазовое состояние термохромной композиции. Площадь петли на графике координат цвета в режимах нагрев–охлаждение характеризует энергию, теряемую в образце за один цикл, которая идет в конечном счете на нагревание полимерного образца.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Day J.H. Thermochromism // Chem. Rev. 1963. № 63. P. 65...80.
2. Bamfield P., Hutchings M. Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry. Royal Society of Chemistry, 2018. 782 p.
3. Yu H., Wei Z., Hao Y., Liang Z., Fu Z., Cai H. Reversible solid-state thermochromism of a 2D organic–inorganic hybrid perovskite structure based on iodoplumbate and 2-aminomethyl-pyridine // New Journal of Chemistry. 2017. № 18. P. 9586...9589.
4. Mehta S., Kushwaha A., Kisannagar R. R., Gupta D. Fabrication of a reversible thermochromism based temperature sensor using an organic–inorganic composite system // RSC Advances. 2020. № 36. P. 21270...21276.
5. Теренин А.Н. Фотохимия красителей и родственных органических соединений. М.: Рипол Классик, 2013. 364 с.
6. Chowdhury M.A., Joshi M., Butola B.S. Photochromic and Thermochromic Colorants in Textile Applications // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2014. № 1. P. 107...123.

7. Lee S.S., Kim S.H. Controlled Encapsulation of Cholesteric Liquid Crystals Using Emulsion Templates // *Macromolecular Research*. 2018. № 26. P. 1054...1065.

8. Praharn C., Sooksimuang T., Sahasithiwat S., Roungpaisan N., Kamtonwong S., Panchan W., Klinsukhon W., Suwannamek N. Luminescent polypropylene fibers containing novel organic luminescent substance // *J. Polym. Res.* 2015. № 22. P. 87...91.

9. Jun L., Qiang G., Kaiyan Z., Mingqiao G., Jialin L. Structure and luminescent properties of luminous polypropylene fiber based on  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  // *Journal of Rare Earths*. 2014. № 8. P. 696...701.

10. Виноюкова Г.Н. Химия красителей. М.: Химия, 1979. 296 с.

11. Rubacha M. *Thermochromic cellulose fibers* // *Polym. Adv. Technol.* 2007. № 18. P. 323...328.

12. Сашина Е.С., Беклямышев М.О. Термохромные целлюлозные пленки из растворов в ионной жидкости // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 5. P. 134...139.

13. Nguyen J., Stwodah R. M., Vasey C. L., Rabatin B. E., Atherton B., D'Angelo P. A., ... Tang C. Thermochromic Fibers via Electrospinning // *Polymers*. 2020. № 4. P. 842...848.

#### REFERENCES

1. Day J.H. Thermochromism // *Chem. Rev.* 1963. № 63. P. 65...80.

2. Bamfield P., Hutchings M. *Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry*. Royal Society of Chemistry, 2018. 782 p.

3. Yu H., Wei Z., Hao Y., Liang Z., Fu Z., Cai H. Reversible solid-state thermochromism of a 2D organic-inorganic hybrid perovskite structure based on iodoplumbate and 2-aminomethyl-pyridine // *New Journal of Chemistry*. 2017. № 18. P. 9586...9589.

4. Mehta S., Kushwaha A., Kisannagar R. R., Gupta D. Fabrication of a reversible thermochromism based

temperature sensor using an organic-inorganic composite system // *RSC Advances*. 2020. № 36. P. 21270...21276.

5. Terenin A.N. *Photochemistry of dyes and related organic compounds*. М.: Ripol Classic, 2013. 364 p.

6. Chowdhury M.A., Joshi M., Butola B.S. Photochromic and Thermochromic Colorants in Textile Applications // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2014. № 1. P. 107...123.

7. Lee S.S., Kim S.H. Controlled Encapsulation of Cholesteric Liquid Crystals Using Emulsion Templates // *Macromolecular Research*. 2018. № 26. P. 1054...1065.

8. Praharn C., Sooksimuang T., Sahasithiwat S., Roungpaisan N., Kamtonwong S., Panchan W., Klinsukhon W., Suwannamek N. Luminescent polypropylene fibers containing novel organic luminescent substance // *J. Polym. Res.* 2015. № 22. P. 87...91.

9. Jun L., Qiang G., Kaiyan Z., Mingqiao G., Jialin L. Structure and luminescent properties of luminous polypropylene fiber based on  $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  // *Journal of Rare Earths*. 2014. № 8. P. 696...701.

10. Виноюкова Г.Н. Химия красителей. Москва: Химия, 1979. 296 с.

11. Rubacha M. *Thermochromic cellulose fibers* // *Polym. Adv. Technol.* 2007. № 18. P. 323...328.

12. Сашина Е.С., Беклямышев М.О. Термохромные целлюлозные пленки из растворов в ионной жидкости // *Известия Высших Учебных Заведений, Серия Технологии Текстильной Промышленности*. 2022. № 5. P. 134...139.

13. Nguyen J., Stwodah R. M., Vasey C. L., Rabatin B. E., Atherton B., D'Angelo P. A., ... Tang C. Thermochromic Fibers via Electrospinning // *Polymers*. 2020. № 4. P. 842...848.

Рекомендована оргкомитетом XIX Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы». Поступила 02.10.23.

УДК 687.015

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_30

**СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
В СИСТЕМЕ ПРИОРИТЕТОВ РЕГИОНАЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ АЗЕРБАЙДЖАНА**

**STRUCTURAL TRANSFORMATIONS  
IN THE SYSTEM OF REGIONAL POLICY PRIORITIES AZERBAIJAN**

*Х.Ф. МАМЕДОВА<sup>1</sup>, Ф.А. МАМЕДОВ<sup>1</sup>, С.Ш. ТАШПУЛАТОВ<sup>2,3</sup>*

*H.F. MAMEDOVA<sup>1</sup>, F.A. MAMEDOV<sup>1</sup>, S.SH. TASHPULATOV<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>Азербайджанский технологический университет, Республика Азербайджан,  
<sup>2</sup>Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Республика Узбекистан,  
<sup>3</sup>Джизакский политехнический институт, Республика Узбекистан)

<sup>1</sup>Azerbaijan Technological University, Republic of Azerbaijan,  
<sup>2</sup>Tashkent Institute of Textile and Light Industry,  
<sup>3</sup>Jizzakh Polytechnic Institute Republic of Uzbekistan)

Email: ssht61@mail.ru; fizuli.ekonomist@gmail.com

*Как известно, проблеме структурной составляющей региональной политики уделяется много внимания, но несмотря на это имеются существенные недостатки, приводящие к противоречивым тенденциям. При исследовании региональной структуры промышленности проведен детальный анализ всех факторов, которые позволили бы не только выявить особенности и закономерности, но и наиболее правильно определить стратегию дальнейшего ее совершенствования. Это будет способствовать изменению территориальных пропорций размещения производительных сил, направленных на снижение социально-экономических различий, рациональное и комплексное использование имеющихся природных, материальных и трудовых ресурсов; вовлечению имеющихся и растущих свободных трудовых ресурсов; размещению промышленных предприятий, способствующих формированию и развитию промышленных узлов и комплексов.*

*As it is known, much attention is paid to the problem of the structural component of regional policy, but despite this there are significant shortcomings that lead to contradictory trends. When studying the regional structure of industry, a detailed analysis of all factors was carried out. That would allow not only to identify features and regularities, but also to determine the strategy for its further improvement. This will contribute to changing the territorial proportions of the distribution of productive forces, aimed at reducing socio-economic differences, rational and integrated use of natural, material and labor resources which are available; involvement of existing and growing available labor resources; placement of industrial enterprises that contribute to the formation and development of industrial units and complexes.*

**Ключевые слова:** закономерность, структурные преобразования, региональная политика, трансформация.

**Keywords:** regularity, structural changes, regional policy, transformation.

Развитие страны и усиление процесса стабилизации выдвигают целесообразность повышения объективности при разработке программ экономического развития страны. Это тем самым способствует усилению учета в них существующих объективных закономерностей, для чего необходима определенная теоретическая и методологическая база для решения возникающих проблем в современных условиях развития. Решение проблем исходя из действия объективных закономерностей особенно важно при формировании региональной промышленной политики. Как отмечал в своем выступлении Президент Азербайджанской Республики И. Алиев: «В основе наших успехов лежит продуманная политика, существующая в стране общественно-политическая стабильность и успешные экономические реформы... Принятая в 2009 году программа придала импульс всему нашему экономическому развитию» [1].

Такой подход способствует проведению успешных системных преобразований и разработке современной промышленной политики для сложившихся условий в регионе. При этом целесообразно не только методологическое, но и в целом углубленное применение экономической теории к действию объективных экономических законов, закономерностей, особенностям региона и специфике промышленного производства. В научной литературе сформировалось несколько подходов к определению содержания региональной политики. Как отмечал академик Н.Н. Некрасов, «главным направлением региональной политики Советского государства является планомерное развитие экономического потенциала всей системы регионов, отвечающее экономическим и политическим задачам страны в целом с учетом интересов каждой союзной республики» [2].

Таким образом, принципиальная особенность региональной политики советского периода заключалась в ее общегосударственном характере.

Как отмечают Б.М. Штульберг и В.Г. Введенский [3], такому видению региональной политики способствовало несколько причин:

-во-первых, использование богатейших природных ресурсов является одним из важнейших направлений развития страны, поэтому проблемы освоения районов всегда входили в число основных задач региональной политики;

-во-вторых, в условиях централизованного планирования проблема обеспечения приемлемых разрывов в доходах населения между союзными республиками решалась на общесоюзном уровне путем межреспубликанского распределения финансовых ресурсов;

-в-третьих, в условиях жесткой вертикали власти межрегиональная дифференциация не оказывала существенного влияния на социально-политическую ситуацию в стране. Поэтому задача выравнивания уровней социально-экономического развития носила не столько экономический, сколько политический характер и относилась лишь к уровню союзных республик.

Региональная политика современных стран имеет несколько иное содержание. Ее целью является «сведение к минимуму тех неравенств, которые создают почву для возникновения конфликтов, мешают социально-экономическому развитию страны в целом или сближению в развитии ее частей или групп стран (например стран-членов Европейского Союза)» [4].

Ключевыми принципами, положенными в основу региональной политики, являются следующие:

- обеспечение равных прав граждан на реализацию своих возможностей и получение социальных услуг государства;

- субсидиарность как приближение к населению органов, оказывающих ему социальные услуги;

- многоцелевой характер развития, а потому выделение качества жизни, сохранения ее среды (идея «устойчивого развития») как главного критерия развития региона;

- опора на культурную самобытность регионов, учет естественных трендов социальных процессов;

- децентрализация системы регионального управления для стимулирования местной активности, опора на местную инициативу;

- поощрение развития передовых технологий, являющихся информационно-коммуникационными, неиндустриальными и т.п.;

- открытость территории (общества), оценка ее развития с учетом геоэкономического положения страны [5].

Распад Советского Союза, системная трансформация в значительной степени изменили условия формирования региональной политики. Так, ликвидация централизованной системы управления, резкое сокращение государственной собственности и формирование новых отношений, приведшее к расширению полномочий, определили необходимость разработки новой региональной политики с учетом интересов регионов и их согласования с общегосударственными интересами, а также распределения функций по реализации региональной политики между региональными уровнями управления [6].

Более четко определяется содержание региональной политики и ее место в общегосударственной политике в [3]: региональная политика – это деятельность органов государственной власти и управления по обеспечению оптимального развития регионов и решению территориальных проблем межрегионального и общегосударственного характера. Суть региональной политики заключается в том, чтобы максимально использовать в интересах всего общества благоприятные территориальные предпосылки и факторы и минимизировать

негативное влияние неблагоприятных природных и экономических условий на социально-экономическое положение отдельных регионов [7].

Как отмечают авторы [7], предметом региональной политики является обеспечение комплексного решения проблем. Региональная политика охватывает не только все стадии экономического воспроизводства региона, но и воспроизводство населения и природной среды на данной территории.

Специфика устройства любого государства, его природно-климатические, геополитические и демографические особенности, неравномерность развития регионов обуславливают необходимость их дифференциации, в частности в целях принятия соответствующих мер государственной промышленной политики. В связи с этим многие исследователи отмечают, что отказ от системы централизованного планирования и административного управления усилил процесс регионализации отечественной экономики. По мнению А.Г. Гранберга [8, 9], регион представляет собой отдельную территорию, отличающуюся от других территорий по ряду признаков и обладающую некоторой целостностью, взаимосвязанностью составляющих ее элементов.

Чтобы определиться, на каком из типов региона может и должна формироваться эффективная промышленная политика, необходимо остановиться на двух моментах. Во-первых, для реализации региональной промышленной политики нужно иметь соответствующие органы, которые могут прямо или косвенно повлиять на изменение структуры производства. Во-вторых, если говорить о промышленной политике как о структурной перестройке промышленности на основе выделения приоритетов, обусловленных сформулированными целями и задачами, логично было бы для ее выработки и реализации установить наборы инструментов государственного регулирования для каждого уровня управления. Подобный подход к региональной промышленной политике позволяет считать, что она осуществляется в рамках экономических районов, основные контуры которых задаются при-



родными условиями, специализацией в системе разделения труда, трудовыми ресурсами (их плотностью, опытом, национальным составом), транспортной освоенностью, степенью развития социальной и производственной инфраструктуры.

Неравномерность социально-экономического состояния регионов в той или иной мере свойственна всем государствам независимо от степени развития их экономики. В качестве основных причин с точки зрения межрегиональной дифференциации выделяют следующие факторы:

- экономико-географическое положение;
- природно-климатические условия;
- демографическая ситуация;
- структура и специализация отраслей хозяйства региона;
- финансовая обеспеченность.

Таким образом, экономическая (в том числе промышленная) политика на уровне региона зависит от существующего потенциала, структурных особенностей, социально-экономической ситуации. Поэтому при наличии различных данных и целей развития в конкретных регионах для каждого из них она становится индивидуальной. Для учета общей индивидуальности регионов в качестве критерия используется потенциал доходной базы. Исходя из этого регионы можно разделить на следующие группы:

- регионы-сырьевые доноры, формирующие доходы за счет ренты, и регионы-доноры, формирующие доходы за счет обрабатывающих производств;
- регионы-реципиенты;
- регионы, являющиеся сферой стратегических интересов государства.

В зависимости от группы региона должна формироваться специфическая для нее экономическая (в том числе промышленная) политика, которая призвана обеспечивать определенный уровень жизни населения. Переход от командно-распределительных к рыночным отношениям способствовал созданию определенных социально-экономических проблем вследствие наличия неодинаковой адаптационной способности регионов. В частности, проблемы

были у регионов, которые характеризовались высоким уровнем концентрации производства, значительным снижением рентабельности, обусловленным ростом транспортных расходов и инфляцией. На территории Азербайджана образовались проблемные регионы, включающие в себя слабообразованные, депрессивные и дотационные. Это требует дифференцированного подхода к региональной промышленной политике как инструменту государственного регулирования экономики. Выбор данного инструмента обуславливается ролью регионов в едином экономическом комплексе страны, так как они выступают как самостоятельные целостные системы, осуществляющие социальную функцию, т. е. обеспечение соответствующего стандартам качества жизни населения.

В зависимости от целей, то есть достижения определенного уровня качества жизни, предлагается выделить три группы регионов:

- доноры, развитые в промышленном отношении. Главной целью в настоящее время является повышение качества и уровня жизни населения хотя бы до минимальных стандартов жизни европейских стран;

- в прошлом промышленно развитые, но потерявшие свои позиции на соответствующих рынках вследствие высокой конкуренции и низкой конкурентоспособности продукции, потенциал которых позволяет при необходимых инвестициях выйти на уровень развитых регионов. В качестве важнейшей целевой функции выступает сохранение качества жизни населения при одновременном снижении (или полной ликвидации) дотаций;

- депрессивные. В таких регионах целью промышленной политики должно являться достижение среднего уровня.

В экономических районах, относящихся к различным группам с позиции целевой функции, отличаются и приоритеты структурной перестройки производства. Так, в регионах первой группы упор будет делаться на высокотехнологичные отрасли. Для территориальных образований, относящихся ко второй группе, наиболее приемле-

мым на настоящем этапе развития азербайджанской экономики будет изменение структуры в сторону производств, дающих высокий коммерческий и бюджетный эффект. Третью группу составляют по большей части регионы, где доминирует добыча разных видов сырья. В качестве приоритета здесь должно выступать развитие сырьевых отраслей, обеспечивающих минимально необходимые для реализации поставленной цели первого порядка доходы.

В настоящее время в Азербайджане, как в теории, так и на практике, имеется удовлетворительное решение проблемы осуществления комплексной многоуровневой промышленной политики, функционирующей как процесс, механизм «прямого действия», стимулирующий экономический рост и улучшение условий жизни и благосостояния населения регионов и страны в целом. Отсутствие единых механизмов в этой области приводит к ориентации органов государственной власти на интересы чиновников. Поэтому важно, чтобы региональная промышленная политика обеспечивала согласование интересов органов государственной власти и предприятий, формировала систему отношений власти и бизнеса, нацеленную на обеспечение в регионе и стране в целом условий для экономического роста и развития.

Суть механизма региональной промышленной политики основывается на распределении приоритетов развития предприятий, региональной экономики и обеспечения экономического роста предприятий на группы большого, среднего и меньшего благоприятствования, а также достижении баланса взаимоотношений органов государственной власти и предприятий на основе их положения в данных группах. Тем самым отношения органов государственной власти и предприятий базируются на долгосрочной и объективной основе. Предприятия получают более стабильную среду функционирования и могут прогнозировать различные аспекты своей деятельности, если они в той или иной степени зависят от органов власти.

К стратегическим задачам региональной политики, на наш взгляд, следует отне-

сти создание стабильной среды функционирования и развития бизнеса, в которой каждое предприятие получает поддержку региональных властей; стабильный экономический рост предприятий и экономики региона в целом, в том числе за счет:

- обеспечения соответствующей структуры экономики региона;

- диверсификации и кооперации отдельных предприятий и региональных промышленных комплексов;

- активизации инвестиционной деятельности и повышения конкурентоспособности продукции предприятий региона.

Основной целью развития промышленности в регионах в рамках реализации структурно-промышленной политики остается повышение конкурентоспособности продукции и технического уровня производства, обеспечение выхода инновационной продукции и высоких технологий на внутренний и внешний рынок, замещение импортной продукции и перевод на этой основе инновационно-активного промышленного производства в стадию стабильного роста.

Понятие промышленной политики как системы мер, направленных на развитие экономики, новейших технологий и продуктов с высокой степенью обработки, современных информационных и других услуг, человеческого капитала, является узким. Это исходит из того, что оно не характеризует место промышленной политики в экономической политике государства, а рассматривается как часть структурной политики или подсистемы социально-экономической политики государства.

Целесообразно определить промышленную политику с точки зрения теории воспроизводства, представляющей собой систему управления факторами промышленного производства в целях повышения его эффективности и формирования структуры промышленности на данном этапе и способствующей поддержанию расширенного воспроизводства в будущем. Сложившиеся условия развития расширяют понятие промышленной политики, так как идет процесс становления инновационной экономики. С учетом этого можно дать следующее опре-

деление промышленной политики: промышленная политика – это не просто определение приоритетов развития, а целостная система законодательных, административных, финансово-экономических решений, мер и действий по управлению динамикой развития экономики для обеспечения устойчивого социально-экономического роста и развития и национальной безопасности страны. Важно не очерчивать основные направления промышленной политики, а конкретно предложить механизм принятия решений по их реализации.

Основными направлениями структурной перестройки является: текущая модернизация и стимулирование экономического роста; обеспечение в долгосрочном плане конкурентоспособности отечественного производства, занятости экономически активного населения в качестве основ устойчивого экономического развития страны. Для достижения поставленных целей целесообразно решение региональных проблем. Особое внимание правительством Азербайджана уделяется решению региональных проблем, и разработанная стратегия регионального развития нашла свое отражение в Государственных программах социально-экономического развития регионов на 2013-2018 гг. и на 2019-2023 гг. Но несмотря на все это имеются определенные проблемы, решение которых нецелесообразно откладывать. Они следующие: не проработан план, посвященный аналитическому обзору развития региона и анализу проблем социально-экономического развития региона (отсутствие необходимой информации в документации – современном генеральном плане региона, паспорте региона); поставленные цели не всегда реально реализуются; отсутствие регионального маркетинга; сильная заинтересованность в получении средств из бюджета, хотя есть реальная возможность привлечения инвестиций для создания необходимых условий производства и опора на собственные ресурсы. Можно предложить форму Паспорта Программы социально-экономического развития региона, способствующей достижению поставленного приоритета – повы-

шения благосостояния населения и ускоренного развития социальной инфраструктуры в результате существенного прогресса реального сектора экономики. При этом точками роста станут развитие человеческого потенциала (улучшение здоровья, повышение уровня образования и квалификации населения); процесс инновационной составляющей; активизация инвестиционной деятельности.

За трансформационный период сменилось несколько концепций промышленной политики, но не были созданы конкретные механизмы реализации региональной промышленной политики. Поэтому эти реформы продолжают и вступают в качественно новый этап [7].

Региональная политика формирует и реализует стратегические цели и приоритеты развития промышленности, обеспечивает конкурентоспособность и эффективность производства, занятость экономически активного населения как основы экономического роста страны. «На первом этапе основное внимание было направлено на расширение бизнес-возможностей и формирование промышленного потенциала. С этой целью в первую очередь должны были быть решены вопросы электроэнергетики. Поэтому мы предусмотрели этот вопрос как приоритетный и смогли за короткое время обеспечить свою энергетическую безопасность... На следующем этапе начался процесс реализации инфраструктурных проектов» [7].

При разработке промышленной политики региона важно выявить условия, способствующие или обеспечивающие устранение негативных факторов развития промышленности. Они следующие:

- неполное и неэффективное использование реально имеющегося сырьевого потенциала региона;
- низкий уровень инвестиционной и инновационной активности отраслей предприятий региона;
- низкий технико-технологический уровень производства;
- недостаточная обеспеченность собственными средствами на техническое и технологическое обновления;

- низкий уровень производительности труда;

- финансовая неустойчивость многих промышленных предприятий и др.

Методами промышленной политики являются: информационные; институциональные; ресурсные; методы макроэкономического регулирования. Эффективное проведение промышленной политики предполагает не только ослабление негативных, но и использование позитивных факторов развития промышленности региона. Появляется необходимость в закреплении положительных тенденций развития, возникающих в экономике. Это прежде всего проведение активной промышленной политики. «Если общее экономическое развитие составило примерно 1%, ..., то наша не нефтяная экономика выросла более чем на 10 %. Идет мощный процесс индустриализации... Созданные и создаваемые новые промышленные предприятия будут определять нашу долгосрочную стратегию развития... Создание предприятия – это рабочие места, заработная плата, местное производство, возможности для замещения импорта, развития, оживления нашей страны». Идет не только рост промышленного производства, но и осуществляются определенные структурные преобразования на отраслевом и внутриотраслевом уровнях, соответствующие требованиям мирового рынка, прогрессивные изменения материально-технической базы предприятий, усиливается роль перерабатывающих отраслей, использующих достижения науки и техники и др.

Целесообразна переориентация промышленной политики в области развития топливно-сырьевого комплекса на наращивание производственных отраслей нового качественного содержания. Основным условием при этом является привлечение внешних инвесторов. «В Азербайджан вкладываются крупные инвестиции. Это очень позитивное явление. Мы приветствуем зарубежные инвестиции. Наше успешное экономическое развитие началось именно благодаря инвестициям, поступающим из-за рубежа. Подписание «Контракта века» принесло Азербайджану известность в мире, но в первое время ино-

странные компании, конечно же, не хотели вкладывать инвестиции в не нефтяной сектор... Мы направили доходы от реализации нефти в не нефтяной сектор, и, таким образом, государство взяло на себя груз инвестиций».

Известно, что на сложившуюся благоприятную экономическую ситуацию в большей степени повлияли и влияют как рост мировых цен на энергоресурсы, так и сравнительно низкие внутренние цены. Эти факторы являются краткосрочными и противоречивыми, что выдвигает задачу использования более долгосрочных факторов экономического роста, к которым можно отнести факторы инвестиционной и инновационной динамики. Это находит подтверждение в том, что по существу структурные изменения в промышленности осуществляются инвестициями и инновациями, без которых невозможно совершенствовать материально-техническую базу, внедрять новую или улучшать выпускаемую продукцию, определять новые ниши экономического развития. Основным механизмом развития стала государственная инвестиционная программа, в инвестиционном пакете которой преобладают внутренние инвестиции.

Как отмечалось выше, развитие и становление рыночных отношений, проведение экономических реформ привели к возрастанию роли региона в экономике страны. Каждый регион Азербайджана характеризуется присущими ему природными ресурсами, национальными и историческими чертами, структурой хозяйства, уровнем экономического развития, специализацией. Вследствие наличия ограниченных условий для экономического роста и поддержания относительно высоких темпов хозяйственного развития без соответствующих структурных сдвигов необходимо искать решение важнейших социально-экономических задач главным образом на пути интенсификации структуры, то есть усиления тенденции к глубокой внутренней перестройке. Этим создается возможность становления современной структуры, направленной на создание универсального набора отраслей и производств, удовлетворяющих не только внутренний,

но и внешний рынок. Создается база для формирования наукоемких отраслей и производств, которые не требуют напряжения материально-энергетических ресурсов и приводят к повышению роли интенсивных факторов развития.

Имеющиеся факторы определяют стратегическую направленность промышленной политики региона на реальное превращение сложившихся доходов в источник инвестиций отраслей, способствующих техническому и технологическому перевооружению промышленности и повышению конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках с учетом действия объективных экономических законов применительно к определенному региону в конкретный исторический период. Также географическая среда и связанное с ней геополитическое положение страны в совокупности отражают потенциальные возможности развития регионов в части усиления внешнеэкономических связей и укрепления межрегиональной кооперации на уровне отдельных промышленных предприятий.

Различные факторы, оказывающие влияние на рациональное размещение отраслей промышленности, можно сгруппировать следующим образом: экономические, природные, включающие экономическую оценку отдельных природных условий и ресурсов для развития отдельных отраслей и регионов; демографические (расселение, обеспеченность отдельных регионов страны трудовыми ресурсами); социальная инфраструктура.

При исследовании региональной структуры промышленности необходим детальный анализ влияния всех факторов, которые позволили бы не только выявить особенности и закономерности, но и наиболее правильно определить стратегию дальнейшего ее совершенствования. Это будет способствовать:

- изменению территориальных пропорций размещения производительных сил, направленных на снижение социально-экономических различий, рациональное и комплексное использование имеющих природных, материальных и трудовых ресурсов;

- вовлечению имеющихся и растущих свободных трудовых ресурсов;

- размещению промышленных предприятий, способствующих формированию и развитию промышленных узлов и комплексов и т.д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Выступление президента Азербайджанской Республики И. Алиева на конференции, посвященной итогу третьего года реализации «Государственной программы социально-экономического развития регионов Азербайджанской Республики в 2009-2013 годах», 28.02.2012.
2. Некрасов Н.Н. Региональная экономика. М.: Экономика, 1978. 343 с.
3. Региональная политика России: теоретические основы, задачи и методы реализации / Б.М. Штульберг, В.Г. Введенский. М.: Гелиос АРВ, 2000. 206 с.
4. Ларина Н.И. Мировой опыт региональной политики. Новосибирск, 1996. 70 с.
5. Княгинин В. Государственная политика регионального развития. М.: Россия, 2006. С. 380.
6. Шумпетер И.А. Капитализм, социализм и демократия. М., 1995. С. 103.
7. Джабиев Р.М. Социально-экономическое развитие Азербайджанской Республики за годы независимости. Баку, 2005.
8. Гранберг А.Г. Основы региональной экономики. 5-е изд. М.: Издательский дом ГУВШЭ, 2006.
9. Гранберг А.Г. Моделирование пространственного развития экономики // Регион: Экономика и социология. 2009. № 9.

#### REFERENCES

1. Speech by the President of the Republic of Azerbaijan I. Aliyev at the conference dedicated to the results of the third year of the implementation of the "State Program for the Socio-Economic Development of the Regions of the Republic of Azerbaijan in 2009-2013", 28.02.2012.
2. Nekrasov N.N. Regional economy. M.: Economy, 1978. 343 p.
3. Regional policy of Russia: theoretical foundations, objectives and methods of implementation / B.M. Shtulberg, V.G. Vvedensky. M.: Helios ARV, 2000. 206p.
4. Larina N.I. World experience of regional economy. Novosibirsk, 1996. 70 p.
5. Knyagin V. State policy of regional development, Publishing House of Russia. M., 2006. P. 380.
6. Schumpeter I.A. Capitalism, socialism and democracy. M., 1995. P. 103.
7. Dzhabiev R.M. Socio-economic development of the Azerbaijan Republic during the years of independence. Baku, 2005.

8. Granberg A.G. Fundamentals of regional economics. 5th ed. M.: Publishing house of the State University-Higher School of Economics, 2006.

9. Granberg A.G. Modeling the spatial development of the economy // Region: Economics and Sociology. 2009. No. 9.

Поступила 23.01.23.

УДК 658.56:655  
DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_38

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ЭКСПЕРТНЫМ МЕТОДОМ

### PRODUCT QUALITY ASSESSMENT BY EXPERT METHOD

Х.А. БАБАХАНОВА, А.А. САОДАТОВ, М.Э. ХАСАНОВА, С.Р. КАМАЛОВА

Kh.A. BABAKHANOVA, A.A. SAODATOV, M.E. HASANOVA, S.R. KAMALOVA

(Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности)

(Tashkent Institute of Textile and Light Industry)

E-mail: halima300@inbox.ru

*В статье оценено качество многокрасочных оттисков, в число которых входит листовая, этикеточно-упаковочная и деловая продукция, с помощью квалиметрического анализа с применением экспертного метода. С учетом требований квалиметрии построена иерархическая схема показателей качества печати. В результате проведенных исследований выявлены весомые показатели, которые образуют качество продукции. Самыми важными показателями определены фактура поверхности отпечатка (коэффициент весомости – 0,222) и воспроизведение памятных цветов (0,216). Экспертным путем определены коэффициенты весомости для каждого показателя свойства с целью ранжирования по степени их вклада в общую картину качества печатного оттиска.*

*The article assesses the quality of multi-color prints, which include sheet, label and packaging and business products, with a help of qualimetric analysis using an expert method. A hierarchical scheme of print quality indicators based on the requirements of qualimetry was built. As a result of the research, significant indicators which form the quality of products were identified. The most important indicators are the texture of print surface (the weight coefficient is 0.2220) and the reproduction of memorable colors (0.2160). The weight coefficients for each property indicator were determined by expert means in order to rank according to the degree of their contribution to the overall picture of the quality of the printed impression.*

**Ключевые слова:** квалиметрия, оценка качества печатной продукции, экспертный метод, показатели качества, офсетная печать, оттиск.

**Keywords:** qualimetry, quality assessment of printed products, expert method, quality indicators, offset printing, print.

## *Введение*

Качество продукции предопределяет и способствует повышению покупательского спроса и удовлетворению нужд потребителей. В связи с этим производители стремятся не только увеличивать объем производства, но и использовать эффективные инновационные технологии продвижения продукции.

К важным критериям успеха компаний-производителей согласно требованиям современного рынка относится выпуск стабильно качественной продукции, что требует использования различных методик оценки качества, основанных на квалиметрическом анализе. Преимуществом использования данного метода по утверждению Г.Г. Азгальдова является то, что выявляются весомые показатели, которые образуют качество объекта [1-2].

В области полиграфии для оценки качества печатной продукции широко применяется квалиметрический метод [3-9]. Данный метод предполагает обработку результатов экспериментальных исследований, экспертных оценок и экономических показателей. Таким образом, выявляются скрытые проблемы, решение которых приводит к совершенствованию технологии производства, повышению качества продукции и эффективности технологии ее продвижения на рынке.

Экспертный метод определения весомых показателей качества позволяет принимать обоснованные решения, опираясь на опыт, знания и интуицию специалистов [10-13]. При этом используемые объекты на тестовой полосе должны измеряться с помощью доступных для полиграфических предприятий средств (лупа, спектрофотометр и др.) [14-16].

Офсетный способ печати, один из традиционных контактных способов, широко распространен благодаря использованию высокоскоростных автоматизированных печатных машин, обеспечивающих точ-

ность воспроизведения мелких деталей, передачу полутонов и экономичность, от ведущих лидеров-производителей таких зарубежных стран, как Германия, Япония, США, Индия, Китай и др.

Таким образом, в связи с широким применением офсетной печати встал вопрос об оценке качества многокрасочных оттисков и обеспечении соответствия оригинала оттиску. Несмотря на наличие международных стандартов в этой отрасли и многочисленных исследований возможности применения квалиметрических методов при оценке многокрасочной офсетной печати таких ученых, как В.В. Лихачев [17-20], Н.В. Качин-Хрисимова [21], Е.А. Никанчикова [22], до сих пор нет универсальной методики анализа многокрасочных оттисков, так как используется широкий ассортимент запечатываемых материалов и различные по конструкции и техническим характеристикам печатные машины. Одним из перспективных решений этой проблемы является использование экспертного метода, основанного на мнении специалистов (экспертов) – лиц, обладающих профессиональным, научным и практическим опытом. Использование экспертного метода позволит выявить самые весомые показатели, что даст возможность оперативно и объективно оценить качество многокрасочных оттисков, в число которых входит листовая, этикеточно-упаковочная и деловая продукция (буклеты, листовки, флайера и т.п.), а это является актуальным.

*Экспериментальная часть.* В данной работе для оценки качества многокрасочных оттисков используется экспертный метод и следующие показатели качества: оптическая плотность фона, равномерность печати, градационная передача, оптическая плотность изображения, разрешение печати, разрешающая способность, цветовой охват, воспроизведение памятных цветов. С учетом требований квалиметрии построена иерархическая схема показателей качества печати (рис. 1).

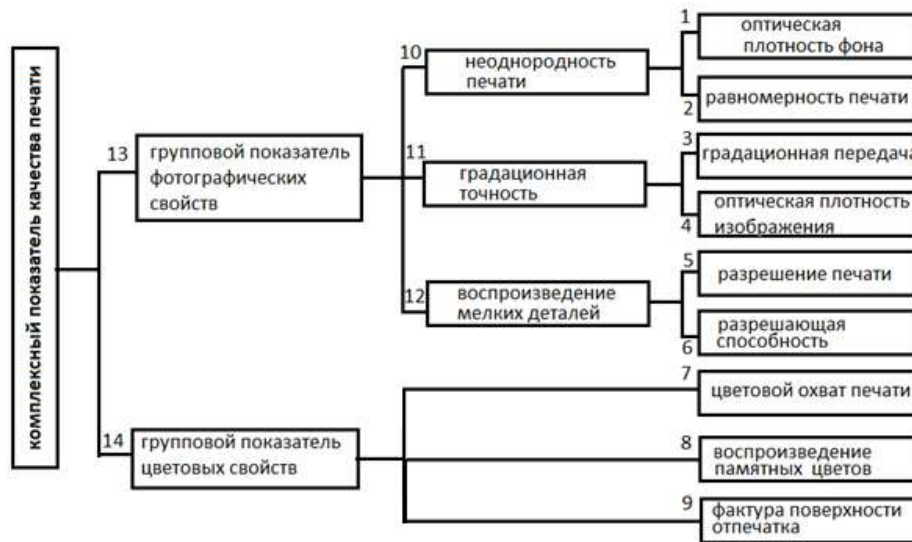


Рис. 1

Разработанная тестовая полоса включала все необходимые элементы для контроля качества многокрасочных оттисков. Все векторные элементы тестовой полосы созданы в программе обработки векторных изображений CorelDRAW, растровые – в программе Adobe Photoshop, а верстку тестовой полосы производили в программе QuarkXPress. Полученный файл сохранили в формате PDF. Формат тестовой полосы соответствовал формату печати, в данном случае формату А3 – 420x297 мм.

Разработанная методика комплексной оценки качества опробована на офсетной листовой печатной машине SM-74 фирмы Heidelberg (Германия) в условиях издательско-полиграфической акционерной компании «Шарк» (Узбекистан).

В процессе печати осуществлялся последовательный перенос цветоделённых изображений на лист бумаги, который удерживался на печатном цилиндре при помощи системы захватов.

После печати согласно методике члены сформированной экспертной группы – печатники с большим практическим опытом в полиграфической отрасли – получили бланк индивидуальной анкеты и в установленные сроки прислали свои ответы. В результате обработки данных анкет определены значения групповых ненормированных коэффициентов весомости показателей качества печати.

Согласованность мнений экспертов оценивали по величине коэффициента вариации, который вычисляли по формуле:

$$V_j = \frac{\sigma_j}{\rho_j}$$

где  $\sigma_j$  – среднее квадратичное отклонение коэффициента весомости показателя качества;  $\rho_j$  – средний коэффициент весомости j-го показателя качества.

По значениям коэффициентов вариации построена диаграмма (рис. 2). Если коэффициент вариации от 0,11 до 0,15, согласованность выше средней, от 0,16 до 0,25 – средняя, от 0,26 до 0,35 – ниже средней, если 0,35 – низкая. Как видно из рис. 2, мнения девяти экспертов удовлетворительны.

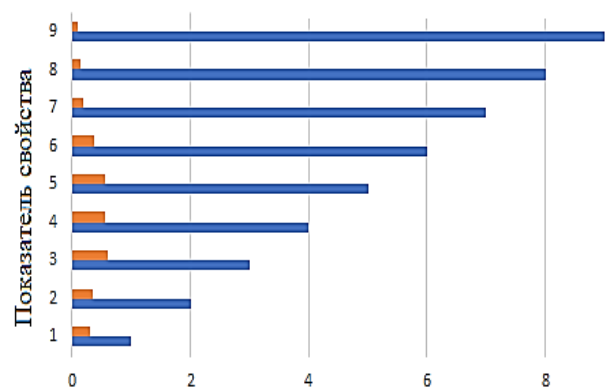


Рис. 2



В практике статистических исследований, когда совокупность объектов характеризуется не двумя, а несколькими последовательностями рангов, необходимо установить статистическую связь между несколькими переменными. В качестве такого измерителя используют множественный коэффициент корреляции (коэффициент конкордации) рангов Кендалла, определяемый по следующей формуле:

$$W = \frac{12D}{m^2 [n^3 - n]}, \quad (1)$$

где  $W$  – коэффициент конкордации;  $D$  – сумма квадратов рангов;  $n$  – число объектов ранжируемого признака (число экспертов);  $m$  – число анализируемых порядковых переменных;

$$W = 12 \times 3496 / 9^2 \times (9^3 - 9) = 41952 / 81 \times 720 = 41952 / 58320 = 0.7193$$

На основании расчетных данных принимаем решение о том, что экспертный опрос состоялся, и в проведении второго тура голосования необходимости нет.

На следующем этапе согласно рекомендациям Азгальдова Г.Г. рассчитаны ярусные коэффициенты весомости (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

№ свойств	Значения групповых коэффициентов весомости $G_i$				Ярусные коэф. весомости $G_i$
	Ср. значение коэф. весомости	Сумма ср. значений групповых коэф. весомости	Нормирование коэф. весомости	Проверка условия нормированности	
1	6,22	10,66	0,58	1,00	0,0812
2	4,44		0,42		0,0588
3	2,33	4,11	0,57	1,0	0,0319
4	1,78		0,43		0,0241
5	3,67	7,78	0,47	1,0	0,0959
6	4,11		0,53		0,1081
10	5,33	15,17	0,35	1,0	0,1400
11	2,06		0,14		0,0560
12	7,78		0,51		0,2040
7	6,11	22,44	0,27	1,0	0,1620
8	8,11		0,36		0,2160
9	8,22		0,37		0,2220
13	5,06	12,54	0,40	1,0	
14	7,48		0,60		

На рис. 3 (дерево свойств показателей качества с указанием ярусных и групповых коэффициентов весомости) наглядно показаны все промежуточные значения коэффи-

циентов, необходимые для расчета коэффициентов весомости для каждого показателя по всему дереву свойств. Например, для свойства 1 коэффициент весомости рассчитан следующим образом:

$$G_i = 0.58 \times (0.40 \times 0.35) = 0.58 \times 0.14 = 0.0812.$$

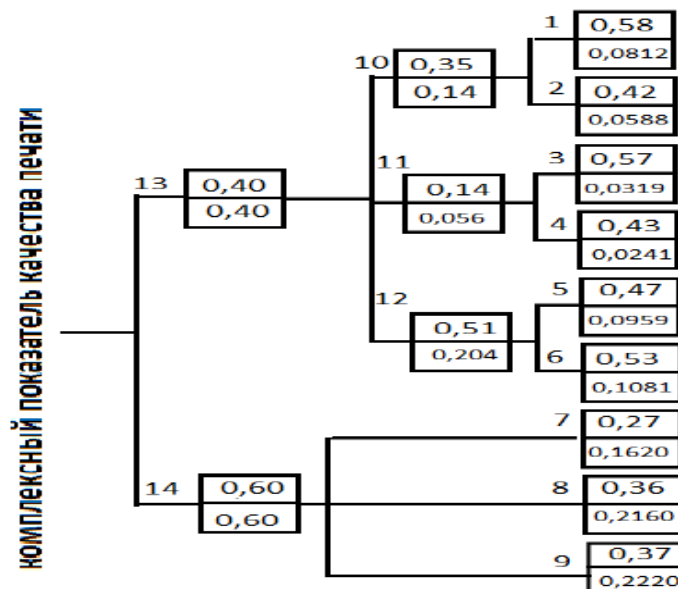


Рис. 3

Аналогичным образом рассчитаны коэффициенты весомости для каждого пока-

зателя (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

№ показателя свойства	Показатель свойства	Коэффициент весомости
9	Фактура поверхности отпечатка	0,2220
8	Воспроизведение памятных цветов	0,2160
7	Цветовой охват печати	0,1620
6	Разрешающая способность	0,1081
5	Разрешение печати	0,0959
1	Оптическая плотность фона	0,0812
2	Равномерность печати	0,0588
3	Градационная передача	0,0319
4	Оптическая плотность изображения	0,0241

Очевидно, что для выбранной группы экспертов важна равномерность печати, поскольку учитывает сплошность запечатки плашек, правильное воспроизведение цветов (основных и памятных) – одно из важнейших требований к качеству печати. Меньше внимания при оценке качества, по мнению членов экспертной группы, стоит уделять наличию фона на отпечатке, воспроизведению мелких деталей, передаче полутонов, плотности изображения. Перечисленные показатели свойств попали во вторую половину таблицы, по-видимому, потому, что их значения на оттиске удовлетворяют требованиям современного заказчика.

## В Ы В О Д Ы

В результате применения экспертного метода выявлены весомые показатели качества офсетной печати. Самыми важными показателями определены фактура поверхности отпечатка (коэффициент весомости – 0,2220) и воспроизведение памятных цветов (0,2160). Экспертным путем определены коэффициенты весомости для каждого показателя свойства с целью ранжирования по степени их вклада в общую картину качества печатного оттиска.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Азгальдов Г.Г.* Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). М.: Экономика, 1982. 256 с.
2. *Оглезнева Л.А.* Квалиметрия: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2012. 215 с.
3. *Каган Б.В.* Проблемы качества отечественной печати // Компьютер. 2005. №11.
4. *Егорова И.Н., Шеремет Е.А.* Разработка системы комплексной оценки качества цифровой печати // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. №3-4 (39). С.15...17.
5. *Долгова Т.А.* Квалиметрическая оценка качества упаковки // Труды БГТУ. 2015. №9. С.61...65.
6. *Комаров Д.М.* Применение квалиметрического метода для оценки качества упаковок // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 7. С. 274...279.
7. *Бабаханова Х.А., Файзиева С.М.* Применение экспертного метода выбора показателей для оценки качества печатной продукции // Вестник ТашГТУ. 2017. №3. С. 187...191.
8. *Бабаханова Х.А., Галимова З.К., Бабаханова М.А.* Определение весомостей показателей качества печатной продукции // Вестник ТашГТУ. 2018. №2. С. 197...202.
9. *Бабаханова Х.А., Галимова З.К., Турапова Д.* Оценка качества офсетной печати на мелованных видах картона // Композиционные материалы. Ташкент, 2019. №4. С. 119...122.
10. *Орлов А.И.* Современный этап развития теории экспертных оценок // Заводская лаборатория. 1996. №1.
11. *Шевелева Г.И.* Контроль качества продукции: учебное пособие. Кемерово, 2004. 142 с.
12. *Лысова М.А., Грузинцева Н.А., Кусенкова А.А., Гусев Б.Н., Калинин Е.Н.* Ранжирование показателей качества геосинтетических материалов с применением теории нечетких множеств // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2019. №3 (381). С. 41...45.
13. *Грузинцева Н.А., Воробьева Е.В., Гусев Б.Н.* Квалиметрическая оценка производственного потенциала текстильного предприятия // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. №3. С. 5...7.
14. *Аристов О.В.* Управление качеством. М.: ИНФРА-М, 2003. 211 с.
15. *Соболева И.А.* Обеспечение качества: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 62 с.
16. *Азгальдов Г.Г.* Квалиметрия в архитектурно-строительном проектировании. М.: Стройиздат, 1989. С. 100...102.
17. *Лихачев В.В.* Квалиметрия печатного процесса: учебное пособие по курсу «Стандарты и качество». М.: Изд-во МПИ, 1980.
18. *Лихачев В.В.* Метрология в полиграфии: учебное пособие. М.: Изд-во МПИ, 1990.

19. *Лихачев В.В.* Метрология и стандартизация. Ч. 2. Квалиметрия печатного изображения: учебное пособие. М.: Мир книги, 1998.
20. *Лихачев В.В.* Точность представления градационной передачи цифровыми методами // Технология печатных и послепечатных процессов: межвед. сб. науч. тр. М.: МГУП, 2002. С. 90...94.
21. *Качин-Хрисимова Н.Б.* Исследование возможности применения квалиметрических методов к оценке многокрасочной офсетной печати: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. М.: МГУП, 1977.
22. *Никанчикова Е.А.* Исследование разрешающей и выделяющей способности офсетной печати применительно к воспроизведению текста совместно с иллюстрациями. М., 1957.

## REFERENCES

1. *Azgaldov G.G.* Theory and practice of assessing the quality of goods (basics of qualimetry). M.: Economics, 1982. 256 p.
2. *Oglezneva L.A.* Qualimetry: textbook. Tomsk: Tomsk Polytechnic Publishing House. Univ., 2012. 215 p.
3. *Kagan B.V.* Problems of quality of domestic printing // Computer Art. 2005. No. 11.
4. *Egorova I.N., Sheremet E.A.* Development of a system for comprehensive assessment of the quality of digital printing // East European Journal of Advanced Technologies. 2009. No. 3-4 (39). P.15...17.
5. *Dolgova T.A.* Qualimetric assessment of packaging quality // Proceedings of BSTU. 2015. No. 9. P.61...65.
6. *Komarov D.M.* Application of the qualimetric method for assessing the quality of packaging // News of Tula State University. Technical science. 2022. Issue. 7. P. 274...279.
7. *Babakhanova Kh.A., Fayzieva S.M.* Application of the expert method for selecting indicators for assessing the quality of printed products // Bulletin of Tashkent State Technical University. 2017. No. 3. pp. 187...191.
8. *Babakhanova Kh.A., Galimova Z.K., Babakhanova M.A.* Determination of the weight of quality indicators of printed products // Bulletin of Tashkent State Technical University. 2018. No. 2. pp. 197...202.
9. *Babakhanova Kh.A., Galimova Z.K., Turapova D.* Assessment of the quality of offset printing on coated types of cardboard // Composite materials. Tashkent, 2019. No. 4. pp. 119...122.
10. *Orlov A.I.* The current stage of development of the theory of expert assessments // Factory Laboratory. 1996. No.1.
11. *Sheveleva G.I.* Product quality control: training manual. Kemerovo, 2004. 142 p.
12. *Lysova M.A., Gruzintseva N.A., Kusenкова A.A., Gusev B.N., Kalinin E.N.* Ranking of quality indicators of geosynthetic materials using the theory of fuzzy sets // Izv. universities Textile industry technology. 2019. No. 3 (381). pp. 41...45.

13. *Gruzintseva N.A., Vorobyova E.V., Gusev B.N.* Qualimetric assessment of the production potential of a textile enterprise // *Izv. universities Textile industry technology*. 2011. No. 3. S. 5...7.
14. *Aristov O.V.* Quality control. M.: INFRA-M, 2003. 211 p.
15. *Soboleva I.A.* Quality assurance: textbook. allowance. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2002. 62 p.
16. *Azgal'dov G.G.* Qualimetry in architectural and construction design. M.: Stroyizdat, 1989. P. 100...102.
17. *Likhachev V.V.* Qualimetry of the printing process: a textbook for the course "Standards and Quality". M.: Publishing house MPI, 1980.
18. *Likhachev V.V.* Metrology in printing: a textbook. M.: Publishing house MPI, 1990.
19. *Likhachev V.V.* Metrology and standardization. Part 2. Qualimetry of printed images: textbook. M.: World of Books, 1998.
20. *Likhachev V.V.* Accuracy of representation of gradation transfer by digital methods // *Technology of printing and post-printing processes: interdisciplinary. Sat. scientific tr.* M.: MGUP, 2002. P. 90...94.
21. *Kachin-Khrisimova N.B.* Study of the possibility of applying qualimetric methods to the assessment of multicolor offset printing: abstract of thesis. dis. ...cand. tech. Sciences: 02/05/13. M.: MGUP, 1977.
22. *Nikanchikova E.A.* Study of the resolution and highlighting ability of offset printing in relation to the reproduction of text together with illustrations. M., 1957.

Поступила 29.05.23.

---

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_45

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ ЛЬНЯНОГО ВОЛОКНА  
ПРИ ЕГО ПРОГИБЕ\*****DETERMINING THE BENDING STIFFNESS OF FLAX FIBER  
IN ITS DEFLECTION**А.В. ОРЛОВ<sup>1</sup>, Е.Л. ПАШИН<sup>2</sup>A.V. ORLOV<sup>1</sup>, E.L. PASHIN<sup>2</sup><sup>1</sup>Костромской государственной университет,  
<sup>2</sup>Костромская государственная сельскохозяйственная академия)<sup>1</sup>Kostroma State University,  
<sup>2</sup>Kostroma State Agricultural Academy)

E-mail: aorlov@list.ru

*При определении изгибной жесткости пряди льняного волокна с использованием метода трехточечного прогиба с повышенной кривизной требуется выбор координат точек ее расположения на поверхности цилиндрических опор. Поиск этих координат предложено осуществлять посредством оптимизации функции ошибки из двух составляющих: величин линейного и углового отклонения линии пряди от касательной к поверхности опоры в предполагаемой точке контакта. Нахождение минимума функции ошибки обеспечивает определение корректного значения изгибной жесткости Е<sub>г</sub>. При поиске минимума применен безградиентный метод оптимизации Нелдера-Мида. В качестве начального приближения изгибной жесткости принята ее величина, определенная по стандартному способу испытания гибкости лубяных волокон – путем прогиба закрепленных в виде консоли участков пряди определенной длины и массы под действием силы тяжести. Вследствие наличия только одного минимума функции ошибки в рассматриваемом диапазоне значений изгибной жесткости и угла наклона касательной к оси, соединяющей центры опор, обеспечивается одно стабильное решение при определении искомой изгибной жесткости.*

*When determining bending stiffness of a flax fiber strand using three-point bending method, it is necessary to select the coordinates of its location points on the surface of the cylindrical supports. It is proposed to search for these coordinates by optimizing the error function of two components: the magnitude of the*

\* Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-26-00147).

*linear and angular deviation of the strand line from the tangent to the support surface at the assumed point of contact. Finding the minimum of the error function ensures that the correct value of the bending stiffness EJ is determined. As an initial approximation of flexural stiffness, its value was taken, determined by the standard method of testing the flexibility of bast fibers - by bending sections of strands of a certain length and mass fixed in the form of a cantilever under the influence of gravity. Due to the presence of only one minimum of the error function in the considered range of values of bending stiffness and the angle of inclination of the tangent to the axis connecting the centers of the supports, one stable solution is provided when determining the required bending stiffness.*

**Ключевые слова:** льняное волокно, изгибная жесткость, испытание, трехточечный прогиб, опоры, контакт пряди, координата точки контакта, оптимизация, минимальная ошибка.

**Keywords:** bending stiffness, testing, three point bending, supports, point of contact, flax fiber, error minimization.

При поиске направлений совершенствования стандартного способа измерения изгибной жесткости льняного волокна [1, 2] с учетом его недостатков [3] предложен вариант испытания путем трехточечного прогиба [4], основанный на выявлении параметров упругой линии пряди в виде отрезка определенной длины и массы [5] (рис. 1).

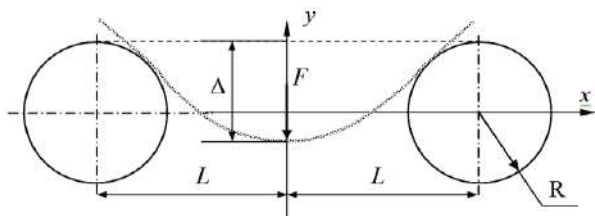


Рис. 1

При выявлении параметров упругой линии приняли во внимание наличие в

$$EJ \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} = \Sigma M_{kz}, \text{ или } EJ \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} = R_{oy}x - R_{ox}y - M_o, \quad (1)$$

где EJ – изгибная жесткость пряди, иные параметры выражения (1) указаны в [5].

схеме нагружения оси симметрии (ось y). Поэтому для определения изгибной жесткости рассматривали только часть пряди, лежащую справа от оси y. Тогда часть пряди OB можно считать жестко заделанной в сечении O (рис. 2).

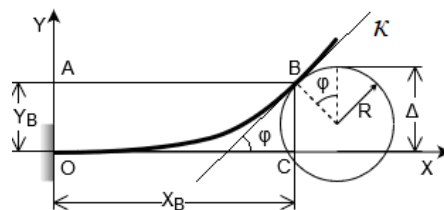


Рис. 2

При расчетах использовали известные выражения, вытекающие из нелинейной теории изгиба [6]:

С использованием численного метода Эйлера [7] получено итоговое решение:

$$y_{i+2} = 2y_{i+1} - y_i + (R_{oy}x_i - R_{ox}y_i - M_o) \cdot \left( 1 + \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right)^{3/2} \cdot \frac{\Delta x^2}{EJ}. \quad (2)$$

При анализе (2) установлено, что при значительных прогибах с повышенной кривизной оси пряжи требуется определение оптимальных координат точки контакта волокна с поверхностью цилиндрической опоры [5]. Зная эти координаты, изгибную жесткость можно будет определить более точно в сравнении с вариантом анализа [8], при котором в условиях повышенных прогибов осуществляется уточнение результатов на основе использования эмпирической зависимости.

Указанный выбор координат обусловлен необходимостью корректного определения изгибной жесткости  $EJ$  с использованием выражения (2) на основе поиска угла  $\varphi$ , при котором функция  $y(x)$  одновременно проходила бы через точку контакта (то есть через точку  $B$  с координатами:  $x_B = LR \sin \varphi$  и  $y_B = \Delta - R(1 - \cos \varphi)$ ) и имела касательную  $K$ , совпадающую с заданной точностью с касательной в т.  $B$  к поверхности опоры (рис. 2).

Такая процедура определения  $EJ$  вносит существенную неопределенность при подборе указанных параметров  $x_B$ ,  $y_B$ ,  $\varphi$ , что значительно усложняет расчеты.

Для упрощения алгоритма расчета предложено считать указанную процедуру подбора требуемых параметров двухпараметрической оптимизационной, требующей реализации на основе метода последовательных приближений. Это вытекает из понимания, что отклонение  $\varepsilon$  фактического места соприкосновения от точки  $B$  является функцией двух переменных: изгибной жесткости  $EJ$  и угла  $\varphi$ . При нахождении минимума функции  $\varepsilon(EJ, \varphi)$  обеспе-

чивается наиболее точное определение изгибной жесткости  $EJ$ .

Успех поиска минимума функции  $\varepsilon(EJ, \varphi)$  требует корректного выбора ее физической сущности. Для этого ограничим возможные значения этой функции диапазоном  $[0; 1]$ . Исходим из того, что отклонение  $\varepsilon$  будет представлять ошибку получаемого результата. Она является интегральной и складывается из двух составляющих: величины  $\varepsilon_{xy}(EJ, \varphi)$  в виде линейного отклонения фактического контакта от точки  $B$  и величины  $\varepsilon_\varphi(EJ, \varphi)$  – отклонения угла наклона касательной к пряже в этой точке от угла  $\varphi$ .

Определение  $\varepsilon_{xy}(EJ, \varphi)$  затрудняется тем, что при достаточно малых значениях  $EJ$  отклонение фактического места соприкосновения пряжи от точки  $B$  может достигать экстремальных величин, что должно учитываться при поиске условий  $\varepsilon \rightarrow \min$ . Для исключения этого предложено расчет формы упругой линии пряжи, как последовательности точек  $(x_i, y_i)$ , продолжать до тех пор, пока последняя рассмотренная точка  $D(x, y)$  не будет выходить за пределы прямоугольника  $OABC$  (см. рис. 1) с выполнением соотношений  $x < X_B$  и  $y < Y_B$ .

При таких условиях возможны два нежелательных исхода, варианты которых представлены на рис. 3. В случае малых значений  $EJ$  кривая оси пряжи пересечет отрезок  $AB$ . Тогда в качестве критерия ошибки можно принять отношение длины отрезка  $DB$  к величине  $L$  (рис. 3, а). Это отношение будет оставаться в диапазоне  $[0; 1]$  для значений  $\varphi$  в диапазоне  $[0; \pi]$ .

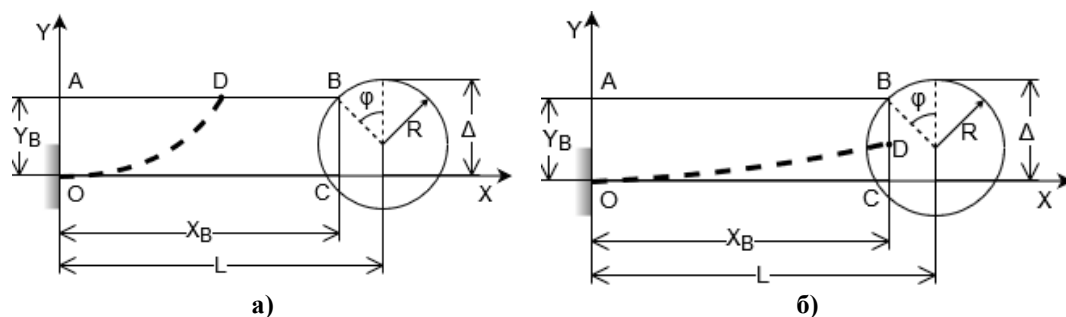


Рис. 3

В случае повышенных значений  $EJ$  кривая оси пряди пересечет отрезок  $BC$ , и в качестве критерия ошибки возможно использовать отношение длины отрезка  $BD$  к величине прогиба  $\Delta$  (рис. 3, б). Такое отношение будет находиться в диапазоне  $[0; 1]$  для значений  $\varphi$  в диапазоне  $\left[0; \arccos\left(1 - \frac{\Delta}{R}\right)\right]$ . При этом значения  $\varphi$ , превышающие  $\pi/2$ , будут указывать на то, что свободные участки пряди отклоняются вниз, что противоречит реальной схеме нагружения, представленной на рис. 1.

На основе указанных рассуждений ввели следующее соотношение для вычисления значения  $\varepsilon_{xy}(EJ, \varphi)$ :

$$\varepsilon_{xy}(EJ, \varphi) = \begin{cases} \frac{X_B - x}{L}, & \text{если } x < X_B \quad \dot{U}y^3 Y_B \\ \frac{Y_B - y}{\Delta}, & \text{если } y < Y_B \quad \dot{U}x^3 X_B \end{cases}. \quad (3)$$

Использование (3) позволяет гарантировать нахождение значения  $\varepsilon_{xy}(EJ, \varphi)$  в диапазоне  $[0; 1]$  для любых значений  $EJ$  и  $\varphi$ , удовлетворяющих схеме нагружения (см. рис. 1). При этом прохождение пряди через точку  $B$  будет соответствовать равенству  $\varepsilon_{xy}(EJ, \varphi) = 0$ .

Определение в интегральной ошибке  $\varepsilon$  составляющей  $\varepsilon_\varphi(EJ, \varphi)$  можно осуществить, вычислив угол наклона  $\varphi_{обр}$  касательной к пряди в последней точке  $D$ , рассматриваемой при определении  $E_{xy}$ . Поскольку прядь всегда отклоняется вверх, ее касательная всегда будет наклонена на угол в диапазоне  $[0; \pi/2]$ . При этом угол  $\varphi$  будет иметь такой же диапазон значений. Тогда расчет  $\varepsilon_\varphi(EJ, \varphi)$  возможен с использованием следующей зависимости:

$$\varepsilon_\varphi(EJ, \varphi) = \frac{2|\varphi_{обр} - \varphi|}{\pi}. \quad (4)$$

Поскольку обе составляющие интегральной ошибки  $\varepsilon(EJ, \varphi)$  находятся в одном диапазоне значений, можно агрегировать их следующим образом:

$$\varepsilon(EJ, \varphi) = 0,5(\varepsilon_y(EJ, \varphi) + \varepsilon_\varphi(EJ, \varphi)). \quad (5)$$

Такой подход позволяет получить функцию – критерий интегральной ошибки, обеспечивающую выполнение обоих условий корректного расположения на опорах пряди при ее нагружении по схеме трехточечного прогиба.

На основе предложенных выражений для определения интегральной ошибки  $\varepsilon(EJ, \varphi)$  был реализован вычислительный эксперимент по поиску минимума этой ошибки. Его основой явилось применение безградиентного метода оптимизации Нелдера-Мида [9, 10]. Метод основан на последовательном перемещении из начальной зоны посредством деформирования (отражения, растяжения и сжатия)  $n$ -мерного симплекса в направлении точки экстремума с помощью итерационной процедуры. Выбор лучшего значения функции осуществляется с требуемой заранее заданной точностью.

Для расчетного эксперимента приняли начальные значения  $EJ_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$  и  $\varphi_0 = 15,7^\circ$ , полученные с использованием стандартного метода [1]. Длина пряди 7 см, ее масса 0,11 г. Прогиб осуществлен на величину 0,4 см относительно двух круглых стеклянных опор, имеющих радиус закругления 0,42 см. Коэффициент трения пряди о поверхность опор равен 0,1. Расстояние между центрами опор 2,8 см. Для достижения указанного прогиба (0,4 см) потребовалась прилагаемая в центре длины пряди сила, равная 0,088 Н.

Итоги расчетного эксперимента согласно (3)-(5) представлены в виде карт значений функций ошибок  $\varepsilon_{xy}(EJ, \varphi)$ ,  $\varepsilon_\varphi(EJ, \varphi)$ ,  $\varepsilon(EJ, \varphi)$  на рис. 4-6. На них отмечены позиции начального приближения (●) и итогового решения (×).

Из полученных результатов следует, что значение изгибной жесткости пряди  $EJ$ , соответствующее описанным выше условиям допустимости и согласующееся со схемой нагружения, представленной на рис. 1, оказалось равным  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ .

Примечательны результаты визуализации сравнения принятого исходного (начального приближения) и достигнутого конечного значений углов  $\varphi$  при поиске  $EJ$  исходя из минимизации составляющих ( $\varepsilon_{xy}$ ;



$\varepsilon_\varphi$ ) и интегральной функции ошибки  $\varepsilon$ . Из анализа карты агрегированной функции ошибки (рис. 6) следует наличие только одного минимума. Это означает, что в рассматриваемом диапазоне значений  $EJ$  и  $\varphi$

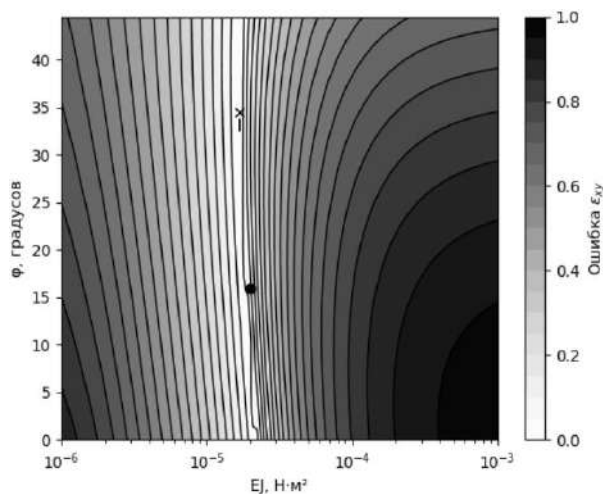


Рис. 4

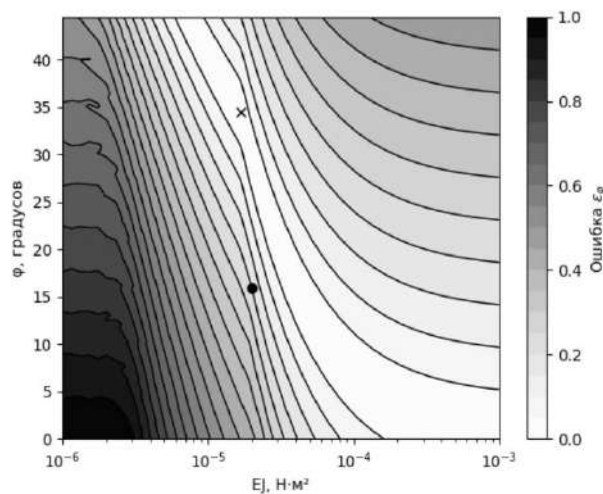


Рис. 5

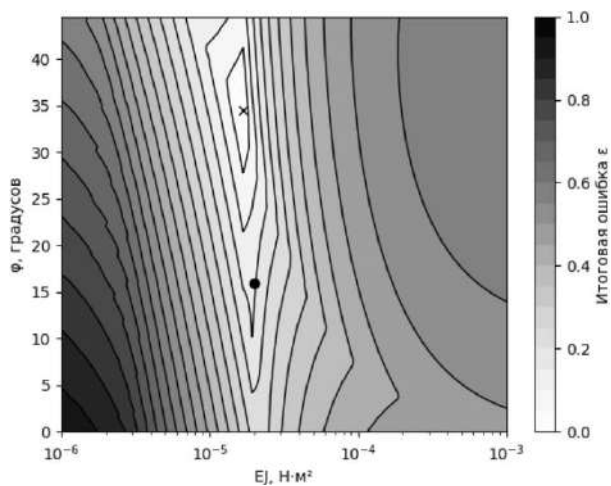


Рис. 6

## ВЫВОДЫ

1. Определение изгибной жесткости волокнистой пряжи при испытании посредством трехточечного прогиба с повышенной кривизной ее оси требует подбора оптимальных координат точки ее соприкосновения и расположения относительно поверхности цилиндрических опор.

2. Поиск координат точки соприкосновения сводится к оптимизации функции ошибки от двух переменных: угловой координаты точки касания и изгибной жест-

задача имеет одно стабильное решение, которое будет формироваться независимо от выбранного начального приближения.

кости  $EJ$ . Нахождение минимума этой функции ошибки обеспечит определение искомого значения изгибной жесткости  $EJ$ . Функция ошибки должна состоять из двух составляющих: величины линейного и углового отклонения точки формируемого фактического касания пряжи поверхности опоры от требуемой по расчетам точки контакта, для которой упругая линия пряжи одновременно проходила бы через рассчитанные координаты этой точки и имела касательную, совпадающую с касательной к поверхности опоры.

3. При поиске минимума предложенной функции ошибки с применением безградиентного метода оптимизации Нелдера-Мида в качестве начального приближения  $EJ_0$  возможно использовать результат оценки этой величины по стандартному способу испытания гибкости лубяных волокон. При таких условиях обеспечивается одно стабильное решение вследствие наличия только одного минимума функции ошибки в рассматриваемом диапазоне значений  $EJ$  и  $\varphi$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 53484-2009. Лен трепаный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2009. 13 с.

2. *Городов В.В., Лазарева С.Е., Лунёв И.Я. и др.* Испытания лубоволокнистых материалов. М.: Легкая индустрия, 1969. 208 с.

3. *Пашин Е.Л., Нестерова Т.Н.* Недостатки стандартного метода определения гибкости трепанного льняного волокна // Научные приоритеты апк в России и за рубежом: сб. ст. 72-й науч.-практ. конф. с междунар. участием. Караваяво: Костромская ГСХА, 2021. С. 342...350.

4. ГОСТ 9187-74. Картон обувной. Метод определения жесткости и изгибостойкости при статическом изгибе. М.: Изд-во стандартов, 1987. 5 с.

5. *Разин С.Н., Пашин Е.Л., Орлов А.В.* Метод определения изгибной жесткости льняного волокна для его квалиметрии: обоснование алгоритма испытания // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 3. С. 81...87.

6. *Попов Е.П.* Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 296 с.

7. *Дарков А. В., Шпиро Г. С.* Сопrotивление материалов. М.: Высш. шк., 1989. 643 с.

8. ГОСТ Р 56805-2015. Композиты полимерные. Методы определения механических характеристик при изгибе. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.

9. *Nelder J.A., Mead R.* A simplex method for function minimization // Computer Journal. 1965. № 7(4). P. 308...313.

10. *Чунаев П.В., Боченина К.О.* Анализ и разработка алгоритмов: учебно-методическое пособие. СПб: Университет ИТМО, 2020.

#### REFERENCES

1. ГОСТ R 53484-2009. Scutched flax fibre. Specifications. Moscow: Standartinform, 2009.

2. *Gorodov V.V. et al.* Testing of bast fiber based materials. Moscow: Legkaja industrija, 1969. 208 p.

3. *Pashin E.L. and Nesterova T.N.* Flaws of the standard method of measuring flexibility of flax fiber, // Compilation of articles of 72 nd scientific-practical conference. Karavaevo: Kostroma State Agricultural Academy, 2021. P. 342...350.

4. ГОСТ 9187-74. Cardboard. Method of measuring of stiffness and tensile strength under static bending, Moscow: Izdatelstvo standartov, 1987.

5. *Razin S.N., Pashin E.L., Orlov A.V.* A method of measuring bending rigidity of flax fiber during its qualimetry: determining properties of a testing algorithm // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023. No 3. P. 81...87.

6. *Popov E.P.* Theory and calculation for flexible elastic rods. Moscow: Nauka, 1986. 296 p.

7. *Darkov A.V. and Shpiro G.S.* Resistance of materials. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 643 p.

8. ГОСТ R 56805-2015. Polymer composites. Methods for determination of flexural properties. Moscow: Standartinform, 2016.

9. *Nelder J.A., Mead R.* A simplex method for function minimization // Computer Journal. 1965. No. 7(4). P. 308...313.

10. *Chunaev P.V. and Bochenina K.O.* Analysis and development of algorithms: a teaching aid. St. Petersburg: ITMO university, 2020.

Рекомендована кафедрой технических систем в агропромышленном комплексе Костромской ГСХА. Поступила 26.01.23.

**АНАЛИЗ И ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ПОЛУЦИКЛОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ВОЙЛОКАМИ ДЛЯ ВЕРХА ОБУВИ**

**ANALYSIS AND EMPIRICAL MODELS OF THE RESULTS  
OF SEMI-CYCLE EXPERIMENTS WITH FELTS FOR SHOES UPPERS**

*И.Н. ЛЕДЕНЕВА*

*I.N. LEDENEVA*

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(The Kosygin State University of Russia)

E-mail: ledeneva-in@rguk.ru

*Показано, что изменения свойств войлоков носят статистический характер. Закономерности изменений характеристик войлоков получены в виде регрессионных моделей. Для моделирования изменений в динамике полуцикловых экспериментов с войлоками для верха обуви материалы испытывали на приборе Инстрон. Образцы выкраивали в диагональном направлении относительно длины рулона. Приведены значения показателей, измеряемых и регистрируемых прибором при полуцикловых испытаниях на одноосное растяжение. Описаны результаты экспериментов с образцами войлоков для верха обуви, методы их обработки, анализ и эмпирические модели исследованных зависимостей. Экспериментальные исследования образцов нескольких войлоков различного назначения позволили обнаружить существование подобия в зависимости между нагрузкой и деформацией в полуцикловых испытаниях исследованных войлоков. Предложена аналитическая модель регрессии для результатов полуцикловых испытаний войлоков для верха обуви. Модель позволяет прогнозировать деформационно-прочностные характеристики материалов анизотропной хаотической структуры при адресной технологии изготовления войлочной обуви.*

*It is shown that changes in the properties of felts are of a statistical nature. The patterns of changes in the characteristics of felts in the form of regression models were obtained. A similar approach was used to simulate changes in the dynamics of semi-cycle experiments with felts for shoes uppers. The materials were tested on an Instron instrument. The samples were cut out in a diagonal direction relative to the length of the roll. The values of indicators measured and recorded by the device during the semi-cycle test are given. The results of experiments with samples of felts for uppers of shoes, methods of their processing, analysis and empirical models of the studied dependencies are described. Experimental studies of samples of several felts for various purposes made it possible to detect the existence of a similarity in the dependence between load and deformation in semi-cycle tests of the investigated felts. An analytical regression model is proposed for the results of semi-cycle tests of felts for uppers. The model makes it possible to predict the deformation-strength characteristics of materials with an anisotropic chaotic structure using the targeted technology for manufacturing felt shoes.*

**Ключевые слова:** нетканый волокнистый материал, обувной войлок, полуцикловые испытания, эмпирическая регрессионная модель.

**Keywords:** nonwoven fibrous material, shoe felt, semi-cycle tests, empirical model.

### *Введение*

В процессе эксплуатации многие волокнистые материалы способны изменять свои характеристики, в т. ч. сопротивляемость внешним механическим воздействиям [1]. Это влияет на внешний вид и долговечность обуви, изготовленной из таких материалов. Процессы изменения характеристик волокнистых материалов зависят от различных факторов, включая структуру волокнистого материала, взаимодействие между отдельными волокнами, и особенностей поверхности волокон [2-4]. В целом понимание процессов изменения характеристик волокнистых материалов и разработка новых методов и технологий для улучшения их сопротивляемости внешним воздействиям является важной задачей в области разработки и производства обуви и других изделий из таких материалов. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию более долговечных и устойчивых изделий, что позволит улучшить их качество. Поскольку существует много источников таких изменений, а сами изменения носят статистический характер, закономерности изменений характеристик волокнистых материалов обычно получают как эмпирические зависимости в виде регрессионных моделей для частных случаев, факторов и задач [5, 6].

В данной работе для моделирования изменений в динамике полуцикловых испытаний на одноосное растяжение войлоков для верха обуви использован эмпирический подход, основанный на регрессионных моделях. В качестве объектов исследования выбраны войлоки технические тонкошерстные для электрооборудования по ГОСТ 11025-78 (войлок 1) и для машиностроения по ГОСТ 288-72 (войлок 2), волокнистый состав которых, на наш

взгляд, является привлекательным с точки зрения сравнения с волокнистым составом обувного войлока по ОСТ 17-531-75 (войлок 3). Технические войлоки являются не дефицитными и демократичными по цене по сравнению с обувным, в состав которого входит австралийская меринсовая шерсть. Применение же альтернативных технических войлоков способствует сохранению или удешевлению стоимости готовой обуви. Данный факт можно считать положительным для повышения конкурентоспособности отечественной войлочной обуви. Вышесказанное доказано предыдущими исследованиями [5, 7, 8].

### *Методы исследования*

Для создания адекватной численной модели деформационного поведения войлоков проведен эксперимент по одноосному растяжению до разрыва трех плоских образцов на приборе Инстрон при скорости деформации 100 мм/мин, в результате которого получена диаграмма *нагрузка – абсолютное удлинение* (рис. 1). Испытуемые образцы каждого вида войлока были вырезаны в диагональном направлении относительно длины рулона. Эксперимент проведен в соответствии с ГОСТ Р ИСО 13934/1-2015.

### *Результаты и обсуждения*

Полученные показатели имеют прямо пропорциональную зависимость от времени испытания (см. рис. 1). Поэтому, во-первых, нет смысла исследовать эти показатели, во-вторых, можно использовать любой из них в качестве аргумента вместо времени. Поэтому в дальнейшем вместо времени в качестве аргумента для исследуемых зависимостей выберем абсолютное удлинение образца  $L$ , мм, а в качестве зависимой переменной возьмем напряжение деформации  $S$ , МПа.

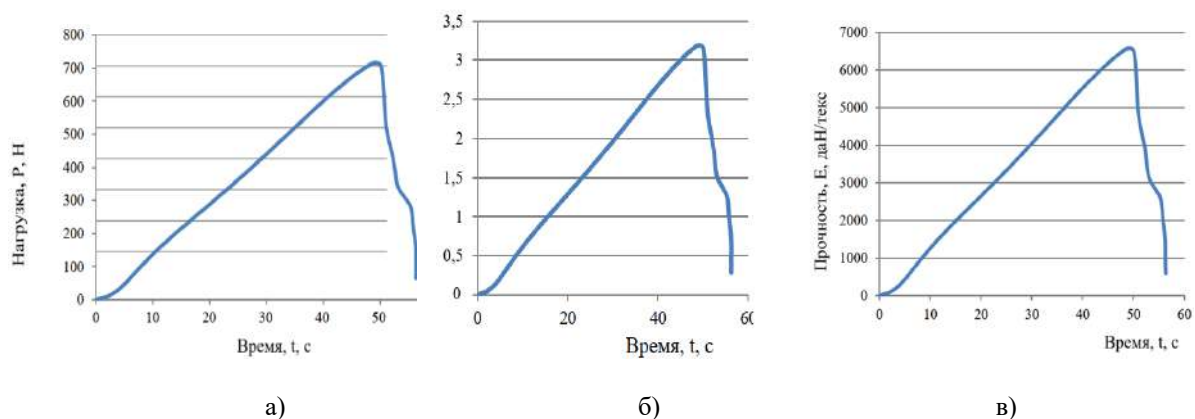


Рис. 1

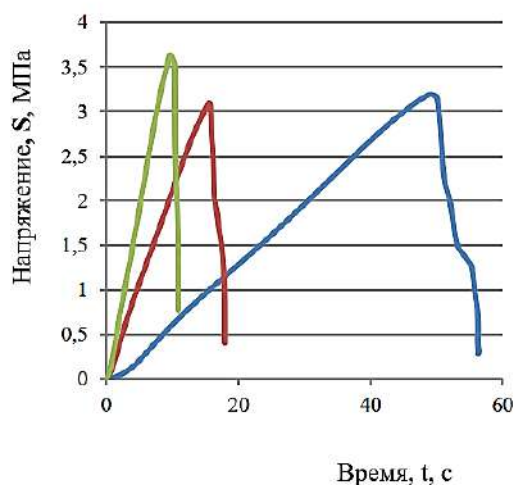


Рис. 2

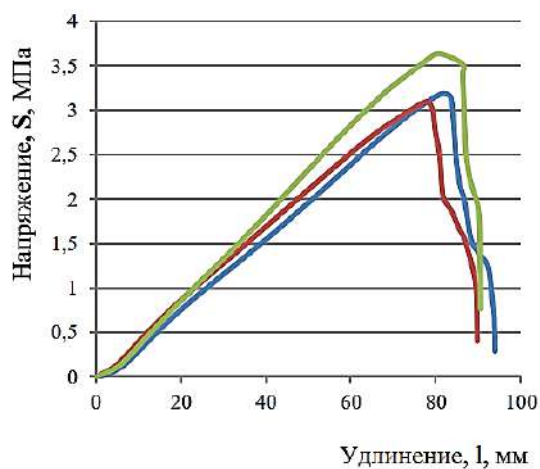


Рис. 3

Сравним зависимости для разных образцов одного и того же вида войлока. На рис. 2 (зависимости  $S(t)$  для параллельных образцов) и 3 (зависимости  $S(L)$  для параллельных образцов) показаны зависимости показателя  $S$  от времени и удлинения  $L$  для трех параллельных образцов.

Зависимости  $S(t)$  и  $S(L)$  показаны для 1-го образца синим цветом, для 2-го образца красным цветом и для 3-го образца зеленым цветом.

Сравнение графиков приводит к выводу, что формы кривых у зависимостей обладают определенным подобием. При этом продолжительность испытания у каждого образца сильно отличается от этого времени для другого образца, зависимости  $S(L)$  весьма близки для всех трех образцов, что позволяет считать эту зависимость типич-

ной для материала данного вида и строить математическую модель зависимости в целом для этого материала на основе полученных данных.

Как известно, простейшей моделью зависимости между удлинением и напряжением в образце материала является модель Гука с линейной зависимостью между этими величинами:  $\sigma = E \varepsilon$ , где  $\sigma$  – механическое напряжение в материале,  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга) и  $\varepsilon$  – относительная деформация. В приведенных результатах экспериментов регистрировались абсолютное удлинение образца  $d$  и сила сопротивления удлинению  $S$ , обе величины в размерных единицах. Из графиков следует, что в начале испытания все образцы ведут себя в строгом соответствии с моделью Гука, т.е.  $S = K \cdot d$ , где коэффи-

циент  $K$  прямо пропорционален так называемому начальному модулю упругости  $E$ .

При построении математической модели наблюдаемой зависимости и получении ее в универсальном виде, а также для более явного отображения наблюдающегося подобия результатов эксперимента у разных образцов целесообразно перейти к безразмерным и масштабированным (кодированным) переменным. С этой целью значения регистрируемых величин для каждого типа войлоков разделим на их максимумы. Очевидно, что при таком преобразовании все величины становятся безразмерными, а их значения находятся в пределах от 0 до 1. На рис. 4 показаны те же экспериментальные зависимости, что и на рис. 3, но в безразмерных переменных.

На рис. 4 видно, что результаты для всех трех образцов практически совпадают, за исключением завершающего этапа – разрушения образца.

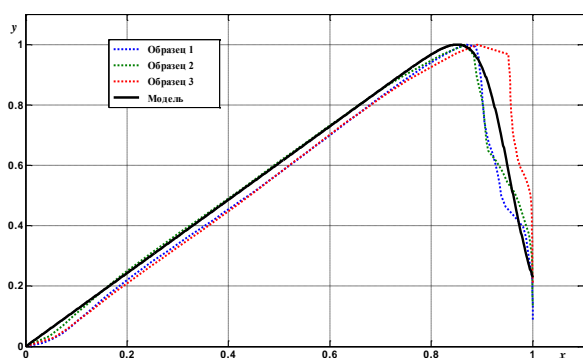


Рис. 4

Это позволило подобрать эмпирическую модель для зависимости  $S(d)$  для всех этапов испытания. Очевидно, что модуль упругости не остается постоянным, а уменьшается по мере нарастания удлинения. При этом скорость нарастания быстро увеличивается к концу испытания. Безразмерная форма зависимости упростила подбор подходящей дробно-полиномиальной зависимости с минимальным количеством коэффициентов регрессии  $a$  и  $m$  в виде

$$Y = \frac{x}{1 + (ax)^m}, \quad Y = S / \max(S); \quad x = d / \max(d). \quad (1)$$

Подбор коэффициентов выполнен нелинейным методом наименьших квадратов

$$W(a, m) = \sum_{i,j} \left( \frac{S_{ij}}{\max(S_{ij})} - \frac{d/\max(d)}{1 + (a \cdot d/\max(d))^m} \right)^2 \rightarrow \min_{a,m}. \quad (2)$$

Полученная модель имеет вид

$$y = \frac{x}{1 + (1.05x)^{30}}, \quad y = S / \max(S). \quad (3).$$

На рис. 4 показана модельная кривая, которая практически совпадает с наблюдаемыми экспериментальными данными до начала разрыва образца и удовлетворительно описывает их на завершающей стадии испытания вплоть до разрыва.

## ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования образцов нескольких войлоков различного назначения позволили обнаружить существование подобия в зависимости между нагрузкой и деформацией в полуцикловых испытаниях исследованных войлоков.

Предложена аналитическая модель регрессии для результатов полуцикловых испытаний войлоков для верха обуви. Модель позволяет прогнозировать деформационно-прочностные характеристики материалов анизотропной хаотической структуры при проектировании технологии изготовления войлочной обуви.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Sevost'yanov P.A. Study of deformation of nonwoven fibre material during needle-punching / P.A. Sevost'yanov, T.V. Seryakova // *Fibre Chemistry*. 2009. Vol. 41. No 1. P. 38...40. – DOI 10.1007/s10692-009-9116-z.
2. Севостьянов П.А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов. М.: Тисо Принт, 2013. 253 с.
3. Леденева И.Н., Белгородский В.С. Валяльно-войлочные материалы: строение, свойства, перспективы использования: монография. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021.
4. Mandhyan P.K., Nachane R.P., Banerjee S., Pawar B.R., Koli H.S. Nonlinear Maxwell modelling of inverse relaxation in yarns and fabrics // *Indian Journal*

of Fibre & Textile Research. Vol. 42, June 2017, P. 168...174.

5. *Ledeneva I.N., Simachev D.N.* Shape stability of shoes with decorated felt uppers // Serbia, Belgrade. Textile industry. 2015. No. 2.

6. *Леденева И.Н., Литвин Е.В., Белгородский В.С., Сницар Л.Р.* Плоскошовные ниточные соединения – решение проблемы прочностных свойств заготовки верха войлочной обуви // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 6 (402). С. 130...135.

7. *Леденева И.Н., Зарицкий Б.П., Гинзбург Л.И.* Априорное ранжирование факторов, влияющих на формоустойчивость обуви с верхом из войлока // Дизайн и технологии. 2016. № 52(94). С. 42...49.

8. *Леденева И.Н., Зарицкий Б.П., Гинзбург Л.И.* Оптимальный выбор пакета материалов для повышения формоустойчивости обуви из войлока // Дизайн и технологии. 2016. № 55(97).

#### REFERENCES

1. *Sevost'yanov P. A.* Study of deformation of nonwoven fibre material during needle-punching / P.A. Sevost'yanov, T.V. Seryakova // Fibre Chemistry. 2009. Vol. 41. No 1. P. 38-40. – DOI 10.1007/s10692-009-9116-z.

2. *Sevostyanov P.A.* Computer models in the mechanics of fibrous materials. Moscow: Tiso Print, 2013. 253 p.

3. *Ledeneva I.N., Belgorodsky V.S.* Felting materials: structure, properties, prospects for use: monograph. M.: RGU im. A.N. Kosygin, 2021.

4. *Mandhyan P.K., Nachane R.P., Banerjee S., Pawar B.R., Koli H.S.* Nonlinear Maxwell modelling of inverse relaxation in yarns and fabrics // Indian Journal of Fibre & Textile Research. Vol. 42, June 2017. P. 168...174.

5. *Ledeneva I.N., Simachev D.N.* Shape stability of shoes with decorated felt uppers // Serbia, Belgrade. Textile industry. 2015. No. 2.

6. *Ledeneva I.N., Litvin E.V., Belgorodskii V.S., Snitsar L.R.* FLAT-seam thread joints – strength properties problem solution of felt shoe top blank // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 6 (402). P. 130...135.

7. *Ledeneva I.N., Zaritsky B.P., Ginzburg L.I.* A priori ranking of factors affecting the shape stability of shoes with felt uppers // Design and technology. 2016. No. 52(94). P. 42...49.

8. *Ledeneva I.N., Zaritsky B.P., Ginzburg L.I.* The optimal choice of a package of materials to increase the dimensional stability of felt footwear // Design and Technology. 2016. No. 55(97).

Рекомендована кафедрой художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи РГУ имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство). Поступила 03.04.23.

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА  
ДУБЛИРОВАННЫХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**COMPARATIVE EVALUATION  
OF DUPLICATED NONWOVEN MATERIALS**

*Ю.С. ШУСТОВ, А.В. КУРДЕНКОВА, Я.И. БУЛАНОВ, А.В. ОРЛОВ*

*Yu.S. SHUSTOV, A.V. KURDENKOVA, Ya.I. BULANOV, A.V. ORLOV*

**(Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))**

**(The Kosygin State University of Russia)**

E-mail: kurdenkova-av@rguk.ru

*Производство нетканых материалов является одной из перспективных отраслей текстильной промышленности. Среди различных видов нетканых полотен наиболее востребованными являются утепляющие нетканые материалы из натуральных и химических волокон, применяемые для изготовления одежды и внутренних деталей обуви. В текстильной промышленности остро стоит вопрос о возможности вторичного использования шерстяных, хлопчатобумажных, льняных, химических волокон. Одной из областей применения регенерированных волокон является изготовление нетканых утеплителей, имеющих в своем составе многокомпонентную смесь, скрепленную для формирования полотна различными способами. В работе проведено исследование дублированных нетканых материалов, выработанных из регенерированного сырья. Исследована структура полотна с помощью метода цифровой микроскопии. Определены поверхностная плотность, ширина, толщина (под нагрузкой 0,5 кПа), неровнота по массе, разрывная нагрузка по длине и ширине, удлинение при разрыве по длине и ширине. Испытания проводились по стандартным методикам. По результатам исследования выявлены наилучший и наихудший образцы.*

*The production of nonwoven materials is one of the promising branches of the textile industry. Among the various types of non-woven fabrics, the most popular are insulating non-woven materials used for the manufacture of clothing and internal parts of shoes. For their manufacture, both natural and chemical fibers are used. In the textile industry, there is an acute question about the possibility of reusing wool, cotton, flax, and chemical fibers. One of the areas of application of regenerated fibers is the manufacture of non-woven insulation materials, which include a multicomponent mixture bonded to form a web in various ways. In the work a study of duplicated non-woven materials made from recycled raw materials was carried out. The structure of the fabric was studied using the digital microscopy method. The surface density, width, thickness (under a load of 0.5 kPa), unevenness in mass, breaking load along the length and width, elongation at break along the length and width were determined. The tests were carried out according to standard methods. According to the results of the study, the best and worst samples were identified.*



**Ключевые слова:** дублированные нетканые материалы, разрывная нагрузка, разрывное удлинение, неровнота по массе.

**Keywords:** duplicated nonwovens, breaking load, elongation at break, weight unevenness.

В текстильной промышленности остро стоит вопрос использования отходов шерстяных, хлопчатобумажных, льняных и химических волокон для производства различных видов полотен, что позволяет значительно сэкономить значительные материальные ресурсы и не загрязнять окружающую среду [1-10].

На кафедру материаловедения и товарной экспертизы РГУ им. А.Н. Косыгина поступили 5 образцов, выработанных ООО


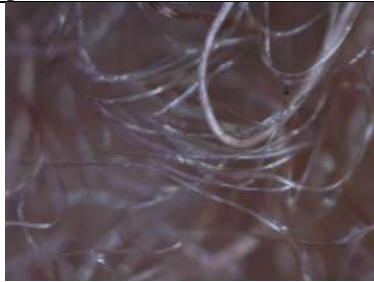


«Группа компаний «Русит» с целью оценки качества и соответствия выработанной продукции заданным требованиям. Исходные параметры рассматриваемых образцов приведены в табл. 1. Фотографии образцов, полученные с помощью микроскопа, приведены в табл. 2.











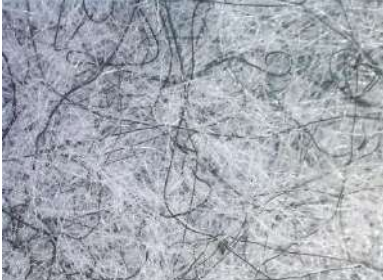

Список основных испытаний приведен в табл. 3 [4, 5]. Результаты определения ширины полотен и поверхностной плотности приведены в табл. 4.





Т а б л и ц а 1

№	Название материала	Состав	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>
1	Дублированный материал (1 слой – ворсин; 2 слой – полотно термоскрепленное ПТ - 400/30; соединение клеевое; клей – сэвилен)	1 слой – 100% ПЭ 2 слой – 100 % ПЭ	500 400
2	Ворсин-500	100% ПЭ	500
3	Полотно термоскрепленное ПТ - 600/25	100% ПЭ	600
4	Полотно термоскрепленное ПТ - 400/15	100% ПЭ	400
5	Полотно термоскрепленное ПТ - 300/15	100% ПЭ	300

Т а б л и ц а 2

Наименование образца	Фотографии	
Образец 1 Ворсин – 500-ПТ-400/30 (лицевая сторона – ворс)		
Образец 1 Ворсин – 500-ПТ-400/30 (изнаночная сторона)		

Наименование образца	Фотографии	
<p>Образец 2</p> <p>Ворсин (лицевая сторона – ворс)</p>		
<p>Образец 2</p> <p>Ворсин (изнаночная сторона)</p>		
<p>Образец 3</p> <p>Полотно термоскрепленное ПТ-600/25 (лицевая сторона)</p>		
<p>Образец 3</p> <p>Полотно термоскрепленное ПТ-600/25 (изнаночная сторона)</p>		
<p>Образец 4</p> <p>Полотно термоскрепленное ПТ-400/15 (лицевая сторона)</p>		
<p>Образец 4</p> <p>Полотно термоскрепленное ПТ-400/15 (изнаночная сторона)</p>		

Наименование образца	Фотографии	
Образец 5 Полотно термоскрепленное ПТ-300/15 (лицевая сторона)		
Образец 5 Полотно термоскрепленное ПТ-300/15 (изнаночная сторона – глянцевая)		

Т а б л и ц а 3

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Номер НД на методы испытаний
1	Поверхностная плотность	г/м <sup>2</sup>	ГОСТ 3811 Метод 5
2	Ширина	см	ГОСТ 3811
3	Толщина (под нагрузкой 0,5 кПа)	мм	ГОСТ 12023
4	Неровнота по массе, не более	%	ГОСТ 12023
5	Разрывная нагрузка: - по длине - по ширине	Н	ГОСТ 15902.3
6	Удлинение при разрыве: - по длине - по ширине	%	ГОСТ 15902.3

Т а б л и ц а 4

Наименование показателя	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Ширина полотен, см	184,5	184,0	150,0	151,5	145,0
Поверхностная плотность полотен, г/м <sup>2</sup>	791	489	601	450	330

При изготовлении полотен важным условием является обеспечение стабильно-

сти получаемой продукции по массе (табл. 5) и по толщине (табл. 6).

Т а б л и ц а 5

Наименование показателя	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Среднее значение массы образцов размером 100x100 мм, г	7,91	4,89	6,01	4,52	3,30
Среднее квадратическое отклонение, г	0,26	0,21	0,37	0,20	0,14
Коэффициент вариации, %	3,35	4,39	6,08	4,51	4,17
Абсолютная ошибка выборки, г	0,16	0,13	0,23	0,13	0,09
Относительная ошибка выборки, %	2,08	2,72	3,77	2,80	2,59

Неровнота по массе оценивалась по коэффициенту вариации. Наибольшую неровноту имеет образец 3, наименьшую – образец 1. Образец 1 является дублиро-

ванным, поэтому наличие двух слоев и связующего позволяет снизить неровноту по массе готового полотна.

Т а б л и ц а 6

Наименование показателя	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Среднее значение толщины образцов, мм	4,50	2,95	4,66	2,09	2,16
Среднее квадратическое отклонение, мм	0,08	0,17	0,14	0,33	0,17
Коэффициент вариации, %	1,85	5,75	3,09	15,92	7,85
Абсолютная ошибка выборки, мм	0,05	0,11	0,09	0,21	0,11
Относительная ошибка выборки, %	1,14	3,57	1,92	9,87	4,87

Наибольшую неровноту по толщине имеет образец 4, а наименьшую – образец 1, который является дублированным.

Разрывные характеристики определя-

лись на разрывной машине Инстрон серии 4411. Результаты испытаний приведены в табл. 7-10.

Т а б л и ц а 7

Наименование показателя	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Среднее значение разрывной нагрузки по длине образца, Н	636,18	522,72	324,52	547,38	215,66
Среднее квадратическое отклонение, Н	56,74	72,44	41,62	27,46	32,62
Коэффициент вариации, %	8,92	13,86	12,82	5,02	15,12
Абсолютная ошибка выборки, Н	49,73	63,49	36,48	24,07	28,59
Относительная ошибка выборки, %	7,82	12,15	11,24	4,40	13,26

Т а б л и ц а 8

Наименование показателя	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Среднее значение разрывной нагрузки по ширине образца, Н	603,32	614,44	565,94	822,16	192,86
Среднее квадратическое отклонение, Н	72,42	50,51	17,27	91,90	10,22
Коэффициент вариации, %	12,00	8,22	3,05	11,18	5,30
Абсолютная ошибка выборки, Н	63,48	44,27	15,13	80,55	8,96
Относительная ошибка выборки, %	10,52	7,21	2,67	9,80	4,65

Т а б л и ц а 9

Наименование показателя	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Среднее значение разрывного удлинения по длине образца, %	95,94	119,32	93,28	81,36	24,04
Среднее квадратическое отклонение, %	13,90	31,20	7,15	7,13	7,17
Коэффициент вариации, %	14,49	26,15	7,67	8,76	29,84
Абсолютная ошибка выборки, %	12,18	27,35	6,27	6,25	6,29
Относительная ошибка выборки, %	12,70	22,92	6,72	7,68	26,16

Т а б л и ц а 10

Наименование показателя	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5
Среднее значение разрывного удлинения по ширине образца, %	124,12	128,54	68,00	89,88	89,25
Среднее квадратическое отклонение, %	5,69	9,50	7,80	4,27	5,10
Коэффициент вариации, %	4,59	7,39	11,47	4,75	5,71
Абсолютная ошибка выборки, %	4,99	8,33	6,84	3,75	4,47
Относительная ошибка выборки, %	4,02	6,48	10,06	4,17	5,00

## ВЫВОДЫ

Наибольшей разрывной нагрузкой по длине полотна обладает образец 1. Наибольшую разрывную нагрузку по ширине полотна имеет образец 4. Наимень-

шей величиной показателя обладает образец 5, являющийся более рыхлым.

Наибольшей равномерностью по показателю обладает по длине образец 4, а по ширине образец 3. Их коэффициенты вариации являются наименьшими.

Наиболее неравномерными являются образец 5 по длине и образец 1 по ширине.

Наибольшее удлинение при разрыве по длине и по ширине полотна имеет образец 2. Однако данный образец обладает наибольшей неравномерностью по данному показателю. Наименьшую величину разрывного удлинения по длине имеет образец 5, а по ширине – образец 3.

Наиболее неравномерными по показателю являются образец 5 по длине и образец 2 по ширине.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шустов Ю.С. Разработка и исследование утепляющих нетканых материалов из регенерированного сырья. М.: РГУ им. А.Н.Косыгина, 2022. 164 с.
2. Михайлова И.Д. Разработка методов обоснования выбора пакетов материалов обуви для защиты стопы от воздействий низких температур: дис. ... канд. техн. наук. Шахты, 2006. 195 с.
3. Белоусов В.П. Тепловые свойства обуви. М.: Легкая индустрия, 1982. 234 с.
4. Шустов Ю.С., Кирюхин С.М. Текстильное материаловедение и управление качеством. М.: ИНФРА-М, 2022. 386 с.
5. Текстильное материаловедение: лабораторный практикум / Шустов Ю.С., Кирюхин С.М. и др. М.: ИНФРА-М, 2021. 357 с.
6. Есиркепова А.М., Дуйсембекова Г.Р., Сабенова Б.Н., Балабекова Д.Б., Кудайбергенова З.У. Современные тенденции и перспективы развития мирового производства и потребления нетканых материалов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 3 (387). С. 75...83.
7. Шустов Ю.С., Курденкова А.В., Люкшинова И.В., Бызова Е.В. Прогнозирование нагрузки при прорезании термоскрепленных нетканых материалов после искусственной инсоляции // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2012. № 5 (341). С. 23...25.
8. Лысова М.А., Грузинцева Н.А., Гоис Т.О., Гусев Б.Н. Прогнозирование нормативных значений показателей качества нетканых геотекстильных полотен // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 4 (400). С. 47...51.
9. Кенжибаева Г.С., Сулейменова Т.Н., Иманкулова М.Н., Дайрабай Д.Д., Нышанбаева Ж.У., Сихимбаева М.Т. Математическое моделирование влияния технологических параметров на процесс изготовления нетканого полотна // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2 (398). С. 109...114.
10. Дёмкина А.В., Курденкова А.В., Шустов Ю.С., Воробьева Н.А. Исследование механических

свойств иглопробивных геотекстильных нетканых полотен // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. № 2 (344). С. 33...35.

#### REFERENCES

1. Shustov Yu.S. Development and research of insulating non-woven materials from regenerated raw materials. Moscow: RGU im. A.N. Kosygina, 2022. 164 p.
  2. Mikhailova I.D. Development of methods for substantiating the choice of packages of footwear materials for protecting the foot from the effects of low temperatures. Shakhty, 2006. 195 p.
  3. Belousov V.P. Thermal properties of footwear. Moscow: Light industry. 1982. 234 p.
  4. Shustov Yu.S., Kiryukhin S.M. Textile materials science and quality management. M.: INFRA-M, 2022. 386 p.
  5. Textile materials science: laboratory workshop / Shustov Yu.S., Kiryukhin S.M. and others. M.: INFRA-M, 2021. 357 p.
  6. Esirkepova A.M., Dusembekova G.R., Sabenova B.N., Balabekova D.B., Kudaibergenova Z.U. Modern trends and prospects for the development of world production and consumption of non-woven materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2020. No. 3 (387). P. 75...83.
  7. Shustov Yu.S., Kurdenkova A.V., Lyukshinova I.V., Byzova E.V. Forecasting the load during cutting of thermally bonded non-woven materials after artificial insolation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2012. No. 5 (341). P. 23...25.
  8. Lysova M.A., Gruzintseva N.A., Gois T.O., Gusev B.N. Forecasting of normative values of indicators of quality of non-woven geotextile fabrics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.. 2022. No. 4 (400). P. 47...51.
  9. Kenzhibaeva G.S., Suleimenova T.N., Imankulova M.N., Dairabay D.D., Nyshanbaeva Zh.U., Sihimbaeva M.T. Mathematical modeling of the influence of technological parameters on the process of manufacturing non-woven fabric // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 2 (398). P. 109...114.
  10. Demkina A.V., Kurdenkova A.V., Shustov Yu.S., Vorobieva N.A. Study of the mechanical properties of needle-punched geotextile non-woven fabrics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2013. No. 2 (344). P. 33...35.
- Рекомендована кафедрой материаловедения и товарной экспертизы РГУ им. Косыгина. Поступила 04.04.23.

**КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
ПОЛИМЕРНЫХ НИТЕЙ НА СТАДИИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА\***

**QUALITATIVE ASSESSMENT OF THE OPERATIONAL PROPERTIES  
OF POLYMER THREADS AT THE STAGE OF THEIR DESIGN  
AND PRODUCTION ORGANIZATION**

*Н.С. КЛИМОВА*

*N.S. KLIMOVA*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: klimonata85@mail.ru

*В статье рассматриваются вопросы проведения качественной оценки эксплуатационных свойств полимерных нитей и текстильных изделий из них на стадии проектирования и организации производства с целью выпуска продукции, обладающей повышенной конкурентоспособностью. Качественная оценка эксплуатационных свойств полимерных нитей и текстильных изделий из них проводится на основе математического моделирования, прогнозирования и системного анализа упругих, вязкоупругих и пластических свойств указанных нитей. Для решения поставленной задачи предлагаются также методы разделения полной деформации и механической работы деформирования полимерных нитей на упругие, вязкоупругие и пластические компоненты, имеющие существенное значение при определении их функциональности.*

*The article deals with the issues of conducting a qualitative assessment of the operational properties of polymer threads and textile products from them at the design stage and organization of production in order to produce products with increased competitiveness. A qualitative assessment of the performance properties of polymer yarns and textile products from on the basis of mathematical modeling, prediction and system analysis of the elastic, viscoelastic and plastic properties of these yarns is carried out. To solve this problem, methods for dividing the total deformation and the mechanical work of deformation of polymer filaments into elastic, viscoelastic and plastic components, which are essential in determining their functionality are also proposed.*

**Ключевые слова:** качественная оценка, математическое моделирование, численное прогнозирование, текстильные материалы, полимерные нити, упругость, вязкоупругость, пластичность.

**Keywords:** qualitative assessment, mathematical modeling, numerical prediction, textile materials, polymer threads, elasticity, viscoelasticity, plasticity.

---

\*Работа финансировалась в рамках выполнения гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-5349.2022.4.

Полимерные нити, используемые в промышленности, и в частности швейном производстве, должны обладать достаточной степенью прочности и хорошей растяжимостью. Чем быстрее проходят процессы релаксации и ползучести, тем при шитье образуется меньше складок, а строчка будет менее заметной, что, несомненно, сказывается на внешнем виде готового изделия.

В силу сказанного полимерные нити должны иметь определенные механические свойства.

Всестороннее исследование упругих и вязкоупругих свойств полимерных нитей возможно с позиции нелинейно-наследственной вязкоупругости полимеров на основе математического моделирования деформационных процессов.

Изучение деформационных свойств полимерных нитей в области действия неразрушающих нагрузок, близких к условиям их эксплуатации, состоит из нескольких этапов: проведения экспериментальных исследований и сбора необходимой информации; разработки математической модели деформационных свойств, наиболее адекватно отражающей механические свойства рассматриваемой нити; определения вязкоупругих характеристик как параметров предложенной математической модели; прогнозирования деформационных процессов; получения необходимой информации из прогноза, в частности значений упругих, вязкоупругих и пластических компонент деформации и механической работы деформирования.

Разработка математической модели вязкоупругости и определение параметров модели проводятся по конкретным методам [1]. Например, в качестве основы математической модели вязкоупругости полимерных нитей предлагается выбрать нормированный арктангенс логарифма приведенного времени [2].

Прогнозирование деформационных процессов полимерных нитей проведем на основе указанной выше математической модели с использованием интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра [3]:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \int_0^t \varepsilon_\theta \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta \quad (1)$$

для процесса нелинейно-наследственной релаксации и

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \int_0^t \sigma_\theta \varphi'_{\sigma, t-\theta} d\theta \quad (2)$$

для процесса нелинейно-наследственной ползучести,

где  $\varepsilon$  – деформация,  $\sigma$  – напряжение;

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{ne}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \quad \text{и}$$

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{ns}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) \quad \text{– нормиро-}$$

ванные функции релаксации и запаздывания;  $t$  – время,  $1/b_{ne}$  и  $1/b_{ns}$  – параметры интенсивности;  $\tau_\varepsilon$  и  $\tau_\sigma$  – времена релаксации и запаздывания;  $E_0$  – модуль упругости;  $E_\infty$  – модуль вязкоупругости;  $D_0$  – начальная податливость;  $D_\infty$  – предельная равновесная податливость;

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{ne}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{1}{b_{ne}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \quad \text{и}$$

$$W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{ns}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} = \frac{1}{b_{ns}} \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\sigma} \right) \right) \quad \text{–}$$

аргументы-функционалы;

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{ne}} \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t}^2} \frac{1}{t} \quad \text{и}$$

$$\varphi'_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{ns}} \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \frac{1}{t} \quad \text{– интеграль-}$$

ные ядра релаксации и ползучести;  $t_1$  – базовое время.

Метод разделения удельной механической работы деформирования [4] на упругую  $a_{i0} = 0,5 E_0^{-1} \sigma_i^2$  и вязкоупруго-пластическую  $a_{it} = a_t - a_{t0}$  компоненты применим к полиэфиру нити,

$$a_t = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon = 0,5 E_0 \varepsilon_t^2 - \dot{\varepsilon} (E_0 - E_\infty) \int_0^t \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{\varepsilon s} ds dt \quad (3)$$

произведенной ОАО "Петронить" (г. Санкт-Петербург).

Упругая компонента относительной механической работы  $a_{t0}/a_t$  определялась по процессу растяжения по формуле

$$\frac{a_{t0}}{a_t} = \frac{\varepsilon_t^2 + (1-c)^2 \left( \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{ES} ds \right)^2 + 2\varepsilon_t (1-c) \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{ES} ds}{\varepsilon_t^2 + 2\varepsilon_t (1-c) \int_0^t \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{ES} ds dt}, c = E_\infty/E_0. \quad (4)$$

Упругой и вязкоупругопластической компонентам механической работы деформирования соответствуют упругая  $\varepsilon_{t0}$  и вязкоупругопластическая  $\varepsilon_{t1}$  компоненты полной деформации  $\varepsilon_t$ .

Относительные показатели упругой  $a_{t0}/a_t$  и вязкоупругопластической  $a_{t1}/a_t$  компонент механической работы деформирования полиэфирной нити ( $T = 20^\circ\text{C}$ , скорость деформирования  $\dot{\varepsilon} = 0,083 \text{ c}^{-1}$ ) приведены на рис. 1, откуда видно, что с ростом деформации относительная доля упругой компоненты механической работы падает, а относительная доля вязкоупругопластической компоненты возрастает [5].

Разложение механической работы деформирования на компоненты важно при исследовании влияния внешних механических воздействий на полимерные нити, применяемые в материалах, используемых в качестве составляющих элементов защитных конструкций [6].

Как видно из графика, при малой деформации (2%) преобладают упругие компоненты деформации и механической работы. Доля вязкоупругопластической компоненты механической работы в этом случае не очень значительна и составляет величину порядка 20% [7].

В то же время с увеличением деформации (6%) вязкоупругопластические компоненты механической работы деформирования возрастают, составляя величину около половины от всей затраченной механической энергии [8].

Исследование вязкоупругопластической компоненты механической работы и деформации имеет значение, например, для того, чтобы ответить на вопрос, насколько защитный материал может

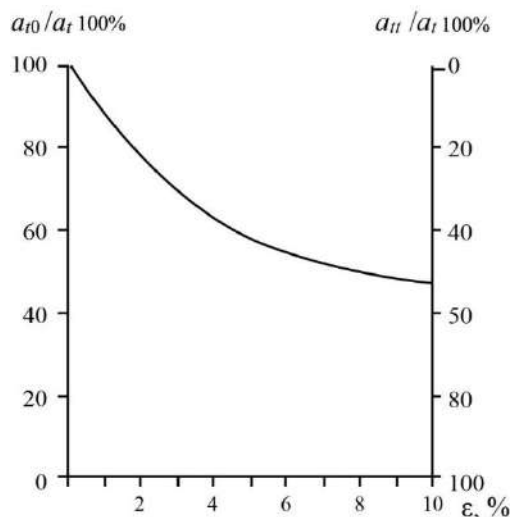


Рис. 1

погасить ударное механическое воздействие.

В этом смысле следует положительно отметить увеличение доли вязкоупругопластической компоненты механической энергии деформирования при увеличении деформации [9].

В то же время при небольшой деформации преобладание упругих компонент деформации и энергии деформирования приводит к тому, что материал хорошо восстанавливается и пригоден для дальнейшего использования [10].

Таким образом, материалу для возвращения в исходное состояние в силу закона сохранения энергии потребуются передать из внешней среды тем больше (в процентном отношении) энергии, чем на большую величину его деформировали.

С другой стороны, данный факт говорит об усилении роли вязкоупругого фактора по мере увеличения деформации [11].



Полная деформация  $\varepsilon_t$  может быть разложена на три основные компоненты деформации: упругую  $\varepsilon_y = \varepsilon_{t0}$ , высокоэластическую (вязкоупругую)  $\varepsilon_\varepsilon$  и пластическую (вязкую)  $\varepsilon_{nl}$  [12].

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t0} + \varepsilon_\varepsilon + \varepsilon_{nl}. \quad (5)$$

Как было видно, процесс разделения деформации на составные части достаточно сложен.

Методы выделения упругой компоненты деформации могут быть основаны либо на использовании экспериментальной диаграммы растяжения, либо на прогнозе – численном решении уравнения нелинейно-наследственной вязкоупругости (1).

При этом оставшаяся поглощаемая компонента деформации  $\varepsilon_{tt}$  представляет собой, по сути, сумму высокоэластической и пластической компоненты [13];

$$\varepsilon_{tt} = \varepsilon_\varepsilon + \varepsilon_{nl}. \quad (6)$$

Компонента высокоэластической деформации  $\varepsilon_\varepsilon$  (так же как и упругая компонента  $\varepsilon_{t0}$ ) является обратимой, а пластическая компонента  $\varepsilon_{nl}$  – необратимой.

Следовательно, полную деформацию можно разделить на обратимую и необратимую компоненты следующим образом [14]:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{обр} + \varepsilon_{необр}, \quad (7)$$

где

$$\varepsilon_{обр} = \varepsilon_{t0} + \varepsilon_\varepsilon \quad (8)$$

– обратимая деформация;

$$\varepsilon_{необр} = \varepsilon_{nl} \quad (9)$$

– необратимая деформация.

Следует заметить, что методы аналитического описания деформационных свойств полимерных нитей, у которых проявляются вязкоупругие свойства в широком диапазоне деформирования, зачастую не учитывают необратимую компоненту дефор-

мации по следующим двум причинам: во-первых, при деформировании доминирующую роль играют вязкоупругие свойства, а не пластические; во-вторых, учет необратимой компоненты деформации заметно усложняет процедуру составления уравнений наследственного типа [15].

## В Ы В О Д Ы

Показано, что качественная оценка эксплуатационных свойств полимерных нитей и изделий из них может быть успешно осуществлена на основе математического моделирования, прогнозирования и системного анализа упругих, вязкоупругих и пластических свойств указанных нитей.

Разработаны методы разделения полной механической работы деформирования и соответствующей ей деформации на упругообратимые и вязкоупругопластические компоненты, которые предлагается использовать как при расчетах эксплуатации полимерных нитей в динамических режимах деформирования, так и для оценки способности текстильных материалов сопротивляться механическим воздействиям и восстанавливать первоначальную форму в процессе эксплуатации.

Качественную оценку эксплуатационных свойств полимерных нитей, а также изделий из них необходимо проводить на стадии их проектирования и организации производства с целью разработки текстильной продукции, обладающей повышенной конкурентоспособностью, что особенно важно в период действия международных санкций.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Вагнер В.И., Егоров И.М., Литвинов А.М., Козлов А.А. Оптимизация моделирования деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 10...12.
2. Козлов А.А. Моделирование эластических свойств полиэфирных крученых текстильных нитей // Химические волокна. 2022. № 2. С. 64...66.
3. Егорова М.А., Козлов А.А. Системный анализ деформационных режимов эксплуатации арамидных текстильных материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 80...83.

4. *Киселев С.В.* Вычисление энергии активации деформационных процессов полимерных волокнистых материалов в режимах релаксации и ползучести // Химические волокна. 2022. № 2. С. 84...86.
5. *Киселев С.В., Козлов А.А.* Компьютерное прогнозирование релаксационных и деформационных спектров полимерных текстильных материалов // Химические волокна. 2022. № 3. С. 13...16.
6. *Киселев С.В.* Вариант математического моделирования деформационных свойств полимерных текстильных нитей // Химические волокна. 2022. № 3. С. 43...46.
7. *Егорова М.А., Егоров И.М.* Компьютерное прогнозирование спектрально-энергетических характеристик полимерных текстильных тканей // Химические волокна. 2022. № 3. С. 34...37.
8. *Киселев С.В., Козлов А.А., Егоров И.М.* Компьютерное прогнозирование деформационных режимов эксплуатации геотекстильных нетканых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 3. С. 214...220.
9. *Киселев С.В.* Методы системного анализа при определении энергии активации процессов релаксации и ползучести полимерных материалов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 2022. № 3. С. 46...50.
10. *Вагнер В.И., Киселев С.В., Козлов С.В.* Разработка методов моделирования эластических свойств крученых текстильных нитей // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 2022. № 3. С. 56...62.
11. *Козлов А.А.* Моделирование эластических свойств крученых текстильных нитей // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 88...96.
12. *Егорова М.А., Егоров И.М.* Системный анализ деформационных процессов арамидных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 136...143.
13. *Киселев С.В.* Автоматизация контроля вязкоупругих характеристик полимерных тканей на основе компьютерного прогнозирования деформационных процессов // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 144...153.
14. *Козлов А.А.* Комплексное исследование функциональных свойств текстильных материалов на основе математического моделирования эксплуатационных процессов // Вестник СПГУТД. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 129...137.
15. *Киселев С.В., Козлов А.А.* Цифровизация прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов // Вестник СПГУТД. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 10...15.
2. *Kozlov A.A.* Modeling of elastic properties of polyester twisted textile threads // Chemical fibers. 2022, No. 2. P. 64...66.
3. *Egorova M.A., Kozlov A.A.* System analysis of deformation modes of operation of aramid textile materials // Chemical fibers. 2022. No. 2. P. 80...83.
4. *Kiselev S.V.* Calculation of the activation energy of deformation processes of polymeric fibrous materials in relaxation and creep modes // Chemical fibers. 2022. No. 2. P. 84...86.
5. *Kiselev S.V., Kozlov A.A.* Computer prediction of relaxation and deformation spectra of polymeric textile materials // Chemical fibers. 2022. No. 3. P. 13...16.
6. *Kiselev S.V.* A variant of mathematical modeling of the deformation properties of polymer textile yarns // Chemical fibers. 2022. No. 3. P. 43...46.
7. *Egorova M.A., Egorov I.M.* Computer prediction of the spectral-energy characteristics of polymer textile fabrics // Chemical fibers. 2022. No. 3. P. 34...37.
8. *Kiselev S.V., Kozlov A.A., Egorov I.M.* Computer prediction of deformation modes of geotextile nonwoven materials' operation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 3. P. 214 ... 220.
9. *Kiselev S.V.* Methods of system analysis in determining the activation energy of the processes of relaxation and creep of polymeric materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Light industry technology. 2022. No. 3. P. 46...50.
10. *Vagner V.I., Kiselev S.V., Kozlov S.V.* Acoust. Development of methods for modeling the elastic properties of twisted textile threads // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Light industry technology. 2022. No. 3. P. 56...62.
11. *Kozlov A.A.* Modeling of elastic properties of twisted textile threads // Design. Materials. Technology. 2022. No. 1. P. 88...96.
12. *Egorova M.A., Egorov I.M.* System analysis of deformation processes of aramid materials // Design. Materials. Technology. 2022. No. 1. P. 136...143.
13. *Kiselev S.V.* Automation of control of viscoelastic characteristics of polymeric fabrics based on computer prediction of deformation processes // Design. Materials. Technology. 2022. No. 1. P. 144...153.
14. *Kozlov A.A.* Comprehensive study of the functional properties of textile materials based on mathematical modeling of operational processes // Vestnik of SPSUTD. Series 4. Industrial technologies. 2022. No. 1. P. 129...137.
15. *Kiselev S.V., Kozlov A.A.* Digitalization of forecasting of operational processes of polymer textile materials // Vestnik of SPSUTD. Series 4. Industrial technologies. 2022. No. 2. P. 10...15.

## REFERENCES

1. *Vagner V.I., Egorov I.M., Litvinov A.M., Kozlov A.A.* Russ. Optimization of modeling of deformation modes of operation of polymeric fibrous materials // Chemical fibers. 2022. No. 2. P. 10...12.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации СПГУТД. Поступила 03.05.23.

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ УСКОРЕННОГО СТАРЕНИЯ  
НА СТАБИЛЬНОСТЬ ХИРУРГИЧЕСКИХ ШОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ИЗ СОПОЛИМЕРА ГЛИКОЛИДА И ЛАКТИДА**

**INFLUENCE OF ACCELERATED AGING CONDITIONS  
ON STABILITY OF SURGICAL SUTURE MATERIALS  
FROM A GLYCOLIDE-LACTIDE COPOLYMER**

*Т.И. ВИНОКУРОВА<sup>1</sup>, К.А. ЛЕНКОВА<sup>2</sup>, Е.С. ЖАВОРОНОК<sup>2</sup>, О.А. ЛЕГОНЬКОВА<sup>1</sup>, И.Н. СЕНЧИХИН<sup>3</sup>,  
А.А. ЗАВИТАЕВА<sup>1</sup>, С.А. КЕДИК<sup>2</sup>*

*T.I. VINOKUROVA<sup>1</sup>, K.A. LENKOVA<sup>2</sup>, E.S. ZHAVORONOK<sup>2</sup>, O.A. LEGONKOVA<sup>1</sup>, I.N. SENCHIKHIN<sup>3</sup>,  
A.A. ZAVITAEVA<sup>1</sup>, S.A. KEDIK<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный медицинский исследовательский центр хирургии  
им. А.В. Вишневого Минздрава России,

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет,

<sup>3</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук)

<sup>1</sup>A.V. Vishnevsky National Medical Research Center of Surgery,

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “MIREA –  
Russian Technological University”,

<sup>3</sup>A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry,  
Russian Academy of Sciences

E-mail: tivinok@mail.ru

*Предложены режимы ускоренных испытаний стабильности рассасывающихся шовных материалов среднего срока сохранения прочности из сополимера гликолида и лактида в соотношении 90:10 (ПГЛ). Нити на основе сополимера гликолида и лактида различных метрических размеров до и после ускоренного старения исследованы методами деформационно-прочностного анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, гель-проникающей хроматографии, ИК-фурье спектроскопии. Показано, что ускоренное старение при 60 и 70 °С стимулирует процессы термодеструкционного характера в полимерной основе нити, что приводит к ухудшению ее прочностных свойств и несоблюдению нормативов государственного стандарта на синтетические рассасывающиеся шовные материалы. Для проведения ускоренных испытаний нитей из сополимера гликолида и лактида на стабильность может быть использована температура не выше 50 °С.*

*Modes of accelerated testing of stability of absorbable suture materials with an average strength retention from a copolymer of glycolide and lactide in a ratio of 90:10 (PGL) have been proposed. Glycolide-lactide copolymer sutures of various metric sizes before and after accelerated aging have been studied by strain-strength analysis, differential scanning calorimetry, gel permeation chromatography, and FT-IR spectroscopy. It is shown that accelerated aging at 60 and 70 °C stimulates the processes of thermal destruction in the polymer base of the suture, which leads to deterioration of strength properties and non-compliance with the state standard for synthetic absorbable suture materials. A temperature not higher than 50 °C should be used for accelerated stability tests of glycolide-lactide copolymer sutures.*

**Ключевые слова:** медицинские полимеры, синтетические рассасывающиеся шовные материалы, хирургические нити, сополимер гликолида и

**лактида, ускоренное старение, температура стеклования, температура плавления, механические свойства.**

**Keywords: medical polymers, synthetic absorbable sutures, surgical suture, glycolide-lactide copolymer, accelerated aging, glass transition temperature, melting temperature, mechanical properties.**

Хирургическими шовными материалами называют материалы, предназначенные для наложения швов или лигатур при хирургических операциях [1, 2]. Наиболее часто в качестве шовных материалов используются специально изготовленные из различных полимеров текстильные нити различной структуры (мононити, крученые, плетеные) [3-5]. В зависимости от способности полимерной основы подвергаться деструкции в организме хирургические нити делятся на нерассасывающиеся и рассасывающиеся (абсорбируемые) [6-9].

С появлением на рынке шовных материалов рассасывающихся хирургических нитей к ним появился особый интерес, поскольку после выполнения своей основной функции (поддержания краев раны до ее заживления) потребность в сохранении шовного материала отпадает, а его дальнейшее нахождение в тканях пациента нежелательно, как любого инородного тела, способного вызвать воспалительную реакцию окружающих тканей или даже инфицирование.

Как известно, в процессе хранения и эксплуатации происходит старение полимеров, приводящее к ухудшению механических и изменению физических и химических свойств изделия [10-14].

Требованием, предъявляемым к любым изделиям, в том числе к шовным материалам, при регистрации их в качестве медицинского изделия является доказательство сохранения ими функциональных свойств в течение всего срока годности, указанного производителем. Для шовных материалов это время составляет, как правило, от 3 до 5 лет, что на многие годы задерживает внедрение новых видов этих изделий в практику здравоохранения.

Альтернативой «старения» полимерных материалов в реальном времени при установленной температуре хранения (обычно комнатной) является метод уско-

ренного старения, позволяющий в более короткие сроки доказать стабильность изделия в пределах его срока годности [15-18].

Стандартные методики ускоренных испытаний стабильности шовных материалов с учетом их специфики в настоящее время отсутствуют. При этом нерассасывающиеся шовные материалы, изготавливаемые из термостойких полимеров (полиэтилентерефталат, поливинилиденфторид, полипропилен, полиамид, политетрафторэтилен, сверхвысокомолекулярный полиэтилен), выдерживают достаточно высокие температуры ускоренного старения – до 70 °С. Это позволяет в относительно короткое время представить доказательства их стабильности, чего нельзя сказать о синтетических рассасывающихся шовных материалах, многие из которых неустойчивы к высоким температурам. Следует отметить, что, по-видимому, для рассасывающихся шовных материалов нельзя ожидать установления универсального режима ускоренных испытаний – он будет существенно зависеть от склонности полимера такого материала к деградации и скорости этого процесса. В данной работе выбраны для исследования шовные материалы на основе сополимера лактида с гликолидом (ПГЛ), характеризующиеся средним временем сохранения прочности в биологических тканях.

Технические требования, предъявляемые к шовным материалам, отражены в ГОСТ 31620-2012 [6], при этом основным требованием является прочность, характеризующаяся величиной разрывной нагрузки в простом узле. Прочность нити должна быть достаточной для обеспечения надежного соединения тканей и сохраняться в течение всего установленного изготовителем срока годности.

Таким образом, целью настоящей работы состояла в исследовании свойств синтетического рассасывающегося шовного мате-

риала из сополимера гликолида с лактидом после экспозиции при нескольких температурах (50, 60 и 70 °С) для определения допустимого температурного интервала проведения процедуры ускоренного старения.

#### Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовали коммерческие стерильные хирургические нити из ПГЛ с соотношением мономерных звеньев 90:10 и покрытием из сополимера гликолида с лактидом в соотношении 70:30 и стеарата кальция, плетёной структуры, окрашенные в фиолетовый цвет, метрических размеров (МР) 2, 3 и 5 (диаметр нитей 0.24, 0.34 и 0.58 мм соответственно), с установленным сроком годности в естественных условиях хранения 3 года. Нити из этого сополимера относятся к шовным материалам среднего сохранения прочности [19], обеспечивая поддержание краев ушитой раны в течение не менее 2 недель. Полная потеря прочности составляет в среднем 28 суток. До эксперимента нити хранили в стерильных упаковках при комнатной температуре (23±2) °С; ускоренные испытания проводили, не извлекая нити из стерильной упаковки, после чего упаковку вскрывали и нити подвергали исследованиям.

#### Методы исследования

Определение времени изотермического выдерживания образцов при заданных

температурах в расчете на 3 года хранения в реальном времени рассчитывали с использованием уравнения Аррениуса по методике [15]:

$$F_{\text{уск}} = Q_{10}^{\frac{(T_{\text{уск}} - T_{\text{хр}})}{10}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{уск}}$  – фактор ускоренного старения;  $T_{\text{уск}}$  – температура ускоренного старения, °С;  $T_{\text{хр}}$  – температура хранения в реальном времени, °С;  $Q_{10}$  – температурный коэффициент скорости реакции, равный двум.

Продолжительность ускоренного старения ( $t_{\text{уск}}$ , сут.) рассчитывали по формуле:

$$t_{\text{уск}} = \frac{t_{\text{хр}}}{F_{\text{уск}}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{хр}}$  – продолжительность хранения или срок годности, сут.

С учетом того, что температура плавления ПГЛ, определенная на основании предварительных результатов ДСК исходных образцов (рис. 1) и литературных данных [20, 21], составляет около 200 °С, а температура размягчения (на основании предварительных экспериментов) 100 °С, для проведения испытаний по ускоренному старению выбраны температуры 50, 60 и 70 °С в течение соответственно 168, 84 и 42 суток.

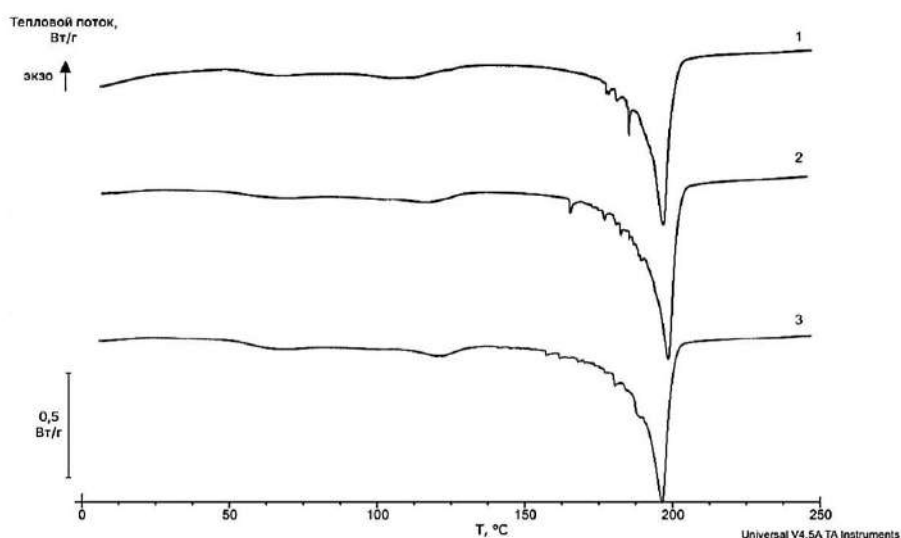


Рис. 1

Ускоренное старение образцов проводили в термостате KBF 115 (Binder, Германия). Исходные нити, а также нити после ускоренного старения исследовали методами:

- гель-проникающей хроматографии (ГПХ) при 25 °С в тетрагидрофуране на хроматографе Gilson с колонкой PLgel 3 µm MIXED Agilent, откалиброванной по узким фракциям полистирола;

- ИК-фурье спектроскопии на приборе IRSpirit с приставкой однократного нарушенного полного внутреннего отражения QATR-S с алмазной призмой;

- дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе DSC Q-100 (TA Instruments, США) в динамическом режиме со скоростью нагрева  $w^+=10$  К/мин в диапазоне температур от 0 до 250 °С. Для исследования образец нити помещали в тигель и плотно прижимали крышкой тигля ко дну с последующим запрессовыванием, при этом дно тигля не деформировалось и было плоским. После первого сканирования образец охлаждали и подвергали повторному нагреву, получая таким образом два прогона;

- деформационно-прочностного анализа на испытательной машине EZTest модификации EZ-LX-0.5 (Shimadzu, Япония) в соответствии с ГОСТ 31620-2012 [6].

Прочностные свойства нитей оценивали в соответствии с ГОСТ 31620-2012 по показателю разрывной нагрузки в простом узле ( $P_{уз}$ ) и относительному удлинению при разрыве в простом узле ( $\epsilon_{уз}$ ) не менее десяти образцов.

Статистическую обработку результатов осуществляли с помощью программы STATISTICA, версия 10.

#### *Результаты и обсуждение*

Типичные термограммы представлены на рис. 1 и 2. Основным эффектом на первичных термограммах всех образцов является эндотермический пик в области от 150 до 210 °С, который соответствует плавлению кристаллической фазы полимера, составляющего основу нити. Других значимых эффектов на этих термограммах нет, то есть доля аморфной фазы в нативных образцах крайне мала, и при первичном выборе режима ускоренных испытаний в качестве верхнего предела следует использовать температуры ниже 150 °С.

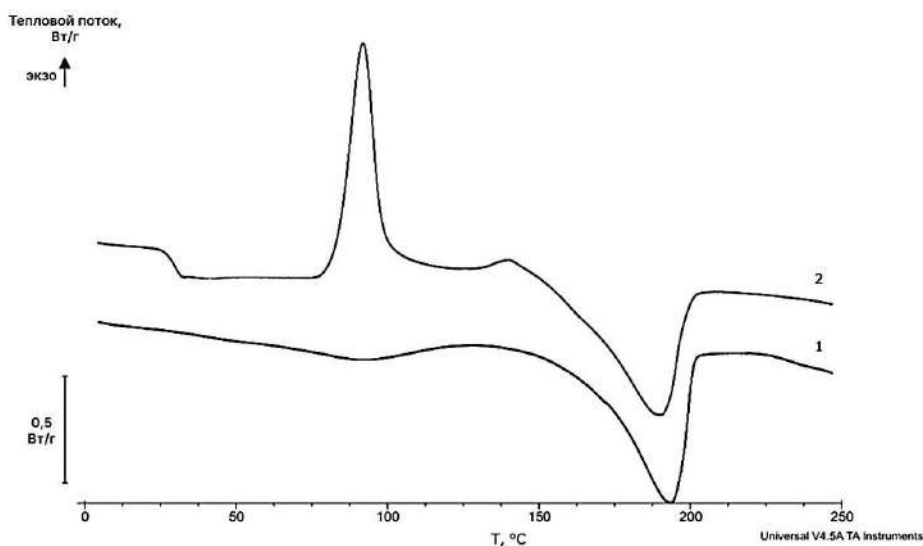


Рис. 2

На термограммах вторых прогонов ДСК (рис. 2) наблюдается серия переходов, которые можно идентифицировать как стеклование (характерная “ступенька” в области от 40 до 60 °С), кристаллизация аморфной фа-

зы (узкий экзотермический пик в области от 80 до 100 °С) и плавление кристаллической фазы (эндотермический пик в области от 150 до 200 °С). Данные переходы характеризуются соответствующими температурами –

стеклования ( $T_g$ ), кристаллизации ( $T_{cryst}$ ) и плавления ( $T_m$ ), значения которых сведены в табл. 1. Из нее видно, что с повышением температуры ускоренных испытаний наблюдается тенденция к уменьшению  $T_g$

и  $T_m$  ПГЛ. Это указывает на протекание термохимических процессов деструкции, сопровождающихся уменьшением молекулярной массы полимера.

Таблица 1

Время, сутки	прогон	$T_g$ , °C	$T_{cryst}$ , °C		$T_m$ , °C	
			начало	пик	начало	пик
ПГЛ, МР 2						
Исходные образцы	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		184	197
	2	42	83	90	176	197
168 сут. при 50 °C	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		183	199
	2	41	83	89	177	199
84 сут. при 60 °C	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		151	187
	2	33	70	78	155	187
42 сут. при 70 °C	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		149	184
	2	19	105	119	158	185
ПГЛ, МР 3						
Исходные образцы	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		191	199
	2	41	83	89	179	198
168 сут. при 50 °C	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		180	198
	2	41	84	90	175	197
84 сут. при 60 °C	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		170	194
	2	31	91	102	160	190
42 сут. при 70 °C	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		156	186
	2	21.8	74	83	145.5	183
ПГЛ, МР 5						
Исходные образцы	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		189	196
	2	41	83	89	176	196
168 сут. при 50 °C	1	<i>отсутствует</i>	<i>отсутствует</i>		146	187
	2	20	65	72	157	187

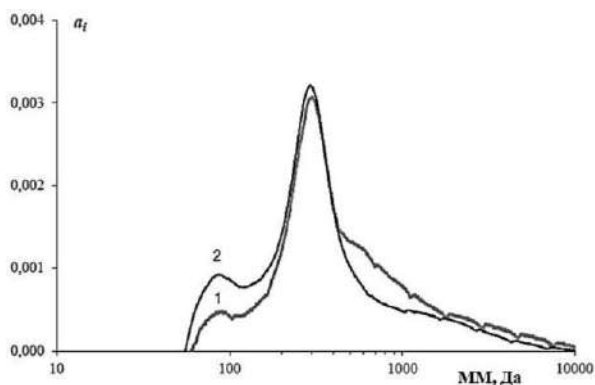


Рис. 3

Полимерная основа нити плохо растворима в обычных органических растворителях, что затрудняет анализ молекулярно-массовых характеристик полимера. Однако оболочка нитей хорошо растворяется в тетрагидрофуране, что дало возможность ее исследования методом гель-проникающей

хроматографии. Типичные дифференциальные кривые молекулярно-массового распределения полимера оболочки ПГЛ нитей представлены на рис. 3, из которого видно, что материал оболочки имеет весьма невысокую молекулярную массу (до 10 кДа) и является смесью мономерных и олигомерных соединений.

Принципиальных изменений молекулярно-массовых распределений нет даже в наиболее жестких условиях ускоренного старения. Тем не менее можно отметить слабо выраженную тенденцию к уменьшению доли высокомолекулярных фракций (в области 1.0 кДа), что также указывает на процессы деструкции олигомерной основы оболочки. Учитывая схожесть природы шовной нити и ее оболочки (согласно составу, заявленному производителем), следует ожидать, что подобные процессы будут протекать в условиях ускоренного старения и с полимерной основой нитей.

Процесс ускоренного старения образцов нитей исследован методом ИК-фурье

спектроскопии. Типичные ИК-фурье спектры образцов приведены на рис. 4.

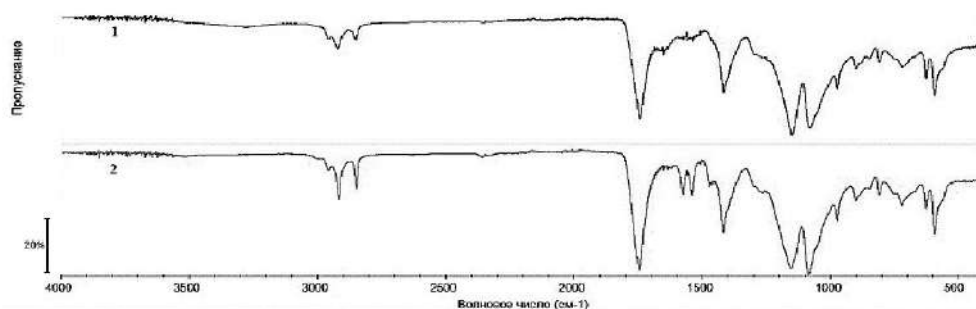


Рис. 4

При анализе этих спектров прежде всего обращает на себя внимание наличие характерной полосы в области  $1720\text{ см}^{-1}$ , свидетельствующей о наличии кетогруппы ( $\text{C}=\text{O}$ ), а также двух полос в областях  $1000\text{-}1200\text{ см}^{-1}$ , характерных для валентных колебаний эфирной связи  $\text{-C-O-C-}$ . ИК-спектры ПГЛ нитей, состаренных в течение 84 суток при  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , практически идентичны исходным образцам нитей.

Различие заключается в появлении полосы поглощения в области  $1500\text{-}1600\text{ см}^{-1}$ , связанной с наличием карбоксилатов ( $\text{-COO}^-$ ), что подтверждает протекание процессов деструкции по сложноэфирной группе.

Результаты проведенных физико-механических испытаний нитей ПГЛ до и после ускоренного старения, приведённые на рис. 5 и в табл. 2, показали, что после воздействия температуры  $50\text{ }^\circ\text{C}$  и прочностные, и деформационные характеристики нитей ПГЛ МР 5 сохранили ( $92 \pm 2$ ) % исходных значений, нитей МР 3 ( $82 \pm 2$ ) %, а нитей МР 2 ( $74 \pm 7$ ) %. При этом все нити после ускоренного старения удовлетворяли требованиям стандарта. Следует, однако, отметить, что нити малого диаметра (МР 2) находились на пределе этих требований (см. рис. 5).

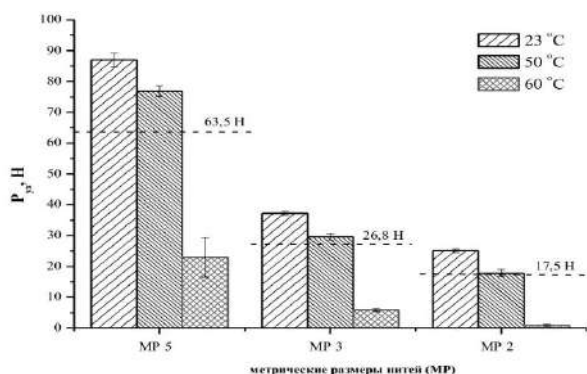


Рис. 5

Таблица 2

МР	Удлинение при разрыве нити в простом узле ( $\epsilon_{уз}$ ), %		
	исходные	$50\text{ }^\circ\text{C}$ , 168 сут.	$60\text{ }^\circ\text{C}$ , 84 сут.
2	$16,7 \pm 0,5$	$12,2 \pm 0,8$	$1,4 \pm 0,3$
3	$15,3 \pm 0,4$	$12,5 \pm 0,5$	$2,6 \pm 0,2$
5	$16,8 \pm 0,5$	$15,4 \pm 0,3$	$4,6 \pm 1,6$

В процессе экспозиции при  $60\text{ }^\circ\text{C}$  нити сохраняли от 4 до 27 % исходных значений прочности в зависимости от МР нити и ни один из образцов не соответствовал требованиям стандарта, а после старения при  $70\text{ }^\circ\text{C}$  испытания всех образцов были невозможны из-за их разрушения.

Таким образом, результаты исследований показали, что испытания по ускоренному старению с целью подтверждения срока годности хирургических нитей на основе сополимера гликолида и лактида допустимо проводить при температурах не выше  $50\text{ }^\circ\text{C}$ .



## ВЫВОДЫ

В результате проведенных деформационно-прочностных и физико-химических исследований свойств нитей ПГЛ, подвергшихся ускоренному старению при разных температурах, превышающих температуру их хранения, с использованием методов дифференциальной сканирующей калориметрии, ИК-фурье спектроскопии и гель-проникающей хроматографии показано, что определение срока годности хирургических нитей из сополимера гликолида и лактида методом ускоренного старения допустимо проводить при температурах, не превышающих 50°C, из-за протекающих в нитях при более высоких температурах процессов термодеструкционного характера.

Учитывая тот факт, что выдержка даже при температуре 50°C нитей ПГЛ малого диаметра приводит к критическому снижению прочности, следует в дальнейшем рассмотреть иные варианты ускоренных испытаний стабильности таких изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяк С.И., Маркевич Е.В., Буравский А.В. Хирургический шовный материал: методические рекомендации. М.: БГМУ, 2011. 56с.
2. Петров С. В. Общая хирургия: учеб. пособие. 4 изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР Медиа, 2014. 43 с.
3. Бонцевич Д.Н. Хирургический шовный материал. М.: Интеграция, 2005. 118 с.
4. Семенов Г.М., Петришин В.Л., Ковишова М.В. Хирургический шов. СПб.: Питер, 2001. 32 с
5. Геллер Л.Н., Беда Н.П., Гравченко Л.А. Медицинское товароведение: Товароведческий анализ шовного материала: методическое пособие к лабораторным занятиям. Иркутск, 2014. С. 10...12.
6. ГОСТ 31620-2012. Материалы хирургические шовные. Общие технические требования. Методы испытаний.
7. Егиев В.Н., Буюнов В.М., Удотов О.А. Хирургический шов. М.: Медпрактика-М., 2001. С.8.
8. Бонцевич Д.Н. Хирургический шовный материал // Проблемы здоровья и экологии. 2005. №3. С. 3...6.
9. Латышнина Л.С., Васильев Ю.С., Финадеев А.П., Кузьмина Е.В., Пономарев К.П. Техника хирургических швов: учеб. пособие. Челябинск, 2017.
10. Энциклопедия полимеров. М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 3. С. 479.
11. Zhavoronok E.S., Senchikhin I.N. A new approach to estimate the curing mode of thermosetting

polymer films with regard to physical aging and slow chemical processes // Journal of Applied Polymer Science. 2020; e49373. doi:10.1002/app.49373

12. Заиков Г.Е. Почему стареют полимеры // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т.6. № 12. С. 48...50.

13. Богданов Д.А., Субботин Е.В., Ершов С.В., Казаков А.В. Исследование теплового старения полимеров // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2014. №9. С. 57.

14. Козлов Н.А., Митрофанов А.Д. Физика полимеров: учеб. пособие. Владимир: Владимир. гос. ун-т, 2001. 345 с.

15. ASTM F 1980-16 Standard Guide for Accelerated Aging of Sterile Medical Device Packages.

16. ГОСТ 9.707-81. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение.

17. ГОСТ 9.715-86. Материалы полимерные. Методы испытаний на стойкость к воздействию температуры.

18. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов.

19. ГОСТ Р 59675-2021. Материалы хирургические имплантируемые синтетические рассасывающиеся. Метод деградации *invitro*.

20. Singh A., Guedes R.M. Investigation Mechanical Properties of PGLA Fibers as a Function of Degradation Time // Procedia Structural Integrity. 2020. V. 28. P. 2218...2227. DOI:10.1016/prostr.2020.11.050

21. Легонькова О.А., Асанова Л.Ю. Линейные полиэфиры в современной медицине // Высокотехнологическая медицина. 2017. № 1. С. 16...31.

## REFERENCES

1. Tretyak S.I., Markevich E.V., Buravsky A.V. Surgical suture material: Guidelines. M.: BSMU, 2011. 56 с.
2. Petrov S.V. General surgery: Textbook. 4th ed., revised. and additional. M.: GEOTAR Media, 2014. 43 с.
3. Bontsevich D.N. Surgical suture M.: Integration, 2005. 118 с.
4. Semenov G.M., Petrishin V.L., Kovshova M.V. Surgical suture. St. Petersburg: Peter, 2001. 32 с.
5. Geller L.N., Beda N.P., Gravchenko L.A. Medical merchandising: Commodity analysis of suture material // Methodical manual for laboratory studies. Irkutsk, 2014. С. 10...12.
6. GOST 31620-2012. Surgical suture materials. General technical requirements. Test methods.
7. Egiev V.N., Buyanov V.M., Udotov O.A. Surgical suture. M.: Medpraktika-M., 2001. P. 8.
8. Bontsevich D.N. Surgical suture material // Problems of health and ecology. 2005. No. 3. P. 3...6.
9. Latyushina L.S., Vasiliev Yu.S., Finadeev A.P., Kuzmina E.V., Ponomarev K.P. Technique of surgical sutures: Textbook. Chelyabinsk, 2017.

10. Encyclopedia of polymers. Moscow: Soviet Encyclopedia, 1977. T. 3. C. 479.
11. Zhavoronok E.S., Senchikhin I.N. A new approach to estimate the curing mode of thermosetting polymer films with regard to physical aging and slow chemical processes // Journal of Applied Polymer Science. 2020; e49373. doi:10.1002/app.49373
12. Zaikov G.E. Why polymers age // Soros Educational Journal. 2000. T.6. No. 12. P. 48 ... 50.
13. Bogdanov D.A., Subbotin E.V., Ershov S.V., Kazakov A.V. Study of thermal aging of polymers // Bulletin of PNRPU. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2014. No. 9. P. 57.
14. Kozlov N.A., Mitrofanov A.D. Physics of polymers // Proc. Benefit. Vladimir: Vladimir state un-t, 2001. 345 p.
15. ASTM F 1980-16 Standard Guide for Accelerated Aging of Sterile Medical Device Packages.
16. GOST 9.707-81. Polymeric materials. Methods for accelerated testing for climatic aging.
17. GOST 9.715-86. Polymeric materials. Test methods for resistance to temperature.
18. GOST R 51372-99. Methods of accelerated tests for durability and storage under the influence of aggressive and other special environments for technical products, materials and systems of materials.
19. GOST R 59675-2021 Surgical implantable synthetic absorbable materials. In vitro degradation method.
20. Singh A., Guedes R.M. Investigation Mechanical Properties of PGLA Fibers as a Function of Degradation Time // Procedia Structural Integrity. 2020. V. 28. P. 2218 ... 2227. DOI:10.1016/prostr.2020.11.050
21. Legonkova O.A., Asanova L.Yu. Linear polyesters in modern medicine // High-tech medicine. 2017. No. 1. P. 16...31.

Рекомендована отделом перевязочных, шовных и полимерных материалов в хирургии НМИЦ хирургии им. А.В. Вишневского Минздрава России и кафедрой биотехнологии и промышленной фармации Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА). Поступила 09.06.23.

УДК 66.081.6

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_74

## **СВОЙСТВА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОЛОВОЛОКОННЫХ МЕМБРАН, ПОЛУЧЕННЫХ СУХО-МОКРЫМ СПОСОБОМ ФОРМОВАНИЯ, НА ОСНОВЕ НОВОГО ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФОНА\***

### **PROPERTIES OF ULTRAFILTRATION HOLLOW FIBER MEMBRANES, OBTAINED BY DRY-JET WET SPINNING PROCESS, BASED ON A NEW POLYPHENYLENE SULFONE**

*А.Ю. РАЕВА, Д.Н. МАТВЕЕВ, А.А. ЖАНСИТОВ, С.Ю. ХАШИРОВА, И.Л. БОРИСОВ*

*A.Y. RAEVA, D.N. MATVEEV, A.A. ZHANSITOV, S.Y. KHASHIROVA, I.L. BORISOV*

(Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова)

(Kabardino-Balkarian State University Named After H.M. Berbekov)

E-mail: raevaau@ips.ac.ru

***В данной работе методом сухо-мокрого формования получены высокопроницаемые ультрафильтрационные полволоконные мембраны на основе нового полифениленсульфона (ПФСФ) с  $M_w = 100000$  г/моль. Исследованы вязкостные свойства формовочных растворов в N-метилпирролидоне (НМП) с добавкой порообразователя полиэтиленгликоля (ПЭГ400,  $M_w = 400$  г/моль). Пористую структуру мембран исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Показано, что полволоконные***

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00711 «Создание новых гидролитически стойких высокопроницаемых мембран на основе модифицированного полифениленсульфона с оптимизированной химической структурой для фильтрации бактерий и вирусов из воды».

*мембраны имели асимметричную структуру с селективным слоем на внутренней поверхности, расположенным на пронизанном пальцевидными макропустотами подложечном слое. Установлено, что наилучшие ультрафильтрационные свойства (проницаемость по воде 130,5 л/м<sup>2</sup>·ч·атм и коэффициент задерживания модельного вещества Blue Dextran 99,5 %) демонстрирует полволоконная мембрана, полученная из раствора ПФСФ / НМП / ПЭГ400 состава 20/50/30 % масс.*

*In this work, high-permeability ultrafiltration hollow fiber membranes based on new polyphenylene sulfone (PPSU) with  $M_w = 100000$  g/mol were produced by dry-jet wet spinning process. Viscosity properties of dope solutions in N-methylpyrrolidone (NMP) with pore-forming additive polyethylene glycol (PEG400,  $M_w = 400$  g/mol) were investigated. The porous structure of the membranes was studied using scanning electron microscopy (SEM). It was shown that hollow fiber membranes had an asymmetric structure with a selective layer on the inner surface located on the substrate layer penetrated by finger-like macrovoids. It was found that the best ultrafiltration properties (water permeability 130,5 L/m<sup>2</sup>·h·bar and Blue Dextran rejection coefficient 99,5 %) are shown by the hollow fiber membrane which is obtained from PPSU / NMP / PEG400 solution of 20/50/30 % wt.*

**Ключевые слова:** полифениленсульфон, вязкость, полволоконная мембрана, ультрафильтрация, инверсия фаз, сухо-мокрое формование, растворы полимеров, пористая структура.

**Keywords:** polyphenylene sulfone, viscosity, hollow fiber membrane, ultrafiltration, phase inversion, dry-jet wet spinning, polymer solutions, porous structure.

Нехватка чистой питьевой воды в настоящее время становится одной из глобальных мировых проблем. По оценкам Организации Объединенных Наций, 2 млрд человек проживают в странах, испытывающих дефицит водных ресурсов [1]. Одной из причин такого дефицита является загрязнение пресных источников отходами биогенного происхождения. Решением данной проблемы является применение методов обеззараживания воды: хлорирование, УФ-излучение, озонирование, пастеризация и пр. Однако все перечисленные способы дезинфекции имеют свои недостатки, среди которых основными являются высокие энергетические затраты и образование побочных вредных продуктов. По этой причине мембранная фильтрация, в частности ультрафильтрация (УФ), как малоэнергоёмкая и экологичная технология становится одной из самых

востребованных альтернатив очистки воды от патогенных микроорганизмов [2].

Полимерные материалы, такие, как поливинилидендифторид, полисульфон (ПСФ), полиамид, полиэфирсульфон (ПЭС) и ацетаты целлюлозы, в настоящее время преобладают на рынке мембран из-за их низкой стоимости, а также простоты получения и масштабируемости [2-4]. При фильтрации сред, содержащих патогенные организмы, к мембранам предъявляются дополнительные требования, прежде всего возможность регенерации [4] и стерилизации [5]. Наиболее распространённым и экономичным методом стерилизации фильтрационных мембран является обработка перегретым паром при температуре выше 100 °С. Немногие коммерческие полимерные мембраны могут выдержать такую обработку, регулярно повторяемую при длительной работе. Например, поли-

меры с высокой химической стойкостью, такие, как ПСФ и ПЭС, могут выдержать не более 100 циклов паровой стерилизации, по данным производителя полимеров BASF.

Полифениленсульфон (ПФСФ) является перспективным полимерным материалом для производства фильтрационных мембран. ПФСФ обладает высокой длительной термостойкостью, высокой механической прочностью, повышенной стойкостью к гидролизу, пластификации и растрескиванию под действием ряда органических растворителей [6-8]. Температура стеклования ПФСФ (220 °С) выше, чем у ПСФ (190 °С), и близка к температуре стеклования ПЭС (225 °С). По данным производителя ПФСФ (BASF), этот полимер не меняет своих характеристик даже после 2000 циклов стерилизации перегретым паром, что делает его перспективным для использования в медицине и фармацевтической промышленности. Тем не менее использование коммерческих марок ПФСФ ограничено для получения мембран ввиду низких показателей молекулярной массы ( $M_w = 50000-60000$  г/моль) и растворимости.

Ранее впервые с помощью экспресс-метода мокрого формования мембран [9] были получены высокопроизводительные полволоконные УФ мембраны на основе синтезированного ПФСФ с оптимизированной молекулярной массой  $M_w = 102000$  г/моль [10]. Однако используемый для получения полых волокон экспресс-метод при всех своих достоинствах имеет ряд ограничений, в частности малую длину получаемых образцов и сложность контролирования геометрических параметров полого волокна [9]. Сухо-мокрый способ формования является наиболее широко используемым для получения мембран различного назначения [11]. Целью данной работы является получение и изучение свойств полволоконных мембран из синтезированного ПФСФ с  $M_w = 100000$  г/моль, полученных сухо-мокрым способом формования.

#### Методы исследования

Для синтеза ПФСФ применяли 4,4'-дигидроксидифенил (ДГДФ), 4,4'-дихлордифенилсульфон (ДХДФС) производства Alfa Aesar (99 %, Neysam, UK), карбонат калия приобретен у «РЕАХИМ» (Москва), диметилацетамид (ДМАА) предоставлен «ЭКОС-1» (99 %, Москва).

Синтез ПФСФ проводили в четырехгорлой колбе, снабженной механической мешалкой, термопарой, капилляром для подачи инертного газа, ловушкой Дина-Старка и обратным холодильником. В сосуд загружали 55,8 г (0,3 моль) ДГДФ, 86,1 г (0,3 моль) ДХДФС, 69,1 г (0,45 моль) карбоната калия, 470 мл ДМАА. Реакционную массу постепенно нагревали до 165 °С при непрерывном перемешивании в токе инертного газа с целью отгона смеси ДМАА и воды в течение 4 часов. После достижения 165 °С смесь выдерживали при этой температуре в течение 6 часов для проведения реакции поликонденсации. Далее полимерный раствор охлаждали до 90 °С, добавляли 7 г щавелевой кислоты в 50 мл ДМАА, отфильтровывали и высаживали в дистиллированную воду методом распыления. Затем полимер многократно промывали горячей дистиллированной водой и сушили в вакуумно-сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 12 часов.

Для приготовления формовочных растворов в качестве растворителя использовался N-метилпирролидон (ReagentPlus, 99 %, Sigma-Aldrich, США), в качестве порообразователя – полиэтиленгликоль с молекулярной массой  $M_w = 400$  г/моль (ПЭГ400, Acros Organics, США). Составы формовочных растворов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ образца	СПФСФ, % масс.	Смп, % масс.	СПЭГ400, % масс.
1	18	62	20
2		57	25
3		52	30
4	20	60	20
5		55	25
6		50	30

Для измерения динамической вязкости использовали ротационный вискозиметр Brookfield DV III-Ultra. Измерения для каждого раствора проводили при температуре 20 °С.

Образцы полволоконных мембран из ПФСФ получали методом сухо-мокрого формования на установке, подробно представленной в работе [12]. Для образования внутреннего канала применяли дистиллированную воду. В работе использовали кольцевую формовочную фильеру с внешним и внутренним диаметрами 0,8 и 0,5 мм соответственно.

Для характеристики структуры и морфологии мембран использован метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). СЭМ проводилась на установке "Thermo Fisher Phenom XL G2 Desktop SEM" (США). С помощью магнетронного напылителя "Cressington 108 auto Sputter Coater" (Великобритания) на подготовленные образцы в вакуумной камере (~0,01 мбар) наносился тонкий (5-10 нм) слой золота. Ускоряющее напряжение при съемке микрофотографий составляло 15 кэВ.

Эксперимент по ультрафильтрации проводили на установке, описанной в работе [9]. Измерения проводили в проточном режиме при трансмембранном давлении 1 атм. Проницаемость рассчитывали по формуле:

$$P = \frac{V}{S \cdot t \cdot \Delta p}, \quad (1)$$

где  $P$  – проницаемость, л/м<sup>2</sup>·ч·атм;  $V$  – объем отобранной пробы, л;  $t$  – время отбора проб, ч;  $S$  – площадь поверхности селективного слоя короткой пробы полого волокна, м<sup>2</sup>;  $\Delta p$  – избыточное давление, атм.

Расчет коэффициента задерживания проводили по формуле:

$$R = \frac{1 - C_p}{C_f} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $R$  – коэффициент задерживания, %;  $C_p$  – концентрация растворенного вещества в пермеате, мг/л;  $C_f$  – концентрация

растворенного вещества в исходном потоке, мг/л.

Для измерения коэффициента задерживания использовали водный раствор Blue Dextran ( $M_w = 69000$  г/моль) с концентрацией 100 мг/кг.

#### Результаты и обсуждения

Так как вязкость формовочного раствора является одной из его ключевых характеристик при формировании полволоконных мембран, на первом этапе работы было проведено исследование вязкости полученных ПФСФ растворов. Из рис. 1 видно, что увеличение концентрации добавки ПЭГ400 от 20 до 30 % масс. приводило к резкому увеличению вязкости формовочных растворов с 24 до 46 Па·с в случае 18 % масс. ПФСФ, с 49 до 82 Па·с в случае 20 % масс. ПФСФ.

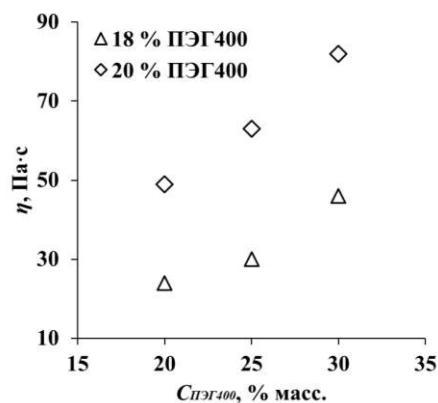


Рис. 1

Далее из формовочных растворов (см. табл. 1) сухо-мокрым методом формования были получены образцы полволоконных мембран. Все полволоконные ПФСФ охарактеризованы с точки зрения проницаемости воды и задерживания модельного красителя Blue Dextran ( $M_w = 69000$  г/моль). Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

СПФСФ, % масс.	СПЭГ400, % масс.	$P$ , л/м <sup>2</sup> ·ч·атм	$R_{Blue}$ Dextran, %
18	20	63,6	87,5
	25	58,3	90,1
	30	49,2	94,1
20	20	57,4	99,9
	25	74,5	99,9
	30	130,5	99,5

Получение мембран сухо-мокрым способом формования позволило добиться повышения проницаемости по воде в 1,5-3 раза при идентичном составе по сравнению с образцами, полученными экспресс-методом [9]. Из табл. 2 можно заметить, что наиболее высокоэффективная мембрана получена из раствора ПФСФ с концентрацией 20 % масс. в НМП с добавлением 30 % масс. ПЭГ400. Проницаемость по воде данной мембраны составила 130,5 л/м<sup>2</sup>·ч·атм, коэффициент задерживания модельного красителя Blue Dextran, моделирующего по размеру бактерии и вирусы, – 99,5 %.

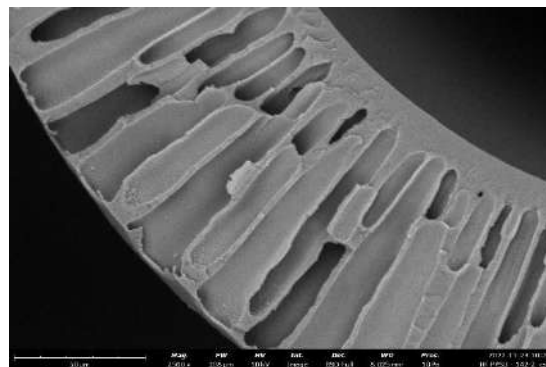
В случае мембран, полученных экспресс-методом, наилучшими транспортными свойствами ( $P = 95,7$  л/м<sup>2</sup>·ч·атм,  $R_{\text{Blue Dextran}} = 99,9$  %) обладала мембрана, полученная из аналогичной формовочной композиции. Повышение проницаемости может быть связано с тем, что толщина селективного слоя полволоконных мембран, полученных в данной работе, несколько меньше по сравнению с мембранами, полученными с использованием экспресс-метода. Следовательно, гидравличе-

ское сопротивление мембран с более тонким селективным слоем меньше, что влечет за собой повышение проницаемости. Селективность при этом практически остается неизменной, что может свидетельствовать о бездефектности селективного слоя.

Полученные мембраны охарактеризованы методом СЭМ (рис. 2). Из рис. 2 видно, что полученные полволоконные мембраны имеют асимметричную структуру с селективным слоем на внутренней поверхности, расположенным на пронизанном пальцевидными макропустотами подложечном подслое (рис. 2, б). По СЭМ-микрофотографиям оценены геометрические параметры полволоконных мембран из ПФСФ. Толщина стенок полых волокон варьировалась от 100 до 160 мкм, внутренний диаметр волокон составлял 0,4-0,6 мм, внешний диаметр – 0,6-0,8 мм. Разница геометрических параметров обусловлена, по всей видимости, отличающимися вязкостями формовочных растворов (условия формования полволоконных мембран были идентичны).



а



б

Рис. 2

## ВЫВОДЫ

На основе нового синтезированного высокомолекулярного полифениленсульфона ( $M_w = 100000$  г/моль) получены ультрафильтрационные полволоконные мембраны с внутренним селективным слоем методом сухо-мокрого формования. Исследование вязкостных свойств растворов ПФСФ/НМП/ПЭГ400 показало, что увели-

чение концентрации добавки ПЭГ400 от 20 до 30 % масс. приводит к резкому увеличению вязкости формовочных растворов. Установлено, что наилучшие ультрафильтрационные свойства демонстрирует полволоконная мембрана, полученная из раствора ПФСФ/НМП/ПЭГ400 состава 20/50/30 % масс. Проницаемость по воде данной мембраны составила 130,5 л/м<sup>2</sup>·ч·атм, коэффициент задержива-

ния модельного красителя Blue Dextran ( $M_w = 69000$  г/моль) – 99,5 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. United Nations – The Sustainable Development Goals Report 2019. – <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019.pdf>

2. *Landsman M.R., Sujanani R., Brodfuehrer S.H., Cooper C.M., Darr A.G., Davis R.J., Katz L.E.* Water treatment: Are membranes the panacea? // Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2020, 11. P. 559...585.

3. *Liu F., Hashim N.A., Liu Y., Abed M.M., Li K.* Progress in the production and modification of PVDF membranes // Journal of membrane science. 2011, 375 (1-2). P. 1...27.

4. *Zodrow K., Brunet L., Mahendra S., Li D., Zhang A., Li Q., Alvarez P.J.* Polysulfone ultrafiltration membranes impregnated with silver nanoparticles show improved biofouling resistance and virus removal // Water research. 2009, 43 (3). P. 715...723.

5. *Eray E., Candelario V. M., Boffa V., Safafar H., Østedgaard-Munck D.N., Zahrtmann N., Jørgensen M.K.* A roadmap for the development and applications of silicon carbide membranes for liquid filtration: Recent advancements, challenges, and perspectives // Chemical Engineering Journal. 2021, 414. P. 128826.

6. *Praneeth K., James T., Sridhar S.* Design of novel ultrafiltration systems based on robust polyphenylsulfone hollow fiber membranes for treatment of contaminated surface water // Chemical Engineering Journal. 2014, 248. P. 297...306.

7. *Darvishmanesh S., Jansen J.C., Tasselli F., Tocci E., Luis P., Degreève J., Van der Bruggen B.* Novel polyphenylsulfone membrane for potential use in solvent nanofiltration // Journal of Membrane Science. 2011, 379 (1-2). P. 60...68.

8. *Darvishmanesh S., Tasselli F., Jansen J.C., Tocci E., Bazzarelli F., Bernardo P., Van der Bruggen B.* Preparation of solvent stable polyphenylsulfone hollow fiber nanofiltration membranes // Journal of membrane science. 2011, 384 (1-2). P. 89...96.

9. *Anokhina T., Raeva A., Makaev S., Borisov I., Vasilevsky V., Volkov A.* Express method of preparation of hollow fiber membrane samples for spinning solution optimization: Polysulfone as example // Membranes. 2021, 11 (6). P. 396.

10. *Anokhina T., Raeva A., Sokolov S., Storchun A., Filatova M., Zhansitov A., Kurdanova Z., Shakhmurzova K., Khashirova S., Borisov I.* Effect of Composition and Viscosity of Spinning Solution on Ultrafiltration Properties of Polyphenylene Sulfone Hollow-Fiber Membranes // Membranes. 2022, 12 (11). P. 1113.

11. *Peng N., Widjojo N., Sukitpaneelit P., Teoh M.M., Lipscomb G.G., Chung T.S., Lai J.-Y.* Evolution of polymeric hollow fibers as sustainable tech-

nologies: Past, present, and future // Progress in Polymer Science. 2012, 37 (10). P. 1401...1424.

12. *Матвеев Д.Н., Кутузов К.А., Василевский В.П.* Влияние постфильтровой вытяжки на морфологию полволоконных мембран из полисульфона // Мембраны и мембранные технологии. 2020, 10 (6). С. 373...379.

#### REFERENCES

1. United Nations – The Sustainable Development Goals Report 2019. – <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019.pdf>

2. *Landsman M.R., Sujanani R., Brodfuehrer S. H., Cooper C.M., Darr A.G., Davis R.J., Katz L.E.* Water treatment: Are membranes the panacea? // Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2020, 11. P. 559...585.

3. *Liu F., Hashim N.A., Liu Y., Abed M.M., Li K.* Progress in the production and modification of PVDF membranes // Journal of membrane science. 2011, 375 (1-2). P. 1...27.

4. *Zodrow K., Brunet L., Mahendra S., Li D., Zhang A., Li Q., Alvarez P.J.* Polysulfone ultrafiltration membranes impregnated with silver nanoparticles show improved biofouling resistance and virus removal // Water research. 2009, 43 (3). P. 715...723.

5. *Eray E., Candelario V. M., Boffa V., Safafar H., Østedgaard-Munck D. N., Zahrtmann N., Jørgensen M.K.* A roadmap for the development and applications of silicon carbide membranes for liquid filtration: Recent advancements, challenges, and perspectives // Chemical Engineering Journal. 2021, 414. P. 128826.

6. *Praneeth K., James T., Sridhar S.* Design of novel ultrafiltration systems based on robust polyphenylsulfone hollow fiber membranes for treatment of contaminated surface water // Chemical Engineering Journal. 2014, 248. P. 297...306.

7. *Darvishmanesh S., Jansen J.C., Tasselli F., Tocci E., Luis P., Degreève J., Van der Bruggen B.* Novel polyphenylsulfone membrane for potential use in solvent nanofiltration // Journal of Membrane Science. 2011, 379 (1-2). P. 60...68.

8. *Darvishmanesh S., Tasselli F., Jansen J.C., Tocci E., Bazzarelli F., Bernardo P., Van der Bruggen B.* Preparation of solvent stable polyphenylsulfone hollow fiber nanofiltration membranes // Journal of membrane science. 2011, 384 (1-2). P. 89...96.

9. *Anokhina T., Raeva A., Makaev S., Borisov I., Vasilevsky V., Volkov A.* Express method of preparation of hollow fiber membrane samples for spinning solution optimization: Polysulfone as example // Membranes. – 2021, 11 (6). P. 396.

10. *Anokhina T., Raeva A., Sokolov S., Storchun A., Filatova M., Zhansitov A., Kurdanova Z., Shakhmurzova K., Khashirova S., Borisov I.* Effect of Composition and Viscosity of Spinning Solution on Ultrafiltration Properties of Polyphenylene Sulfone Hollow-Fiber Membranes // Membranes. 2022, 12 (11). P. 1113.

11. Peng N., Widjojo N., Sukitpaneenit P., Teoh M.M., Lipscomb G.G., Chung T.S., Lai J.-Y. Evolution of polymeric hollow fibers as sustainable technologies: Past, present, and future // Progress in Polymer Science. 2012, 37 (10). P. 1401...1424.

12. Matveev D.N., Kutuzov K.A., Vasilevsky V.P. Effect of draw ratio on the morphology of polysulfone

hollow fiber membranes // Membranes and Membrane Technologies. 2020, 2 (6). P. 351...356.

Рекомендована оргкомитетом XIX международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитавские чтения». Поступила 18.07.23.

УДК 677.01

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_80

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ КАЧЕСТВА СПЕЦОДЕЖДЫ ИЗ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ТКАНЕЙ\*

### ENSURING THE REQUIRED QUALITY LEVEL OF WORKWEAR MADE OF NANOMODIFIED FABRICS

*Р.Ф. ГАЙНУТДИНОВ, В.В. ХАММАТОВА*

*R.F. GAINUTDINOV, V.V. KHAMMATOVA*

(Казанский национальный исследовательский технологический университет)

(Kazan National Research Technological University)

E-mail: venerabb@mail.ru

*Представлены результаты научного исследования, ориентированного на решение проблем повышения качества натуральных текстильных материалов для специальной одежды. Цель работы заключалась в разработке способа получения наномодифицированных текстильных материалов для спецодежды за счет предварительной плазменной обработки в потоке неравновесной низкотемпературной плазмы пониженного давления, а затем пропитки коллоидным раствором наночастиц серебра, что позволило повысить разрывную нагрузку, относительное разрывное удлинение и биостойкость опытных образцов. Объектом исследования выбрана специальная одежда, изготовленная из парусины полупельняной с содержанием 100% целлюлозосодержащих волокон и сукна шинельного на основе 87% шерстяных, 13% полиэфирных волокон. Для экспериментальных исследований контрольных и наномодифицированных образцов использовали разрывную машину МТ110-5, а для определения биостойкости образцов применяли тест-культуры *Bacillus subtilis* и *Escherichia coli* O55. Наномодифицирова-*

\* Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.



ние текстильных материалов для спецодежды проводили с использованием промышленной плазменной установки периодического действия «ВАТТ 1500 ПТ ПЛАЗМА», а затем материалы пропитывали коллоидным раствором наночастиц серебра для придания антимикробных свойств. Выявлено, что в результате наномодифицирования разрывная нагрузка парусины полупеньной повысилась на 22,3 - 26,3%, а сукна шинельного на 130 - 140%; относительное разрывное удлинение соответственно повысилось на 35,9% и 86,7%. При этом снижение разрушающей нагрузки под действием микрофлоры *Bacillus subtilis* в контрольных образцах составило 2,49% в сутки и в наномодифицированных 0,51% в сутки, под действием бактерий *Escherichia coli* O55 соответственно 2,54% и 0,61% в сутки. Установлено, что максимальное значение показателей механических свойств парусины полупеньной достигается при концентрации наночастиц серебра 0,3% и плазменной обработке в потоке ННТП пониженного давления: при рабочем давлении в вакуумной камере  $P_k=20-22$  Па, времени воздействия  $\tau=2$  м/мин, мощности разряда  $W_p = 1,7$  кВт и расходе плазмообразующего газа  $G_{возд} = 0,04$  г/с, а сукна шинельного - при концентрации наночастиц серебра 0,5% и ННТП обработке в режиме: давление в вакуумной камере ( $P_k$ ) = 25-27 Па; мощность разряда ( $W_p$ ) = 4,0 кВт; время воздействия плазмой ( $\tau$ ) = 2 м/мин; расход плазмообразующего газа ( $G_{возд}$ ) = 0,04 г/с.

*The results of scientific research aimed at solving the problems of improving the quality of natural textile materials for special clothing are presented. The purpose of the work was to develop a method for producing nanomodified textile materials for workwear through preliminary plasma treatment in a flow of nonequilibrium low-temperature plasma of low pressure, and then impregnation of silver nanoparticles with a colloidal solution, which made it possible to increase the breaking load, relative elongation at break and bio-stability of prototypes. The object of the study was special clothing made from «Semi-linen canvas» containing 100% cellulose-containing fibers and «Overcoat cloth» based on 87% wool, 13% polyester fibers. For experimental studies of control and nanomodified samples, an MT110-5 tensile testing machine was used, and test cultures of *Bacillus subtilis* and *Escherichia coli* O55 were used to determine the biostability of the samples. Nanomodification of textile materials for workwear was carried out first using an industrial plasma installation of periodic action «VATT 1500 PT PLASMA», and then impregnated with a colloidal solution of silver nanoparticles to assess the sensitivity of microorganisms to the action of antibiotics and antiseptics on solid nutrient media of experimental samples. In the developed nanomodified fabrics for workwear, the breaking load in «Half-linen canvas» increased from 22,3 to 26,3%, and in «Overcoat cloth» it ranged from 130 to 140%; the relative elongation at break increased accordingly from 35,9% to 86,7%. At the same time, the average rate of reduction in destructive stress under the influence of microflora *Bacillus subtilis* in control samples was 2,49% per day and in nanomodified samples 0.51% per day. Under the influence of *Escherichia coli* bacteria, O55 in control samples was 2,54% per day, and in nanomodified samples the rate was 0.6% per day. At the same time, it was established that textile fabrics «Half-linen canvas» for workwear achieve maximum mechanical properties with a concentration of silver nanoparticles of 0,3% and preliminary plasma treatment in a low-pressure NNTP flow: at an operating pressure in the vacuum chamber  $P_k = 20 - 22$  Pa, exposure time  $\tau=2$  m/min, discharge power  $W_p = 1,7$  kW and plasma gas flow rate  $G_{air} = 0,04$  g/s, and for «Overcoat cloth» at a concentration of silver nanoparticles of 0,5% and*

*NNTP processing in the mode: pressure in the vacuum chamber ( $P_k$ ) = 25-27 Pa; discharge power ( $W_p$ ) = 4,0 kW; plasma exposure time ( $\tau$ ) = 2 m/min; flow of plasma-forming gas ( $G_{air}$ ) = 0,04 g/s.*

**Ключевые слова:** текстильный материал, парусина, сукно, неравновесная низкотемпературная плазма, механические свойства, наноструктурирование, специальная одежда, биостойкость.

**Keywords:** textile material, canvas, cloth, nonequilibrium low-temperature plasma, mechanical properties, nanostructuring, special clothing, biostability.

Повышение качества и конкурентоспособности продукции является одной из ключевых задач текстильной промышленности, решаемых путем создания эффективных ресурсосберегающих технологий, позволяющих повысить механические и бактерицидные свойства. Проблема повышения качества текстильных материалов для специальной одежды носит сложный комплексный характер и включает учет множества различных требований, из которых прежде всего выделяют технологические и эксплуатационные, определяющие соответствие специальной одежды своему назначению. При этом необходим достаточный ресурс защитных свойств, гарантирующий надежность изделий в эксплуатации [1], а качество текстильных материалов во многом определяет срок эксплуатации спецодежды [2].

Спецодежда из текстильных материалов (парусина, сукно), предназначенная для проведения сварочных работ, известна и представлена на российском рынке. Созданию качественно новых натуральных материалов из шерсти, хлопка и льна сегодня уделяется особое внимание во всем мире. Во-первых, создаются огнеупорные и термостойкие хлопчатобумажные ткани со специальной обработкой. Во-вторых, развивается производство тканей на основе синтетических волокон, таких, как арамиды, иногда – в сочетании с хлопком или вискозой. В-третьих, есть особые материалы для работы в условиях открытого пламени, и некоторые производители творчески подходят к переосмыслению этого традиционного типа спецодежды [3].

Существующие методы управления структурой натуральных материалов, в

легкой промышленности имеют свои недостатки. Они требуют больших затрат времени и труда, а также специальных химических активаторов, специализированного оборудования и дополнительных производственных площадей. Кроме того, в некоторых случаях эти методы могут быть токсичными и небезопасными для окружающей среды. При реализации этих методов возникают трудности, связанные с соединением текстильных материалов с огнестойкими покрытиями [4-6].

Особое внимание уделяется группе показателей надежности и стойкости спецодежды. Эти показатели соответственно объединяют механические свойства, такие, как разрывная нагрузка и относительное разрывное удлинение, а также биостойкость опытных образцов спецодежды [7].

С появлением новых технологий и исследований в области управления микроструктурой натуральных материалов открываются новые перспективы для создания эффективных и экологически безопасных способов их обработки. Одним из таких способов являются нанотехнологии, которые позволяют изменять структуру и свойства текстильных материалов. Применение коллоидного раствора наночастиц серебра (КРНС), например, позволяет контролировать микроструктуру и повышать биостойкость материалов без использования токсичных химических веществ.

Кроме того, активно ведутся исследования в области нанесения полимерных покрытий на поверхность текстильных материалов. Новые методы модификации текстильных материалов, такие, как электростатическое и плазменное наноструктурирование, позволяют достичь прочного и

надежного соединения КРНС с поверхностью материалов, улучшая их стойкость и долговечность. Это открывает новые возможности для создания качественной и надежной спецодежды для сварщиков.

Развитие новых методов управления микроструктурой натуральных материалов имеет несколько преимуществ. Во-первых, эти методы позволяют достичь повышенных механических свойств материалов, что важно для создания прочной и долговечной спецодежды. Во-вторых, использование таких методов не требует применения токсичных веществ, что положительно сказывается на экологической безопасности производства. Кроме того, новые методы управления микроструктурой материалов обладают еще одним преимуществом - они позволяют сократить затраты на оборудование и производственные площади, что делает производство тканей для спецодежды более эффективным и экономически выгодным.

Вместе с тем развитие новых методов управления микроструктурой натуральных материалов требует дальнейших исследований и технологического совершенствования. Необходимо учитывать, как потенциальные преимущества, так и возможные недостатки этих методов. Например, при использовании нанотехнологий необходимо обеспечить безопасность и контроль за выделением наночастиц в окружающую среду. Также важно разрабатывать новые способы нанесения полимерных покрытий, чтобы обеспечить их равномерное распределение и минимизировать возможность возникновения дефектов.

Таким образом, развитие новых методов управления микроструктурой натуральных текстильных материалов легкой промышленности открывает широкие перспективы для создания качественной и экологически безопасной спецодежды. Применение нанотехнологий и новых методов нанесения полимерных покрытий позволяет улучшить характеристики материалов без использования токсичных веществ, что является важным шагом в развитии устойчивых и инновационных решений в области производства спецодежды.

Повышение качества текстильных материалов для спецодежды является не легкой задачей, реализация которой основывается на применении нанотехнологий, которые связаны с воздействием потока неравновесной низкотемпературной плазмы (ННТП) пониженного давления для улучшения их механических свойств и закрепления КРНС на поверхности материалов.

Поскольку полученный текстильный материал используется для пошива костюмов сварщиков и специалистов химической промышленности, которые подвергаются в процессе их эксплуатации воздействию высокой температуры и различных агрессивных сред. Поэтому качественная специальная одежда из текстильных материалов должна полностью выдерживать механические нагрузки и деформации, материал должен отлично выдерживать резкие скачки температуры и другие негативные воздействия погодных условий.

В данной работе приведены результаты исследования влияния потока ННТП пониженного давления на механические свойства и биостойкость текстильных материалов для специальной одежды, которые проводились на контрольных и наномодифицированных образцах.

#### *Материалы и методы*

В качестве объекта исследования выбран ассортимент специальной одежды, изготовленный из тканей: парусина полупульняная с содержанием 100% целлюлозосодержащих волокон и сукно шинельное на основе 87% шерстяных и 13% полиэфирных волокон, характеристики которых представлены в табл. 1.

Наноструктурирование опытных образцов текстильных материалов для спецодежды осуществляли на полупромышленной плазменной установке периодического действия «ВАТТ 1500 ПТ ПЛАЗМА». Специфической особенностью комплекса является непрерывная подача рулонных тканей в камеру и межэлектродное пространство в условиях вакуума и потока ННТП пониженного давления.

Т а б л и ц а 1

№ образца	Наименование тканей	Артикулы	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Состав текстильных материалов				Виды пропиток
				шерсть овечья	полиэфир	лен	хлопок	
1.	Сукно шинельное серое 2С-4ОП Цвет серый	6425	760	87	13	-	-	огнестойкая, особопрочная
2.	Полульняная парусина	11292	550±40	-	-	50	50	светопрочная комбинированная пропитка повышенной водостойкости, огнестойкости

Наноструктурирование происходило в потоке ННТП при температуре 80<sup>0</sup>С в сети переменного тока напряжением 380/220 В ± 5%, частотой 13,56МГц. В качестве плазмообразующего газа использовали воздух.

Варьирование входных параметров плазменной установки осуществлялось в диапазоне: мощность разряда  $W_p$  от 3,0 до 4,5 кВт, расход плазмообразующего газа  $G$  от 0 до 0,06 г/с, давление в вакуумной камере  $P_k$  от 20 до 30 Па и время обработки ( $\tau$ ) от 1 до 3 м/мин.

После плазменного наноструктурирования текстильных материалов проводилась последующая пропитка КРНС для проведения равномерной биоцидной обработки, чтобы наночастицы серебра лучше поглощались и равномерно распределялись на поверхности натуральных материалов.

Осуществлялась оценка качественных характеристик надежности образцов после наноструктурирования в потоке ННТП пониженного давления по показателям разрывная нагрузка и относительное разрывное удлинение. Определение данных характеристик в контрольных и наноструктурированных образцах текстильных материалов проводили при одноосном растяжении материалов на разрывной машине МТ110-5 согласно ГОСТ 3813-72 (ИСО 5081-77, ИСО 5082-82) [8].

Полученные опытные образцы одежды текстильных материалов для спецодежды, прежде всего, должны соответствовать требованиям безопасности труда ГОСТ Р ЕН 340-210 (EN 340:2003).

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена гистограмма изменения разрывной нагрузки исследуемых образцов текстильных материалов от воздействия потока ННТП пониженного давления и КРНС. Экспериментальные исследования образцов показали, что для улучшения прочности парусины полульняной более чем на 26,4 % требуется обработка при концентрации наночастиц серебра 0,3% и плазменном наномодифицировании в режиме: давление в вакуумной камере  $P_k = 20-21$  Па; мощность разряда  $W_p = 3,5$  кВт; время воздействия плазмой  $\tau = 3$  м/мин; расход плазмообразующего газа  $G_{\text{возд}} = 0,04$  г/с, а для сукна шинельного – при концентрации наночастиц серебра 0,5% и плазменном наномодифицировании в режиме: давление в вакуумной камере  $P_k = 25-27$  Па; мощность разряда  $W_p = 4,0$  кВт; время воздействия плазмой  $\tau = 2$  м/мин; расход плазмообразующего газа  $G_{\text{возд}} = 0,04$  г/с.

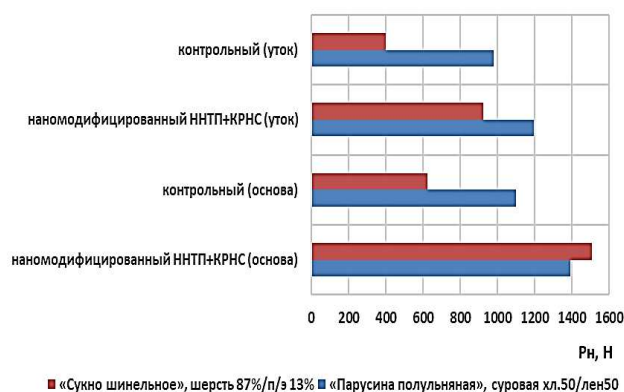


Рис. 1

Как видно из рис. 1, в опытных образцах наномодифицированных текстильных материалов для спецодежды после закрепления КРНС потоком ННТП пониженного давления, разрывная нагрузка ( $P_n$ ) парусины полульняной повысилась относительно контрольных образцов на 22,3-26,3%, а сукна шинельного на 130-140%.

Полученные результаты влияния параметров наномодифицирования опытных образцов на относительное разрывное удлинение натуральных текстильных материалов для спецодежды представлены на рис. 2.

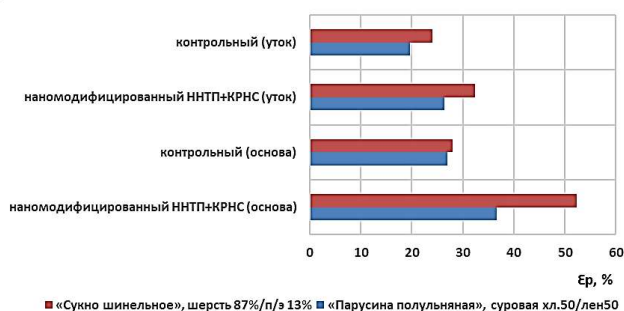


Рис. 2

Исследования (рис. 2) показали, что в том же режиме наномодифицирования образцов парусины полульняной при  $P_k = 20-21$  Па;  $W_p = 3,5$  кВт;  $\tau = 3$  м/мин;  $G_{возд} = 0,04$  г/с относительное разрывное удлинение увеличилось до 35,9% как по основе, так и по утку, а для сукна шинельного при концентрации наночастиц серебра 0,5% и плазменном наномодифицировании в режиме:  $P_k = 25-27$  Па;  $W_p = 4,0$  кВт;  $\tau = 2$  м/мин;  $G_{возд} = 0,04$  г/с относительное разрывное удлинение повысилось на 86,7% по основе и на 35 % по утку, что превышает требования ГОСТ.

Биостойкость образцов текстильных материалов оценивали с использованием стандартного метода исследования чувствительности микроорганизмов к действию антибиотиков и антисептиков на твердых питательных средах (диффузионный метод бумажных дисков) по ГОСТ [9]. В работе использовали тест-культуры *Bacillus subtilis* и *Escherichia coli* O55. Результаты исследования представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Виды экспериментальных образцов	Вид микрофлоры	Коэффициент биостойкости по разрывной нагрузке			Среднее значение снижения разрывной нагрузки в сутки, %
		Время воздействия микрофлоры, сутки			
		5	10	15	
Контрольный	<i>Bacillus subtilis</i>	75,6	73,6	50,7	2,49
	<i>Escherichia coli</i> O55	78,1	71,6	52,7	2,54
Наномодифицированный ННТП+КРНС	<i>Bacillus subtilis</i>	96,7	94,1	91,6	0,51
	<i>Escherichia coli</i> O55	96,4	92,6	90,2	0,62

Как видно из полученных данных табл. 2, коэффициент биостойкости всех исследованных текстильных материалов снижается с увеличением времени воздействия микроорганизмов, при этом следует отметить, что действие бактерий *Escherichia coli* O55 более сильное по сравнению с действием бактерий *Bacillus subtilis*. Среднее снижение прочности тканей под действием микрофлоры *Bacillus subtilis* в контрольных образцах составило 2,49% в сутки, в наномодифицированных – 0,51% в сутки, под действием бактерий

*Escherichia coli* O55 в контрольных образцах – 2,54% в сутки, в наномодифицированных – 0,62%. То есть снижение прочности меньше в 4,0 раза, чем у контрольных образцов.

## В Ы В О Д Ы

Применение комбинированного метода обработки – наномодифицирования КРНС и потоком ННТП пониженного давления способствует повышению разрывной нагрузки и относительного разрывного

удлинения, а также биостойкости. Данный факт позволяет рекомендовать данный вид обработки для текстильных материалов для спецодежды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хамматова Э.А., Абуталипова Л.Н. Сохранение качества наноструктурированных текстильных материалов после эксплуатационной носки специальной одежды // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 5 (395). С. 83...88.

2. Малых А.Р. Ассортимент современных огнестойких текстильных материалов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2016. Т.3. С. 116...120. – <http://e-koncept.ru/2016/56035.htm>.

3. Новые идеи и решения СИЗ для сварщика: <https://getsiz.ru/novye-idei-i-resheniya-siz-dlya-svarshchika.html> (дата обращения: 11.12.22).

4. Хамматова В.В., Гайнутдинов Р.Ф. Влияние потока плазмы на повышение физико-механических свойств технических материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 6. С. 56...62.

5. Коломейцева Э.А., Смирнов Г.А., Морыганов А.П. Инновационный технический текстиль военного и гражданского назначения с использованием огнезащитных препаратов Термотекс // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 3(405) С. 133... 138.

6. Новые разработки ООО "Апотекс". – [www.apotex.ru](http://www.apotex.ru).

7. Зурабян К.М., Краснов Б.Я., Пустильник Я.И. Материаловедение швейного в производстве изделий легкой промышленности. М.: Информ-Знание, 2003. 384 с.

8. ГОСТ 3813-72 (ИСО 5081-77, ИСО 5082-82) Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении. М.: Изд-во стандартов, 1973. 6 с.

9. ГОСТ 9.060–75 Ткани. Метод лабораторных испытаний на устойчивость к микробиологическому разрушению. М.: Изд-во стандартов, 1976. 8 с.

#### REFERENCES

1. Khammatova E.A., Abutalipova L.N. Preservation of the quality of nanostructured textile materials after operational wear of special clothing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 5 (395). P. 83...88.

2. Malykh A.R. Assortment of modern fire-resistant textile materials // Scientific and methodological electronic journal "Concept". 2016. T. 3. P. 116...120. – <http://e-koncept.ru/2016/56035.htm>.

3. New ideas and solutions of PPE for welder: <https://getsiz.ru/novye-idei-i-resheniya-siz-dlya-svarshchika.html> (date of notification: 11.12.22).

4. Khammatova V.V., Gainutdinov R.F. Effect of plasma flow on improving the physical and mechanical properties of technical materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2020, 6. P. 56...62.

5. Kolomeitseva E.A., Smirnov G.A., Moryganov A.P. Innovative technical textiles for military and civil purposes using fire-retardant preparations Thermotex // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023, No. 3(405). P. 133... 138.

6. New developments of Apotex LLC. – [www.apotex.ru](http://www.apotex.ru).

7. Zurabyan K.M., Krasnov B.Ya., Pustilnik Ya.I. Material science of sewing in the production of light industry products. M.: Publishing center "Academy", 2003. 384 p.

8. GOST 3813-72 (ISO 5081-77, ISO 5082-82) Textile materials. Fabrics and piece goods. Methods for determination of tensile breaking characteristics. M.: Standards Publishing House, 1973. 6 p.

9. GOST 9.060–75 Fabrics. Method of laboratory testing for resistance to microbiological destruction. M.: Standards Publishing House, 1976. 8 p.

Рекомендована кафедрой дизайна ФГБОУ ВО «КНИТУ». Поступила 11.09.23.

УДК 677.03

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_87

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПЛАНОВ ОЧИСТКИ ХЛОПКА-СЫРЦА  
И ВОЛОКНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАСОРЕННОСТИ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ**

**DETERMINATION OF OPTIMAL PLANS FOR RAW COTTON  
AND FIBRE CLEANING DEPENDING  
ON THE CONTAMINATION OF THE INITIAL RAW MATERIAL**

*Р.Т. КАЛДЫБАЕВ, Г.Ю. КАЛДЫБАЕВА, Д.Д. ДАЙРАБАЙ,  
Н. КОБЕЕВА, У.Р. КАЮМОВА, К. БЕКТАЕВ*

*R.T. KALDYBAEV, G.YU. KALDYBAEVA, D.D. DAIRABAY,  
N. KOBEEVA, U.R. KAYUMOVA, K. BEKTAEV*

(Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова, Казахстан)

(M. Auezov South Kazakhstan University, Kazakhstan)

E-mail: rashid\_cotton@mail.ru

*В данной статье проведено исследование засоренности хлопка-сырца и хлопкового волокна на двух действующих хлопкоперерабатывающих заводах городов Жетысай и Туркестан южного региона Республики Казахстан, где выращивается хлопчатник.*

*В ходе эксперимента определена засоренность хлопка-сырца средневолокнистых сортов хлопчатника после процесса джинирования и проведено ее сопоставление со значениями после волокноочистителя: первого пыльного цилиндра; после двух пыльных цилиндров и после трех пыльных цилиндров. Все эксперименты проведены при однократной и двукратной очистке хлопка-сырца.*

*Для практического пользования составлена таблица для выбора оптимальных кратностей очистки хлопка-сырца и волокна в зависимости от засоренности исходного сырья.*

*Результаты эксперимента рекомендованы для выбора оптимальных планов очистки хлопка-сырца и волокна для вышеуказанных действующих хлопкозаводов.*

*In this article research of raw cotton and cotton fiber clogging at two operating cotton processing plants of Zhetysay and Turkestan cities of southern region of the Republic of Kazakhstan where cotton is grown has been conducted.*

*During the experiment, the fouling of raw cotton after the ginning process was determined and their comparison with the values after the fiber cleaner: the first*

*sawing cylinder; after two sawing cylinders and after three sawing cylinders was carried out. All experiments were made at single and double cleaning of raw cotton..*

*For practical use, a table for selecting the optimal multiplicity of purification of raw cotton and fiber, depending on the contamination of the initial raw material has been compiled.*

*Results of the experiment will be recommended for selection of optimal plans of cleaning of raw cotton and fiber for above-mentioned operating cotton mills.*

**Ключевые слова:** хлопок-сырец, волокно, очистка хлопка-сырца, пороки, засоренность, волоконоочиститель.

**Keywords:** raw cotton, fiber, cleaning of raw cotton, defects, contamination, fiber cleaner.

### *Введение*

Хлопок-сырец, заготавливаемый хлопкозаводами, очень неравномерен по засоренности. Среднестатистические данные свидетельствуют о том, что засоренность хлопка-сырца I сорта ручного и машинного сбора составляет соответственно порядка 2 и 8%, III сорта обоих видов сбора – на уровне 10–12%, а IV сорта – в среднем 17%. На отдельных заводах могут наблюдаться весьма существенные отклонения от этих средних показателей в ту и другую сторону. Поэтому практически засоренность хлопка-сырца колеблется от одного до нескольких десятков процентов [1].

Такой широкий диапазон засоренности сырья требует дифференцированного подхода у выбору технологии его переработки.

Согласно регламентированному технологическому процессу очистка хлопка-сырца может производиться только по двум схемам: однократной – при пропуске хлопка-сырца через параллельно установленные очистители 1ХК, 1ХП, УХК и батарею ЧХ-5 (ЧХ-3М2 «Мехнат») и двукратной – при последующем пропуске хлопка-сырца через аналогичное оборудование [2].

Существующий технологический процесс не предоставляет широких возможностей для варьирования параметров первичной очистки хлопка-сырца на хлопкозаводах. Вследствие этого при переработке хлопка-сырца машинного сбора, как правило, включается в работу максимальное количество очистительного оборудования,

хотя это не всегда полезно, а зачастую недопустимо.

Как известно, качество волокна, а точнее его чистота, оценивается согласно СТ РК 1095-2002 суммой пороков и засоренности, которая складывается из различного сочетания жестких и мягких пороков [3]. Компоненты, входящие в состав суммы пороков и засоренности, неодинаково влияют на протекание технологического процесса прядильных фабрик и качество выпускаемой текстильной продукции [4]. Например, крупные сорные примеси, улюк и дробленое семя эффективно выделяются оборудованием прядильных фабрик, а такие пороки, как кожица с волокном, узелки и жгутики, практически не выделяются и, более того, их количество за счет измельчения отдельных пороков даже увеличивается. Следовательно, для текстильной промышленности небезразлично, из каких фракций складывается сумма пороков и засоренности волокна.

При интенсивной обработке волокна различными рабочими органами в процессе первичной переработки хлопка-сырца не исключены повреждения его целостности (вплоть до разрыва) и накопления усталостных признаков. Исходя из этого технологический процесс хлопкозавода необходимо строить с учетом получения волокна не только стандартного качества по сумме пороков и засоренности, но и с высокими прядильно-технологическими свойствами. Это условие должно неукоснительно выполняться в хлопкоочи-



тельной промышленности, поскольку оно направлено на улучшение качества выпускаемой продукции [5].

Вместе с тем, несмотря на ценовые надбавки за чистоту волокна, переочистка его невыгодна и самим хлопкозаводам, так как при усиленной очистке возрастают угары производства, которые не всегда компенсируются вышеупомянутыми ценовыми надбавками, особенно в тех случаях, когда должным образом не налажена работа угарных цехов.

Таким образом, технологический процесс хлопкозавода должен быть гибким, с тем чтобы при переработке хлопка-сырца различного качества можно было получить волокно с суммой пороков и засоренности в расчетных нормах стандарта и с высокими прядильно-технологическими свойствами [6].

Решить эту проблему путем только изменения кратности очистки хлопка-сырца, как это делается в настоящее время на хлопкозаводах, не представляется возможным. В связи с этим возникает необходимость менять также и кратность очистки волокна.

#### Методы исследований

В настоящее время большинство хлопкозаводов, перерабатывающих хлопок-сырец средневолокнистых селекционных сортов, оснащено трехступенчатыми волоконноочистителями ОВП, 2ОВП и 3ОВП-М (3ОВП). На этих машинах имеется возможность менять кратность очистки волокна путем исключения из работы отдельных пыльных цилиндров. Так, если остановить последний третий пыльный цилиндр, то будет осуществляться двукратная очистка волокна, а если остановить два пыльных цилиндра, то – однократная. Таким образом, с учетом вариантов очистки хлопка-сырца представляется возможным при существующей технологии первичной обработки хлопка-сырца вести дифференцированную его переработку в зависимости от исходной засоренности. Характер изменения засоренности хлопка-сырца в зависимости от кратности его очистки показан на рис. 1, где кривая 1 – однократная очистка, кривая 2 – двукратная.

Как видно из графика, изменение засоренности хлопка-сырца носит нелинейный характер, что объясняется особой зависимостью очистительного эффекта оборудования очистительного цеха от исходной засоренности сырья. С ростом исходной засоренности хлопка-сырца до 10% очистительный эффект оборудования также растет, а затем начинает падать. Это можно объяснить тем, что средневолокнистый хлопок-сырец, как показывают статистические данные, с засоренностью до 10% относится к первым сортам, а выше 10% – к низким сортам.

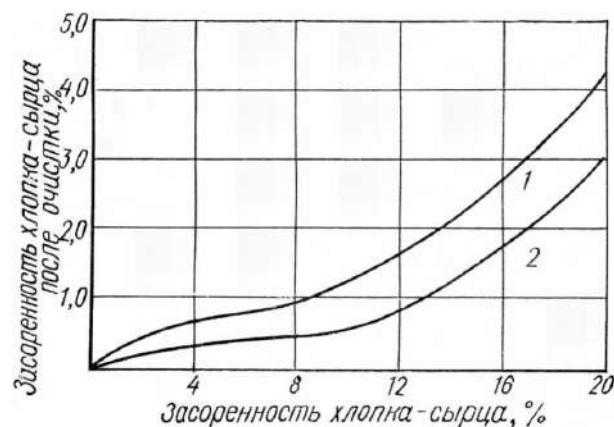


Рис. 1

На рис. 2 дан график зависимости очистительного эффекта однократной (кривая 1) и двукратной (кривая 2) очистки хлопка-сырца от исходной засоренности.

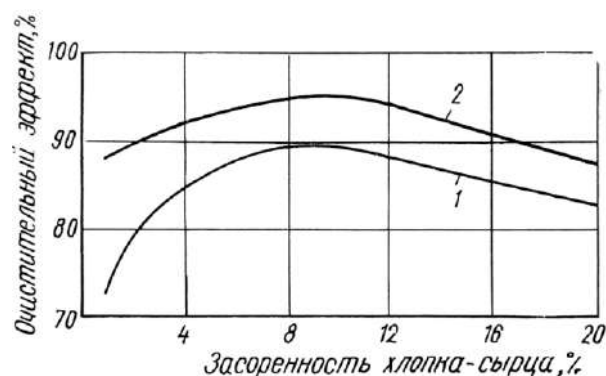


Рис. 2

Как известно, с понижением сорта хлопка-сырца ухудшается выделение сорных примесей вследствие природного снижения зрелости и упругости сора и во-

локна. Максимальный очистительный эффект по сору при однократной очистке хлопка-сырца находится на уровне 89%, а при двукратной достигает 96-98%. Однако по этим высоким показателям еще нельзя судить о преимуществе повышения кратности очистки хлопка-сырца, так как при этом отмечается ряд отрицательных явлений: повышенная поврежденность семян и образование свободного волокна.

Вместе с тем преимущество высокого очистительного эффекта двукратной очистки хлопка-сырца средневолокнистых селекционных сортов С4727 и им подобных по сравнению с однократной почти сглаживается уже после джинирования. На

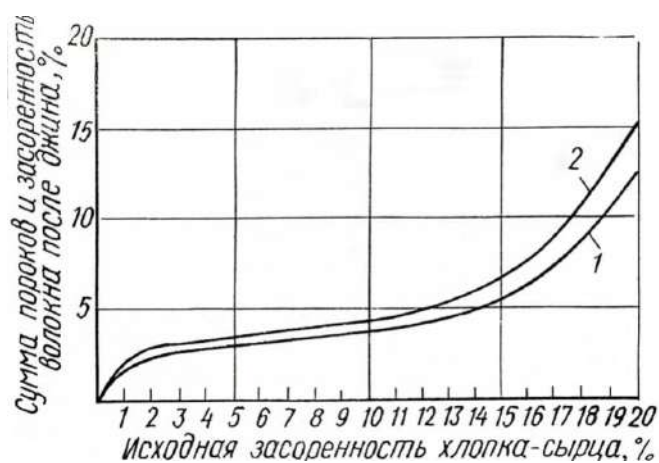


Рис. 3

На рис. 4 показано изменение в зависимости от суммы пороков и засоренности волокна после джина очистительного эффекта волокноочистителя ЗОВП (кривая 1) при различной кратности очистки 2ОВП (кривая 2) и ОВП (кривая 3). Приведенные зависимости показывают, что очистительный эффект волокноочистителя существенно зависит от уровня суммы пороков и засоренности волокна после джина.

По имеющимся значениям очистительного эффекта волокноочистителя можно найти величины суммы пороков и засоренности волокна после различной кратности его очистки, что видно из графика, приведенного на рис. 5, где кривая 1 – при очистке на ЗОВП, кривая 2 – на 2ОВП, кривая 3 – ОВП.

Путем совмещения графиков, представленных на рис. 3 и 5, построены ко-

рис. 3 показаны кривые зависимости суммы пороков и засоренности волокна после джина от исходной засоренности хлопка-сырца. Обе кривые, соответствующие однократной (кривая 1) и двукратной (кривая 2) очистке хлопка-сырца, почти сливаются, что свидетельствует о небольшом влиянии на сумму пороков и засоренности волокна различной степени очистки хлопка-сырца. В последующем после прохождения волокна через волокноочистители эта разница еще больше уменьшается и практически кратность очистки хлопка-сырца уже почти не сказывается на сумме пороков и засоренности волокна в кипах.

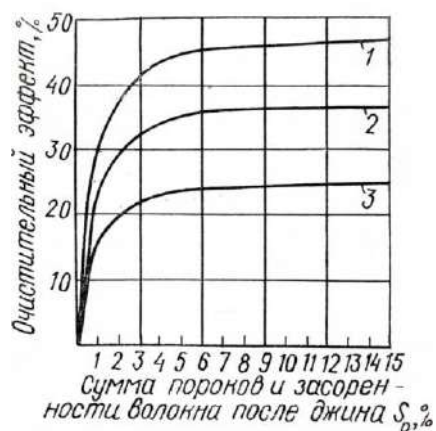


Рис. 4

нечные графики, описывающие зависимость суммы пороков и засоренности очищенного волокна непосредственно от исходной засоренности хлопка-сырца. На рис. 6 показан график для однократной очистки хлопка-сырца, а на рис. 7 – двукратной. Кривые на обоих рисунках имеют аналогичные значения: кривая 1 – при очистке на ЗОВП, кривая 2 – на 2ОВП, кривая 3 – на ОВП.

По этим двум графикам можно выбрать оптимальную кратность очистки хлопка-сырца и волокна в зависимости от засоренности исходного сырья. Для этого находим точку пересечения оси, соответствующей исходной засоренности хлопка-сырца, с осью, соответствующей расчетной норме суммы пороков и засоренности волокна для данного сорта по результатам апробации.



Рис. 5

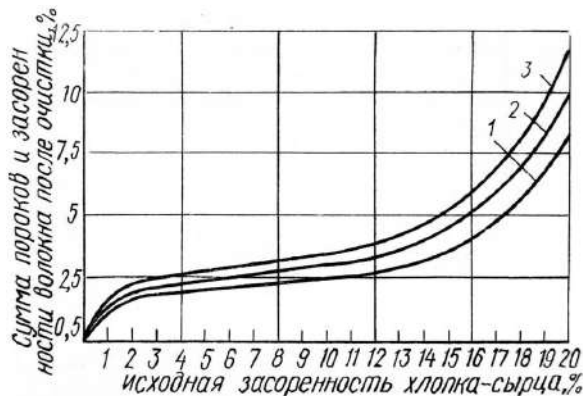


Рис. 6

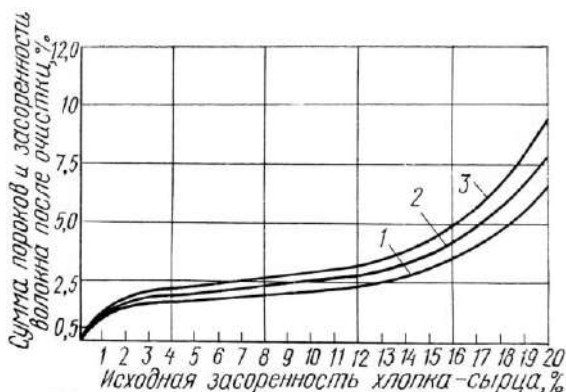


Рис. 7

Таким образом, только по исходной засоренности хлопка-сырца без других дополнительных о нем сведений можно регламентировать режим его переработки. На первый взгляд может показаться, что одного этого показателя недостаточно, поскольку такие характеристики, как вид сбора или промышленный сорт хлопка-сырца, играют существенную роль. С этим нельзя не согласиться, но при принятой нами системе регламентирования оба этих важных показателя косвенно учитываются.

#### Результаты и обсуждение

Статистические данные промышленности показывают, что хлопок-сырец первых сортов с засоренностью ниже 5%, как правило, ручного сбора, а выше 5% – машинного.

Хлопок-сырец низких сортов ручного и машинного сбора имеет примерно одинаковую засоренность, поэтому нет необхо-

димости подразделять его по данному показателю [7].

Что касается промышленного сорта хлопка-сырца, то он косвенно учитывается через сорт волокна, значение которого совершенно необходимо при выборе регламента очистки, так как расчетная сумма пороков и засоренности волокна определяется именно по этому показателю.

Принятое допущение несколько снижает точность решения задачи, но вместе с тем упрощает ее и делает более доступной для практического использования. Поэтому на первом этапе для выбора регламента переработки хлопка-сырца вполне достаточно двух критериев – исходной засоренности его и сорта волокна. При последующем развитии данного метода возможно привлечение и других характеристик как хлопка-сырца, так и волокна.

По зависимостям, показанным на рис. 6 и 7, для удобства их использования на практике составлена таблица для выбора оптимальных кратностей очистки хлопка-сырца и волокна в зависимости от засоренности исходного сырья.

Из данных таблицы видно, что расчетные нормы суммы пороков и засоренности волокна можно получить либо при однократной очистке хлопка-сырца и усиленной очистке волокна, либо при двукратной очистке хлопка-сырца и ослабленной очистке волокна.

Таблица 1

Кратность очистки хлопка-сырца	Качественные показатели хлопка-сырца и волокна по основным переходам технологического процесса	Исходная засоренность хлопка сырца																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Однократная	Остаточная засоренность хлопка-сырца после питателя джина, %	0,26	0,40	0,52	0,60	0,70	0,74	0,80	0,90	1,03	1,20	1,40	1,62	1,86	2,10	2,36	2,68	2,94	3,32	3,74	4,26
	Сумма пороков и засоренности волокна, %:																				
	- после джина	2,0	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5	4,8	5,3	5,8	6,6	7,6	9,0	10,7	12,8	15,0
	после волоконочистителя ЗОВП-М при работе:																				
	- первого пыльного цилиндра	1,6	2,1	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,3	3,5	3,7	4,1	4,4	5,0	5,8	6,8	8,0	9,6	11,2
- двух пыльных цилиндров		1,8	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	3,0	3,1	3,4	3,7	4,2	4,9	5,8	6,7	8,1	9,4	
- трех пыльных цилиндров			1,7	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,9	3,1	3,6	4,1	4,9	5,7	6,8	8,0	
Двукратная	Остаточная засоренность хлопка-сырца после питателя джина, %	0,15	0,22	0,26	0,32	0,36	0,38	0,40	0,44	0,48	0,56	0,66	0,80	0,98	1,20	1,44	1,72	1,98	2,30	2,68	3,06
	Сумма пороков и засоренности волокна, %:																				
	- после джина	1,7	2,2	2,6	2,8	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	3,7	3,9	4,2	4,5	5,0	5,7	6,4	7,5	8,8	10,5	12,3
	после волоконочистителя ЗОВП-М при работе:																				
	- первого пыльного цилиндра		1,8	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,5	3,8	4,4	4,9	5,7	6,7	7,9	9,2
- двух пыльных цилиндров			1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,8	3,0	3,2	3,7	4,1	4,8	5,6	6,6	7,7		
- трех пыльных цилиндров						1,8	1,9	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,8	3,1	3,5	4,1	4,8	5,6	6,5	

Проведенными исследованиями установлено, что наилучшие прядильно-технические свойства волокна получаются при минимальном воздействии на него рабочих органов. Исходя из этого для определения регламента переработки хлопка-сырца следует обратиться к верхней части расчетной таблицы, которая соответствует однократной очистке хлопка-сырца. Если при этом не достигается расчетная норма (по сумме пороков и засоренности волокна), можно переходить к ее нижней части, т. е. двукратной очистке хлопка-сырца. Если фактическая сумма пороков и засоренности волокна окажется значительно выше расчетной (найденной по таблице), то необходимо провести поэтапную проверку эффективности работы оборудования технологической цепочки хлопкозавода.

По данным расчетной таблицы представляется возможным провести три контрольные проверки.

Первая проверка контролирует работу очистителей хлопка-сырца. Для этого определяется засоренность хлопка-сырца с лотка джина и сопоставляется с соответствующим показателем таблицы. Если

фактически засоренность значительно превышает контрольное значение, следует проверить техническое состояние и режим работы очистителей 1ХК, 1ХП, УХК и ЧХ-5 (ЧХ-3М2 «Мехнат»).

Вторая проверка проводится по сумме пороков и засоренности волокна после джина. Если эта величина превышает контрольное значение, необходимо проверить техническое состояние джина.

Если же первые две проверки не обнаружили значительных отклонений, а сумма пороков и засоренности очищенного волокна не укладывается в расчетные нормы, то причину следует искать в волоконочистителях. В этом случае надлежит в первую очередь проверить аэродинамический режим их работы. Если же это не дает результатов, то следует отрегулировать зазоры и разводки.

## ВЫВОДЫ

В 2021-2022 гг. контрольные показатели для выбора оптимальных планов очистки хлопка-сырца и волокна в зависимости от засоренности исходного сырца и про-

мышленного сорта волокна были проверены на двух действующих хлопкозаводах и подтвердили правильность их разработки. На основании производственных проверок в 2022 г. разработаны рекомендации по выбору оптимальных планов очистки хлопка-сырца и волокна. Эти рекомендации будут внедряться на хлопкозаводах в текущем году.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Муродов О.Ж., Ражабов О.И. Результаты экспериментального исследования нагруженности и характера колебаний многогранной сетки на упругих опорах очистителя хлопка // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. №5. С. 191...197.
2. Кыдырбаев А.О. Технология обработки волокнистых материалов: учебное пособие / А.О. Кыдырбаев, М. Ш. Шардарбек, А. А. Джамалов. Нур-Султан: Talap, 2020. 295 с.
3. Калдыбаев Р.Т., Ташменов Р.С., Юсупов Ш., Калдыбаева Г.Ю., Конысбеков С.М. Исследование количественного и качественного содержания сорных примесей в хлопке-сырце для различных селекций хлопка в зависимости от районов произрастания // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. №3 (363). С. 84...89.
4. Фролов В.Д., Башкова Г.В., Башков А.П. Технология и оборудование текстильного производства. Ч.1 Производство пряжи и нитей: учебное пособие. Иваново: ИГТА, 2006. 436 с.
5. Газиева С.А. Изменение структурного показателя хлопка-сырца по технологическим переходам его переработки / С.А. Газиева, Б.Д. Курбонов, М.Э. Нуров, Х.И. Иброгимов, П.Н. Рудовский // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2013. № 5 (347). С. 131...135.
6. Калдыбаев Р.Т., Калдыбаева Г.Ю., Елдияр Г.К., Дайрабай Д.Д., Турганбаева А.А., Куралбаева А.Н. Влияние показателей влажности хлопка-сырца на качественные показатели хлопкового волокна и пряжи // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2019. №1 (379). С. 171...174.
7. Муродов О.Ж., Джураев А.Д., Плеханов А.Ф., Ташпулатов Д.С. Влияние параметров пластмассового многогранного колосника на упругих опорах в очистителе хлопка-сырца на частоту колебаний системы и эффект очистки волокнистой массы от сорных и жестких примесей // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. №4. С. 171...176.
8. Мырхалыков Ж.У., Тулеметова А.С., Маширова Т.Н., Темирова Ж., Есиркепова А.М. Повышение эффективности хлопковой отрасли в Республике Казахстан как источника сырьевой базы текстильной промышленности // Известия вузов.

Технология текстильной промышленности. 2017. № 6. С. 70...77.

9. Мырхалыков Ж.У., Есиркепова А.М., Исаева Г.К., Кулбай Б.С. К вопросу о методике оценки синергетического эффекта от управления вторичными ресурсами в текстильной промышленности // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 1. С. 5...10.

#### REFERENCES

1. Murodov O.Zh., Razhabov O.I. The results of an experimental study of the loading and nature of vibrations of a polyhedral mesh on elastic supports of a cotton purifier // Izvestiya vysshikh uchebnykh obuchenii. Technology of the textile industry. 2021. No. 5. Pp. 191...197.
2. Kydyrbaev A.O. Technology for processing fibrous materials: textbook / A.O. Kydyrbaev, M.Sh. Shardarbek, A.A. Dzhamalov. Nur-Sultan: Talap, 2020. 295 p.
3. Kaldybaev R.T., Tashmenov R.S., Yusupov Sh., Kaldybaeva G.Yu., Konysbekov S.M. Investigation of the quantitative and qualitative content of weed impurities in raw cotton for various cotton selections depending on the areas of growth // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2016. No. 3 (363). P. 84...89.
4. Frolov V.D., Bashkova G.V., Bashkov A.P. Technology and equipment of textile production. Part 1 Production of yarn and threads: study guide. Ivanovo: IGTA, 2006. 436 p.
5. Gazieva S.A. Change in the structural index of raw cotton according to the technological transitions of its processing / S.A. Gazieva, B.D. Kurbonov, M.E. Nurov, Kh.I. Ibrogimov, P.N. Rudovsky // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2013. No. 5 (347). P. 131...135.
6. Kaldybaev R.T., Kaldybaeva G.Yu., Eldiyar G.K., Dairabay D.D., Turganbaeva A.A., Kuralbaeva A.N. Influence of indicators of moisture content of raw cotton on the quality indicators of cotton fiber and yarn // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2019. No. 1 (379). P. 171...174.
7. Murodov O.Zh., Dzhuraev A.D., Plekhanov A.F., Tashpulatov D.S. Influence of the parameters of a plastic multifaceted grate on elastic supports in a raw cotton cleaner on the oscillation frequency of the system and the effect of cleaning the fibrous mass from weed and hard impurities // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 4. P. 171...176.
8. Myrkhalyskov Zh.U., Tulemetova A.S., Mashirova T.N., Temirova Zh., Yessirkepova A.M. Improving efficiency of cotton industry in the Republic of Kazakhstan as a source of raw material base of the textile industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2017. Iss. 6. P. 70...77.

9. Myrhal'kov ZH.U., Yessirkepova A.M., Issayeva G.K., Kulbai B.S. To the problem of the evaluation methods of synergetic effect in the secondary resources management on the textile industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2015. Iss.1. P. 5...10.

Рекомендована кафедрой технологии и конструирования изделий легкой промышленности ЮКГУ им. М. Ауэзова. Поступила 05.06.23.

УДК 547.1:667.494.7

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_94

## ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ КАРБИДОКРЕМНИЕВОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ПОЛИКАРБОСИЛАНОВ\*

### PRODUCTION OF SILICON CARBIDE FIBER MATERIAL FROM POLYCARBOSILANES BY ELECTROFORMING

С.И. БЕЛОУСОВ, М.А. СОКОЛОВ, Т.Х. ТЕНЧУРИН, С.Н. ЧВАЛУН

S.I. BELOUSOV, M.A. SOKOLOV, T.KH. TENCHURIN, S.N. CHVALUN

(НИЦ «Курчатовский институт»)

(NRC "Kurchatov Institute")

E-mail: serbell@gmail.com

*В статье представлены результаты получения карбидокремниевых матриц пиролизом волокнистых нетканых материалов, полученных методом электроформования из растворов поликарбосилана. Оптимизированы параметры электроформования и волокнообразующие свойства прядильных растворов. Полимерные и керамические волокна изучены методами электронной микроскопии, ИК-спектроскопии, элементного анализа. Предложенный способ получения карбидокремниевых матриц технологически значительно проще и экономически выгоднее существующих методов.*

*The paper presents the results of obtaining silicon carbide matrices by pyrolysis of fiber nonwoven materials obtained by electroforming from polycarbosilane solutions. Parameters of electroforming and fiber-forming properties of spinning solutions are optimized. Polymeric and ceramic fibers have been studied by electron microscopy, infrared spectroscopy, elemental analysis. The proposed method of obtaining the silicon carbide matrices is technologically much easier and economically more profitable than the existing methods.*

**Ключевые слова:** поликарбосиланы, карбидокремниевые волокна, электроформование.

**Keywords:** polycarbosilanes, silicon carbide fibers, electrospinning.

---

\* Работа выполнена в рамках тематического плана НИЦ «Курчатовский институт» с использованием оборудования его ресурсных центров.

## Введение

Производство керамик из полимерных прекурсоров было открыто более 60 лет назад [1]. Это привело к появлению керамических волокон, покрытий, высокотемпературных прочных керамических композитов, что способствовало прорыву во множестве технологических отраслей: энергетической, аэрокосмической, транспортной и других. Предкерамические полимеры являются объектами интенсивных научных исследований благодаря их потенциалу для формирования высокочистых керамик, особенно кремнийсодержащих [2]. Такой прогресс стал возможен благодаря большому количеству имеющихся способов формования полимеров, что позволило придать керамикам существенное разнообразие форм, что было недоступно при использовании традиционного порошкового метода [3, 4]. Существенный шаг вперёд был сделан профессором Яджимой, который получил непрерывные карбидокремниевые (SiC) керамические волокна пиролизом поликарбосилана (ПКС) [5, 6]. Сегодня разработано множество типов керамик из прекурсоров, таких, как Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, BN, AlN, SiCN, SiCO, SiCNO, SiBCN и др. Существуют достаточно исчерпывающие обзоры, охватывающие историю развития и современные достижения в области керамик из полимерных прекурсоров [7, 8].

Технология керамических волокон сегодня является старейшим и самым успешным применением полимерных прекурсоров. Технология синтеза становилась все совершеннее, что привело к созданию трёх поколений SiC волокон [9]. Разработаны различные методы формования волокон, такие, как сухое и мокрое прядение, прядение из расплава [10], используемые для получения микроволокна диаметром порядка десятка микрометров. Электроформование – это простой и эффективный метод, предложенный в 1940-х годах, позволяющий получать волокна с диаметром от десятка нанометров до нескольких микрометров, где вытягивающая сила имеет не механическую, а электростатическую природу. Такие нановолокна имеют множе-

ство применений, например, в медицине (тканевая инженерия, медицинские устройства, доставка лекарств, диагностика), производстве фильтров, конструкционных материалов. Нанокompозиты на основе нановолокон могут обладать дополнительными достоинствами по сравнению с композитами на основе микроволокон благодаря размерным эффектам, что может позволить нанокompозитам иметь лучшие механические характеристики, высокую удельную поверхность, регулируемую пористость и др. [11, 12]. На сегодняшний день нановолокна получены из более чем сотни полимеров.

По данной теме написано несколько подробных обзоров, описывающих как детали методики электроформования, так и различные приложения [13, 14].

Впервые керамические SiC нановолокна методом пиролиза нетканого мата, полученного электроформованием, получены Shinetal в 2008 г. [15]. Дальнейшие исследования в этом направлении были посвящены контролю толщины нановолокон [16-20], их морфологии [21-25], а также модификации полученных материалов [26-30].

Превращение полимера в керамику обычно требует предварительной стадии межмолекулярной сшивки, иначе полимер расплавится при пиролизе. Основным методом сшивки является нагрев на воздухе, способствующий появлению аморфной фазы SiC<sub>x</sub>O<sub>y</sub> в составе будущей керамики, что негативно сказывается на ее свойствах. И если для непрерывных микроволокон разработаны другие методы, не приводящие к включению кислорода [9] (такие, как сшивка электронным пучком или использование высокомолекулярного неплавящегося прекурсора), то для керамических нановолокон этой проблеме уделено меньше внимания.

В данной работе описано получение карбосиланового мата методом электроформования. Полученный волокнистый материал подвергался пиролизу в инертной атмосфере без предварительной кислородной сшивки, в ходе которого претерпел изменение морфологии, однако может

быть использован в качестве керамической матрицы.

#### *Материалы и методы*

ПКС с заявленной структурной формулой  $[-SiH(CH_3)-CH_2-]_n$  был закуплен у Alfa Chemical Co., Ltd (Китай), хлороформ – у Sigma-Aldrich. Реагенты использовали без дополнительной очистки. ПКС дополнительно охарактеризовали. Молекулярно-массовые характеристики определили, используя высокоэффективный жидкостный хроматограф KNAUER. Согласно данным хроматографии средневесовая молекулярная масса равна  $M_w = 1300$  Да, полидисперсность равна  $PDI = 2.0$ . Элементный анализ провели методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, используя растровый электронно-ионный микроскоп Helios Nanolab 600i (FEI, США). По данным элементного анализа, полимер неравномерно загрязнен кислородом, доля атомов кислорода варьируется от 4 до 8 %. Керамический остаток после пиролиза до  $1000^{\circ}C$  в потоке азота был определен при помощи термогравиметрического анализатора Perkin Elmer Pyris 1 TGA и составляет 68%. Раствор ПКС в хлороформе концентрацией 40 масс. % гомогенизировали при помощи магнитной мешалки в течение 24 часов и использовали в качестве прядильного раствора.

Для получения нетканого материала методом электроспиннинга использовали следующую установку. Прядильный раствор подавали через капилляр. Для вытяжки струи раствора использовали высокое постоянное напряжение. Струя затвердевает за счёт испарения растворителя до достижения заземленного металлического диска, на котором постепенно нарастает нетканый материал в виде переплетенных тонких полимерных волокон. Проводимость прядильного раствора равна  $\sigma = 6,1$  мкСм/см, расстояние до электрода составляет  $L = 25$  см, напряжение равно  $U = 30$  кВ. Прядильный раствор быстро затвердевает, потому во избежание закупоривания капилляра его обдували парами растворителя. Расход контролировали изменением давления, оказываемого на рас-

твор, и вычисляли, измеряя массу полученного материала за определенное время. Нетканый материал получали со скоростью 1,0 мг/ч. Полученный мат аккуратно снимали с электрода при помощи лезвия и отжигали в муфельной печи ПМ-1400 (ООО «Русуниверсал»). Пиролиз для получения керамического мата проводили в атмосфере аргона при температуре  $1200^{\circ}C$  в течение 1 ч. Скорость нагрева до температуры отжига составляла  $5^{\circ}C/мин$ .

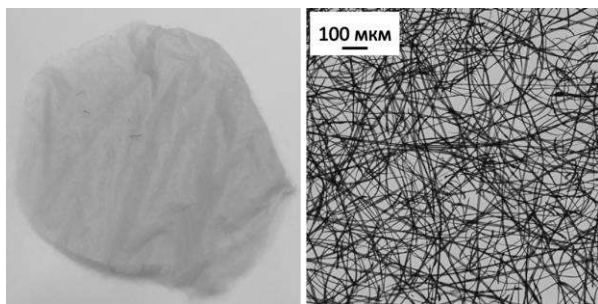
Полученные полимерный и керамический маты изучали методами ИК-Фурье спектроскопии при помощи ИК-спектрометра NICOLET IS5, элементного анализа (Helios), оптической микроскопии с использованием микроскопа CARL ZEISS AXIO IMAGER.M2M.

#### *Результаты и обсуждение*

Получение полимерного мата приемлемого качества оказалось возможным лишь в узком диапазоне параметров установки. Так, раствор концентрацией 35 масс. % не позволяет получить волокна – струя разрывается на капли. Раствор с концентрацией 45 масс. % также обладает низкой вязкостью (раствор медленно каплет из капилляра даже без приложения дополнительного давления), однако образующийся конус Тейлора быстро затвердевает, останавливая процесс (волокна все еще можно получать, если регулярно очищать капилляр). Затвердевание удалось замедлить при оптимальной концентрации раствора 40 масс. %, обдувая капилляр парами растворителя. Низкая вязкость растворов обусловлена невысокой молекулярной массой полимера, однако это же позволяет достичь высокого наполнения.

Полученные волокна отличаются хрупкостью. Если расстояние до электрода  $L$  увеличить с оптимального 25 см до 35 см (также соответственно увеличить напряжение  $U$ ), то мат будет состоять из коротких обломков. Мат легко снимается с приёмного электрода. Оптические фотографии полимерного волокна, полученного при оптимальных параметрах, представлены на рис.1.

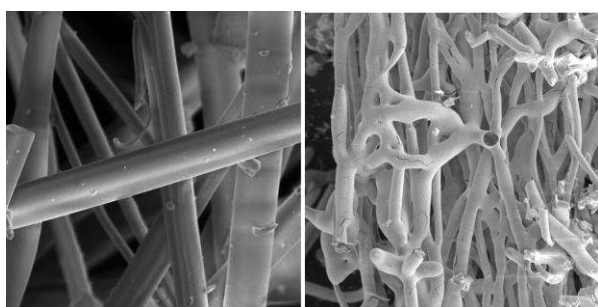




а) б)  
Рис. 1

Полимерные волокна неоднородны по толщине, диаметр варьируется в диапазоне от 5 до 10 мкм. Поверхность волокон гладкая, мат не содержит дефектов в виде капель и пор.

При пиролизе в атмосфере аргона нетканый материал частично оплавился, что ожидаемо с учетом отсутствия стадии термической сшивки на воздухе. Однако структура материала частично сохранилась. Полученные на электронном микроскопе фотографии отдельных полимерных волокон, а также керамической матрицы представлены на рис. 2.



а) б)  
Рис. 2

Поверхность полученной матрицы шероховатая, присутствуют дефекты в виде трещин. Такие дефекты обычно обусловлены слишком быстрым выходом газов при пиролизе, чего можно избежать медленным нагревом.

Элементный анализ керамической матрицы представлен на рис. 3. Содержание кислорода в центре волокна соответствует таковому в исходном прекурсоре. Увеличение его содержания при движении к периферии говорит о протекании и процессов окисления. Для устранения этого эф-

фекта необходимо более тщательно контролировать состав атмосферы при пиролизе. Ответственен ли кислород в составе за частичное сохранение структуры нетканого материала при пиролизе, остаётся неясным.

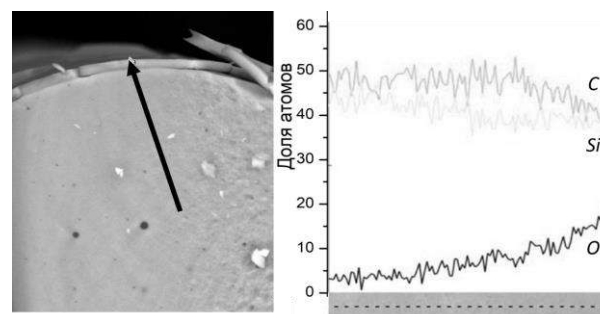


Рис. 3

Превращение полимера в керамику контролировали при помощи ИК-спектроскопии (рис. 4). При превращении полимера в керамику исчезли пики 2096, отвечающие валентному колебанию Si-H связи, пики 1406, 1250, 817, отвечающие деформационному колебанию C-H связей в SiCH<sub>3</sub> группе, а также 1356, 1014 пики, отвечающие деформационному колебанию Si-C связи в Si-CH<sub>2</sub>-Si группе. В спектре керамики присутствует пик 797, отвечающий колебаниям решетки карбида кремния, а также ярко выраженный пик 1098 деформационного Si-O-Si колебания. Однако пики 2950, 2900, отвечающие валентному колебанию связи C-H, не исчезли полностью, что говорит о незавершенности процесса пиролиза. Решением данной проблемы является увеличение времени выдержки при высокой температуре.

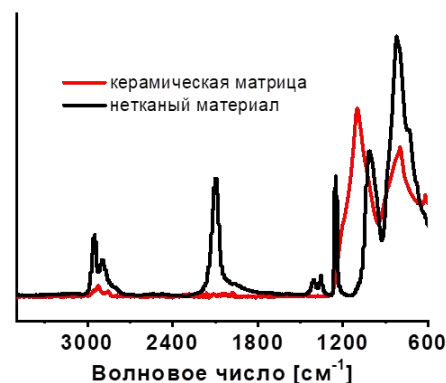


Рис. 4

## ВЫВОДЫ

Получены карбидокремниевые керамические волокнистые матрицы из поликарбосиланов на основе технологии электроформования из растворов полимеров. Электроформование позволяет создавать конструкции сложной формы в зависимости от требуемых изделий, что значительно упрощает технологический процесс, основанный на прядении волокон и изготовлении тканей на их основе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ainger F.W., Herbert J.M. The Preparation of Phosphorus-Nitrogen Compounds as Non-Porous Solids // *Special Ceramics*. 1960. P. 168...182.
2. Bill J., Aldinger F. Precursor-derived covalent ceramics // *Adv. Mater.* 1995, 7, № 9. P. 775...787.
3. Riedel R., Ionescu E., Chen I.-W. Modern trends in advanced ceramics // *Ceramics Science and Technology*. Vol. 1. 2008. P. 3...38.
4. Schulz M. Polymer derived ceramics in MEMS/NEMS – a review on production processes and application // *Adv. Appl. Ceram.* 2009, 108, №8. P. 454...460.
5. Yajima S., Hayashi J., Imori M. Continuous Silicon Carbide Fiber of High Tensile Strength // *Chem. Lett.* 1975, 4, № 9. P. 931...934.
6. Yajima S., Hasegawa Y., Okamura K., Matsuzawa I. Development of High Tensile Strength Silicon Carbide Fibre Using an Organosilicon Polymer Precursor // *Nature (London)*. 1978, 273. P. 525...527.
7. Colombo P., Mera G., Riedel R., Soraru G.D. Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics // *J. Am. Ceram. Soc.* 2010, 93, №. 7. P. 1805...1837.
8. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharf A. Polymer composite materials: A comprehensive review // *Composite Structures*. 2021, 262. P. 113640.
9. Bunsell A.R., Piant A. A review of the development of three generations of small diameter silicon carbide fibres // *J. Mater. Sci.* 2006, 41. P. 823...839.
10. Walczak Z.K. Processes of Fiber Formation. Elsevier, 2002. 414 p.
11. Baughman R.H., Zakhidov A.A., de Heer W.A. Carbon nanotubes – the route toward applications // *Science*.- 2002, 297. P. 787...792.
12. Lau K.-T., Hui D. The revolutionary creation of new advanced materials-carbon nanotube composites // *Composites Part B*. 2002, 33, №. 4. P. 263...277.
13. Huang Z.-M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna S. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites // *Compos. Sci. Technol.* 2003, 63. P. 2223...2253.
14. Jain R., Shetty S., Yadav K.S. Unfolding the electrospinning potential of biopolymers for prepara-

tion of nanofibers // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2020, 57. №. 101604.

15. Shin D.-G., Riu D.-H., Kim H.-E. Web-type silicon carbide fibers prepared by the electrospinning of polycarbosilanes // *Journal of Ceramic Processing Research*. 2008, 9, №. 2. P. 209...214.
16. Eick B.M., Youngblood J.P. SiC nanofibers by pyrolysis of electrospunpreceramic polymers // *J. Mater. Sci.* 2009, 44, P. 160...165.
17. Liu H.A., Balkus K.J. Electrospinning of beta silicon carbide nanofibers // *Mater. Lett.* 2009, 63. P. 2361...2364.
18. Choi S.H., Youn D.Y., Seong M.J., Oh S.G., Kim I.D. Micelle-mediated synthesis of single-crystalline  $\beta(3C)$ -SiC fibers via emulsion electrospinning // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2011, 3. P. 1385...1389.
19. Wu N., Wan L.Y., Wang Y.D., Frank K. Electrospun silicon oxycarbide ultrafine fibers derived from polycarbosilane // *J. Inorg. Mater.* 2018, 33. P. 357...362.
20. Hou H., Gao F., Wei G., Wang M., Zheng J., Tang B., Yang W. Electrospinning 3C-SiC mesoporous fibers with high purities and well-controlled structures // *Cryst. Growth Des.* 2012, 12. P. 536...539.
21. Hou H., Dong C., Wang L., Gao F., Wei G., Zheng J., Cheng X., Tang B., Yang W. Electrospinning graphite/SiCmesoporous hybrid fibers with tunable structures // *Cryst. Eng. Comm.* 2013, 15. P. 2002...2008.
22. Wang B., Wang Y., Lei Y., Wu N., Gou Y., Han C., Fang D. Hierarchically porous SiC ultrathin fibers mat with enhanced mass transport, amphipathic property and high-temperature erosion resistance // *J. Mater. Chem. A*. 2014, 2. P. 20873...20881.
23. Liu Y.N., Liu Y., Choi W.C., Chae S., Lee J., Kim B.S., Park M., Kim H.Y. Highly flexible, erosion resistant and nitrogen doped hollow SiC fibrous mats for high temperature thermal insulators // *J. Mater. Chem. A*. 2017, 5. P. 2664...2672.
24. Wu N., Wang B., Wang Y. Enhanced mechanical properties of amorphous SiOC nanofibrous membrane through in situ embedding nanoparticles // *J. Am. Ceram. Soc.* 2018, 101. P. 4763...4772.
25. Lu P., Huang Q., Liu B., Bando Y., Hsieh Y.L., Mukherjee A.K. Macroporous. Silicon oxycarbide fibers with luffa-like superhydrophobic shells // *J. Am. Chem. Soc.* 2009, 131. P. 10346...10347.
26. Yu Y., Chen Y., An L. Flexible hydrophobic and lipophilic aluminum-doped silicon carbide fibrous mats synthesized by electrospinning polyaluminocarbosilane // *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2014, 11. P. 699...705.
27. Wang Y., Han C., Zheng D., Lei Y. Large-scale, flexible and high-temperature resistant ZrO<sub>2</sub>/SiC ultrafine fibers with a radial gradient composition // *J. Mater. Chem. A*. 2014, 2. P. 9607...9612.
28. Wang B., Wang Y., Lei Y., Xie S., Wu N., Gou Y., Han C., Shi Q., Fang D. Vertical SnO<sub>2</sub> nanosheets  $\alpha$ SiC nanofibers with hierarchical architecture for high-performance gas sensors // *J. Mater. Chem. C*. 2016, 4. P. 295...304.

29. Hou Y., Cheng L., Zhang Y., Yang Y., Deng C., Yang Z., Chen Q., Du X., Zheng L. SiC nanofiber mat: a broad-band microwave absorber, and the alignment effect // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017, 9. P. 43072...43080.

30. Hou Y., Cheng L., Zhang Y., Yang Y., Deng C., Yang Z., Chen Q., Du X., Zhao C., Zheng L. Enhanced flexibility and microwave absorption properties of HfC/SiC nanofiber mats // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018, 10. P. 29876...29883.

## REFERENCES

1. Ainger F.W., Herbert J.M. The Preparation of Phosphorus-Nitrogen Compounds as Non-Porous Solids // Special Ceramics. 1960. P. 168...182.

2. Bill J., Aldinger F. Precursor-derived covalent ceramics // Adv. Mater. 1995, 7, № 9. P. 775...787.

3. Riedel R., Ionescu E., Chen I.-W. Modern trends in advanced ceramics // Ceramics Science and Technology. Vol. 1. 2008. P. 3...38.

4. Schulz M. Polymer derived ceramics in MEMS/NEMS – a review on production processes and application // Adv. Appl. Ceram. 2009, 108, №8. P. 454...460.

5. Yajima S., Hayashi J., Imori M. Continuous Silicon Carbide Fiber of High Tensile Strength // Chem. Lett. 1975, 4, № 9. P. 931...934.

6. Yajima S., Hasegawa Y., Okamura K., Matsuzawa I. Development of High Tensile Strength Silicon Carbide Fibre Using an Organosilicon Polymer Precursor // Nature (London). 1978, 273. P. 525...527.

7. Colombo P., Mera G., Riedel R., Soraru G.D. Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2010, 93. № 7. P. 1805...1837.

8. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharf A. Polymer composite materials: A comprehensive review // Composite Structures. 2021, 262. P. 113640.

9. Bunsell A.R., Piant A. A review of the development of three generations of small diameter silicon carbide fibres // J. Mater. Sci. 2006, 41. P. 823...839.

10. Walczak Z.K. Processes of Fiber Formation. Elsevier, 2002. 414 p.

11. Baughman R.H., Zakhidov A.A., de Heer W.A. Carbon nanotubes – the route toward applications // Science. 2002, 297. P. 787...792.

12. Lau K.-T., Hui D. The revolutionary creation of new advanced materials-carbon nanotube composites // Composites Part B. 2002, 33, № 4. P. 263...277.

13. Huang Z.-M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna S. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites // Compos. Sci. Technol. 2003, 63. P. 2223...2253.

14. Jain R., Shetty S., Yadav K.S. Unfolding the electrospinning potential of biopolymers for preparation of nanofibers // Journal of Drug Delivery Science and Technology. 2020, 57. №. 101604.

15. Shin D.-G., Riu D.-H., Kim H.-E. Web-type silicon carbide fibers prepared by the electrospinning of

polycarbosilanes // Journal of Ceramic Processing Research. 2008, 9, №. 2. P. 209...214.

16. Eick B.M., Youngblood J.P. SiC nanofibers by pyrolysis of electrospun preceramic polymers // J. Mater. Sci. 2009, 44, P. 160...165.

17. Liu H.A., Balkus K.J. Electrospinning of beta silicon carbide nanofibers // Mater. Lett. 2009, 63. P. 2361...2364.

18. Choi S.H., Youn D.Y., Seong M.J., Oh S.G., Kim I.D. Micelle-mediated synthesis of single-crystalline  $\beta$ (3C)-SiC fibers via emulsion electrospinning // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2011, 3. P. 1385...1389.

19. Wu N., Wan L.Y., Wang Y.D., Frank K. Electrospun silicon oxycarbide ultrafine fibers derived from polycarbosilane // J. Inorg. Mater. 2018, 33. P. 357...362.

20. Hou H., Gao F., Wei G., Wang M., Zheng J., Tang B., Yang W. Electrospinning 3C-SiC mesoporous fibers with high purities and well-controlled structures // Cryst. Growth Des. 2012, 12. P. 536...539.

21. Hou H., Dong C., Wang L., Gao F., Wei G., Zheng J., Cheng X., Tang B., Yang W. Electrospinning graphite/SiC mesoporous hybrid fibers with tunable structures // Cryst. Eng. Comm. 2013, 15. P. 2002...2008.

22. Wang B., Wang Y., Lei Y., Wu N., Gou Y., Han C., Fang D. Hierarchically porous SiC ultrathin fibers mat with enhanced mass transport, amphipathic property and high-temperature erosion resistance // J. Mater. Chem. A. 2014, 2. P. 20873...20881.

23. Liu Y.N., Liu Y., Choi W.C., Chae S., Lee J., Kim B.S., Park M., Kim H.Y. Highly flexible, erosion resistant and nitrogen doped hollow SiC fibrous mats for high temperature thermal insulators // J. Mater. Chem. A. 2017, 5. P. 2664...2672.

24. Wu N., Wang B., Wang Y. Enhanced mechanical properties of amorphous SiOC nanofibrous membrane through in situ embedding nanoparticles // J. Am. Ceram. Soc. 2018, 101. P. 4763...4772.

25. Lu P., Huang Q., Liu B., Bando Y., Hsieh Y.L., Mukherjee A.K. Macroporous. Silicon oxycarbide fibers with luffa-like superhydrophobic shells // J. Am. Chem. Soc. 2009, 131. P. 10346...10347.

26. Yu Y., Chen Y., An L. Flexible hydrophobic and lipophilic aluminum-doped silicon carbide fibrous mats synthesized by electrospinning polyaluminocarbosilane // Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2014, 11. P. 699...705.

27. Wang Y., Han C., Zheng D., Lei Y. Large-scale, flexible and high-temperature resistant ZrO<sub>2</sub>/SiC ultrafine fibers with a radial gradient composition // J. Mater. Chem. A. 2014, 2. P. 9607...9612.

28. Wang B., Wang Y., Lei Y., Xie S., Wu N., Gou Y., Han C., Shi Q., Fang D. Vertical SnO<sub>2</sub> nanosheets/SiC nanofibers with hierarchical architecture for high-performance gas sensors // J. Mater. Chem. C. 2016, 4. P. 295...304.

29. Hou Y., Cheng L., Zhang Y., Yang Y., Deng C., Yang Z., Chen Q., Du X., Zheng L. SiC nanofiber mat: a broad-band microwave absorber, and the alignment effect // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017, 9. P. 43072...43080.

30. Hou Y., Cheng L., Zhang Y., Yang Y., Deng C., Yang Z., Chen Q., Du X., Zhao C., Zheng L. Enhanced flexibility and microwave absorption properties of HfC/SiCnanofiber mats // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018, 10. P. 29876...29883.

Рекомендована тематическим семинаром «Органические и гибридные наноматериалы» Курчатовского КК НБИКС-пт НИЦ «Курчатовский институт». Поступила 06.10.23.

---

УДК 677.025  
DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_101

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТРИКОТАЖА СЛОЖНЫХ СТРУКТУР**  
**INVESTIGATION OF PROPERTIES OF COMPLEX KNITTING STRUCTURES**

Э.Б. ХОЛБОЕВ<sup>1</sup>, Н.Р. ХАНХАДЖАЕВА<sup>2</sup>  
E.B. KHOLBOYEV<sup>1</sup>, N.R. KHANKHADJAEVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Джизакский политехнический институт, Джизак, Узбекистан,  
<sup>2</sup>Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности Ташкент, Узбекистан)

(<sup>1</sup>Jizzakh Polytechnical Institute, Jizzakh, Uzbekistan  
<sup>2</sup>Tashkent Institute of Textile and Light Industry Tashkent, Uzbekistan)

E-mail: elyorjonxolboyev@gmail.com, nilufar.khankhadjaeva@bk.ru

*В данной статье изучены результаты исследований, посвященных разработке сложных структур трикотажных переплетений. Рассмотрены возможности получения сложных структур трикотажных переплетений на плосковязальных машинах. Разработаны 12 вариантов новых структур трикотажных переплетений. Определены физико-механические свойства образцов. Приведены анализ и закономерность изменения свойств. Даны необходимые рекомендации по применению новых вариантов структур трикотажа. Варианты образцов рекомендованы для ассортимента трикотажных изделий специального назначения.*

*In this article, results of research works devoted to the development of complex knitting structures are studied. The possibilities of obtaining the complex knitting structures on flat knitting machines are considered. Twelve variants of new kind of knitted structures have been developed. An experiment of samples was carried out. Physical and mechanical properties of samples are determined. The article also provides an analysis of changes and regularity in properties. The necessary recommendations on the use of new variants of knitwear structures are given. Samples are recommended for assortment of knitwear for special purposes.*

**Ключевые слова:** трикотаж, переплетение, плосковязальная машина, физико-механические свойства, разрывная нагрузка, удлинение, деформация.

**Keywords: knitwear, structure, flat knitting machine, physical-mechanical properties, breaking strength, elongation, deformation.**

### *Введение*

Производство трикотажных изделий занимает одно из ведущих мест в мировой текстильной промышленности. Ассортимент изделий расширяется, а спрос на них стремительно растет. Ожидается, что мировой рынок текстиля будет расти на 4,0% ежегодно с 2022 по 2030 год и достигнет 1420,3 млрд долларов к 2030 году, согласно «Global Textile Market Size & Share Report за 2022–2030 годы», поэтому для поддержания конкурентоспособности предприятиям отрасли потребуются внедрять передовые технологии [1].

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на разработку новых ресурсосберегающих технологий получения сложных структур трикотажных переплетений. В этом направлении приоритетными считаются исследования по совершенствованию методов создания переплетений со сложной структурой для трикотажных изделий. В источниках [2, 3] приводятся различные способы производства трикотажных изделий, уделяется внимание структуре трикотажа и влиянию его элементов на изменение свойств. Имеются научные труды [4, 5, 6], в которых всесторонне описан принцип работы плосковязальных машин. Возможность вязания сложных структур переплетений, бесшовных изделий и сокращение отходов до минимума также увеличивает интерес к таким машинам [7, 8].

В работе [9] авторами исследовано влияние процесса вязания, крашения и отлежки на длину нити в петле трикотажных полотен переплетений кулирная гладь и ластик. Процесс изучен при вязании базовых переплетений для верхних и спортивных трикотажных изделий.

В некоторых источниках рассмотрены сырьё и структуры переплетений, представляющие собой трехмерное трикотажное полотно, состоящее из двух внешних текстильных основ, которые соединены вместе и разделены прокладочными нитя-

ми [10]. Такие трикотажные полотна используются в качестве текстиля для автомобилей (чехлы для автомобильных сидений, крышка приборной панели), промышленного текстиля (композиты), медицинского текстиля (противопрележные одежды), спортивного текстиля и повседневной одежды (чашки бюстгалтера, подушечки для купальников).

Из вышесказанного следует вывод, что на сегодняшний день ассортимент трикотажных изделий и сфера использования расширяются, требуется разработка сложных структур переплетений для придания тех или иных свойств исходя из элементов петельной структуры. В работах [11, 12] подробно изложен процесс получения сложных структур трикотажа, а также результаты исследований технологических параметров новых разработанных трикотажных переплетений.

В данной статье описаны разработанные авторами варианты новых структур сложных переплетений для плосковязальной машины.

### *Материалы и методы исследования*

Изначально были разработаны рисунчатые раппорты сложных структур трикотажных переплетений, в которых кроме обычных петель участвовали такие рисунчатые элементы, как прессовая петля, набросок, перенесенная петля. Для достижения рисунчатого эффекта и улучшения характеристик сложных структур трикотажа использовались пряжа хлопчатобумажная, ПАН и полиэфирная. Изготовлены четыре вида образцов трикотажа сложной структуры, представленные на рис. 1 (а) структура переплетения варианта 1; б) графическая запись переплетения варианта 1; в) структура переплетения варианта 2; г) графическая запись переплетения варианта 2; д) структура переплетения варианта 3; е) графическая запись переплетения варианта 3; ж) структура переплетения варианта 4; з) графическая запись переплетения варианта 4).

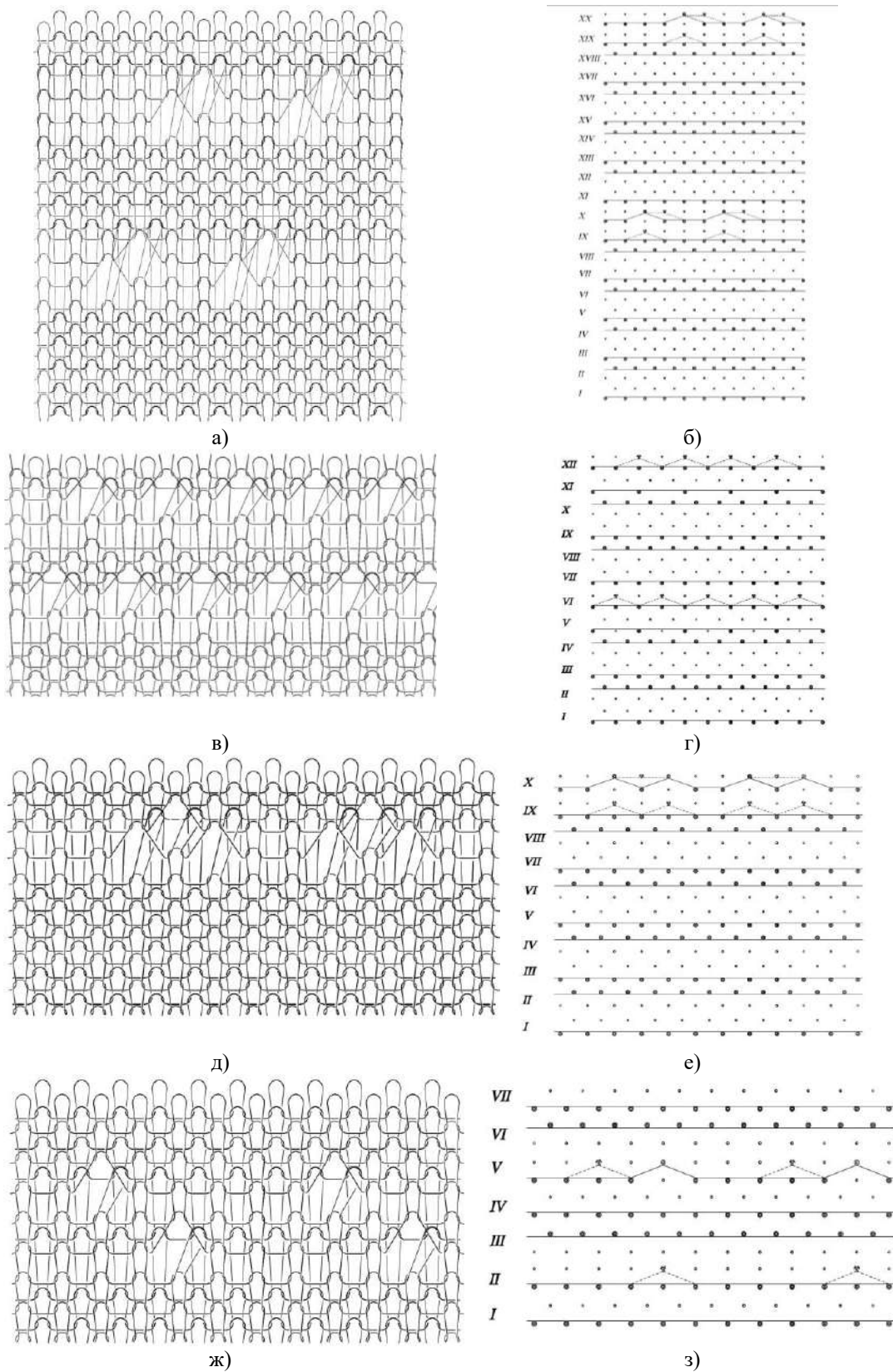


Рис. 1

Проанализированы технологические параметры и физико-механические свойства разработанных вариантов. Результаты

исследования технологических параметров представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№	Вариант	Состав сырья	Петельный шаг А, мм	Высота петельного ряда В, мм	Плотность по горизонтали P <sub>г</sub> , петель/дм	Плотность по вертикали P <sub>в</sub> , петель/дм	Длина нити в петле L, мм	Поверхностная плотность M <sub>s</sub> , г/м <sup>2</sup>	Толщина М, мм	Объемная плотность δ, мг/см <sup>3</sup>
1	1.1	50% х/б	1,6	0,97	30	51,1	5,92	590,3	2,0	302,7
2	1.2	20текс*2;	1,6	1,58	30	35,5	7,1	562,7	2,2	255,8
3	1.3	50% ПАН	1,56	1,2	31	43	6,73	502,2	1,8	279,0
4	1.4	50текс*2	1,62	1,2	30	42,5	5,8	527,4	1,6	329,6
5	2.1	100% ПАН 50текс*2	1,61	1,33	32,5	41,5	5,08	480,5	2,0	240,3
6	2.2		2,45	1,25	22,5	42,5	5,13	517,1	2,3	229,8
7	2.3		1,68	1,075	29	47	4,98	463,5	2,1	220,7
8	2.4		1,58	1,19	30,5	47	5,35	543,8	1,9	286,2
9	3.1	100% Полиэфир 16,7 текс	1,52	0,7	32	76	3,82	466,2	1,0	466,2
10	3.2		2,45	1,64	22,5	50,5	4,16	486,2	1,2	405,2
11	3.3		1,3	1,2	41,5	58	4,07	438,5	1,1	398,6
12	3.4		2,02	1,3	47	51,5	5,59	488,5	1,6	305,3

Физико-механические свойства образцов проанализированы экспериментально с использованием современных приборов, установленных в сертификационной лаборатории «CENTEXUZ» при ТИТЛП. Прове-

дены испытания по определению воздухопроницаемости, стойкости к истиранию, деформации и т. д. стандартными методами.

#### Результаты и их обсуждение

Показатели свойств сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Ва-рианты	Разрывная нагрузка Р, Н		Разрывное удлинение ε, %		Деформация				Воздухопроницаемость, см <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> с
	по длине	по ширине	по длине	по ширине	обратимая %		необратимая %		
					по длине	по ширине	по длине	по ширине	
1	371	619	69	95	62,0	92,0	38,0	8,0	78,0
2	468	618	71	93	90,0	76,0	10,0	24,0	96,5
3	501	618	91	106	77,0	79,0	23,0	21,0	126,7
4	469	601	61	89	82,0	73,0	18,0	27,0	65,5
5	496	683	71	86	75,0	82,0	25,0	18,0	81,1
6	561	613	68	71	72,5	66,0	27,5	44,0	72,6
7	561	617	90	98	83,0	80,0	17,0	20,0	83,5
8	481	491	63	78	85,0	76,0	15,0	24,0	58,3
9	388	518	161	63	100,0	82,0	0,0	18,0	112,4
10	386	501	188	33	83,0	88,0	17,0	12,0	96,5
11	518	281	96	44	92,0	100,0	8,0	0,0	145,6
12	236	606	198	71	84,0	82,5	16,0	17,5	143,1

Из таблицы видно, что все образцы показали очень высокую устойчивость к истиранию – свыше 25000 циклов. Воздухопроницаемость образцов варьируется в широком диапазоне: 58,3-145,6 см<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>с, что свидетельствует о том, что есть возможность выбрать нужный вариант исходя из цели использования.

Разрывная нагрузка по длине составила 236-561 Н, а по ширине – 281-619 Н. Она изменяется в пределах 58 % по длине и 54,6 % по ширине. На рис. 2 представлены графики изменений разрывной нагрузки: а – для 50% х/б 20 текс\*2; 50% ПАН 50 текс\*2; б – для 100% ПАН 50 текс\*2; в – для 100% полиэфир 16,7 текс.

Удлинение по длине составило 68...188%, а по ширине – 33...106%. Оно варьируется в пределах 63,8% по длине и 68,8% по ширине.

Из табл. 2 видно, что обратимая деформация по длине составляет 62-100 %, а по ширине – 66-100 %. Необратимая деформация по длине составляет 0...38%, а по ширине – 0...44%. Показатели деформации по ширине имеют более устойчивое стабильное состояние, так как входящие в состав раппорта переплетения дополнительные элементы ажурных петель позволяют петельной структуре принимать состояние равновесия по петельным рядам.



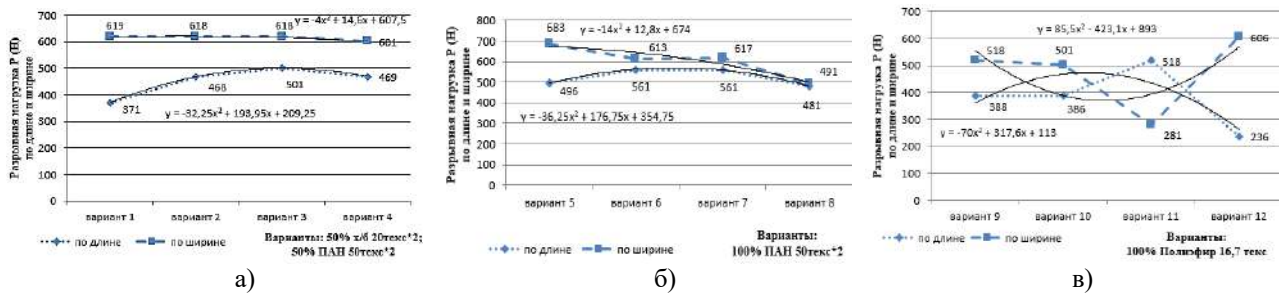


Рис. 2

На рис. 3 приведены графики, показывающие характер изменения обратимой деформации по длине и ширине, на осно-

вании которых можно заранее прогнозировать деформационные свойства сложных структур трикотажных полотен.

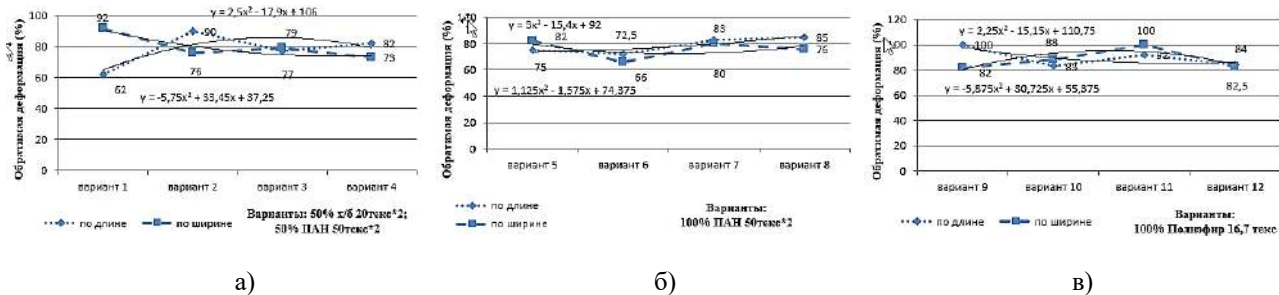


Рис. 3

На рис. 4 представлены графики удлинения образцов под действием нагрузки и сокращения без нагрузки: а – пряжа, б – сложная структура трикотажа по длине, в – сложная структура трикотажа по ширине. Из графиков удлинения и сокращения пряжи видно, что наивысший показатель имеет пряжа ПЭ, а наименьший – хлопчатобумажная.

Анализируя графики удлинения и сокращения сложных структур трикотажных полотен по длине во времени, видим, что наибольший показатель имеет образец из хлопчатобумажной пряжи, а наименьший – из пряжи ПАН. При этом по ширине наибольший показатель имеет образец из пряжи ПАН, а наименьший – из хлопчатобумажной пряжи.

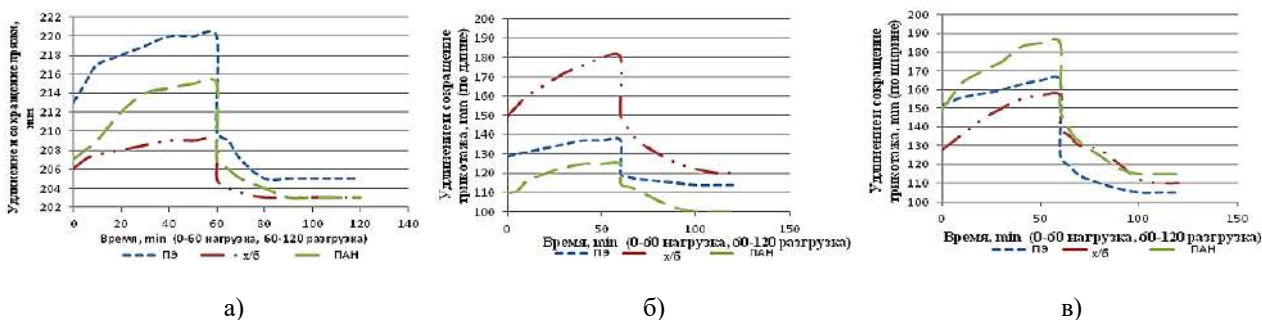


Рис. 4

Из результатов, представленных на этих графиках, можно сделать вывод, что изменения во времени деформации пряжи и трикотажа не соответствуют друг другу. Таким образом, изменение деформации в

трикотажном полотне зависит от вида сырья, а также от его структуры. Чем больше дополнительных элементов входит в состав трикотажного переплетения, тем

более изменчивы характеристики деформации по длине и ширине.

Разработана математическая модель, описывающая изменения разрывной нагрузки и упругой деформации образцов трикотажных полотен сложных переплетений при изменении количества рисунчатых элементов петель в составе. Получены следующие уравнения для вариантов с заправкой: а) 50% х/б 20 текс\*2; 50% ПАН 50 текс\*2; б) 100% ПАН 50 текс\*2; в) 100% полиэфир 16,7 текс:

- уравнение регрессии для изменения разрывной нагрузки по длине

$$y = -32,25x^2 + 193,95x + 209,25;$$

$$y = -36,25x^2 + 176,75x + 354,75;$$

$$y = -70x^2 + 317,6x + 113;$$

- уравнение регрессии для изменения разрывной нагрузки по ширине

$$y = -4x^2 + 14,6x + 607,5;$$

$$y = -14x^2 + 12,8x + 674;$$

$$y = 85,5x^2 - 423,1x + 893.$$

Из уравнений регрессии видно, что зависимость разрывной нагрузки и упругой деформации от количества рисунчатых элементов петель в сложном трикотажном полотне имеет нелинейный вид.

Получены следующие уравнения регрессии изменения обратимой деформации для вариантов с заправкой: а) 50% х/б 20 текс\*2; 50% ПАН 50 текс\*2; б) 100% ПАН 50 текс\*2; в) 100% полиэфир 16,7 текс:

- уравнение регрессии для закона изменения обратимой деформации по длине

$$y = 2,5x^2 - 17,9x + 106;$$

$$y = 1,125x^2 - 1,575x + 74,375;$$

$$y = 2,25x^2 - 15,15x + 110,75;$$

- уравнение регрессии для закона изменения обратимой деформации по ширине

$$y = -5,75x^2 + 33,45x + 37,25;$$

$$y = 3x^2 - 15,4x + 92;$$

$$y = -5,875x^2 + 30,725x + 55,375.$$

В ходе исследования создано 12 вариантов трикотажных переплетений сложной структуры.

Разработана математическая модель, описывающая изменения разрывной нагрузки и упругой деформации трикотажных полотен сложных переплетений при изменении количества рисунчатых элементов петель в составе. Установлено, что наибольшее влияние на показатель разрывной нагрузки сложных структур переплетений оказывает количество рисунчатых элементов петель.

Изменение вышеуказанных характеристик можно проследить с помощью уравнений регрессии. Имеется возможность заранее прогнозировать величины показателей свойств для достижения требуемых значений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.grandviewresearch.com> › industry-analysis
2. Spenser D. Comprehensive handbook of knitting technology. Textbook. – USA Woodhead Publishing LTD 2001. 386 p.
3. <http://www.nvstyle.ru/vidyi-perepleteniya/>
4. Строганов Б.Б. Процессы вязания и механизмы нового плосковязального автомата 848-E7 фирмы «Универсал»: монография. М.: РосЗИТЛП, 2007. 94 с.
5. Строганов Б.Б. Процессы вязания и механизмы нового плоскофангового автомата SES122CS фирмы «SHIMA-SEIKI»: монография. М.: РосЗИТЛП, 2008. 89 с.
6. Hanhadjaeva N., Mukimov M. New Knitting Fabric Structure Made on Flat-Bed Knitting Machine. The Second International Symposium on Educational Cooperation for “Industrial Technology Education” 4.07-6.07.2008y p. 353-364.
7. Lisha Lu, Gaoming Jiang, Guangjun Wu. The knitting methods for seamless garments based on four-needle bed computerized flat machine. Textile Research Journal. Aug 16, 2021. – <https://journals.sagepub.com/action/doSearch?AllField=knitting&SeriesKey=trjc>
8. Xing Liu, Xuhong Miao. Analysis of yarn tension based on yarn demand variation on a tricot knitting machine. Textile Research Journal Mar 3, 2016. – <https://journals.sagepub.com/action/doSearch?AllField=knitting&SeriesKey=trjc>
9. Jorge Llinares Berenguer, Pablo Diaz-Garci'a and Pau Miro' Martinez. Determining the loop length during knitting and dyeing processes. Textile Research

Journal 2021, Vol. 91(1–2) 188–199 journals.sagepub.com/home/trj

10. *Joanne Yip, Sun-Pui Ng*. Study of three-dimensional spacer fabrics: Physical and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 206, Issues 1–3, 12 September 2008, Pages 359–364. – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.073>

11. *Холбоев Э., Хамидова Д., Ханхаджаева Н.* Структуры сложных трикотажных переплетений // Сб-к науч. тр. Междунар. науч. конф., посвященной 135-летию со дня рождения профессора В.Е. Зотикова. 25 мая 2022 г. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. Ч. 3. С. 119...123.

12. *Elyor Kholboyev, Dilafruz Khamidova, Gulfiya Gulyayeva and Nilufar Khankhadjaeva*. Investigation of the structures of complex knitted fabrics. *International Journal of Mechanical Engineering* ISSN: 0974-5823 Vol. 7 No. 1 January, 2022.

## REFERENCES

1. <https://www.grandviewresearch.com › industry-analysis>

2. *Spenser D.* Comprehensive handbook of knitting technology. Textbook. – USA Woodhead Publishing LTD 2001. 386 p.

3. <http://www.nvstyle.ru/vidyi-perepleteniya/>

4. *Stroganov B.B.* Knitting processes and mechanisms of new flat knitting automate UNIVERSAL 848-E7: monography. M.: RosZITLP, 2007. 94 p.

5. *Stroganov B.B.* Knitting processes and mechanisms of new flat knitting automate SHIMA-SEIKI SES122CS: monography. M.: RosZITLP, 2008. 89 p.

6. *Hanhadjaeva N., Mukimov M.* New Knitting Fabric Structure Made on Flat-Bed Knitting Machine. The Second International Symposium on Educational Cooperation for “Industrial Technology Education” 4.07-6.07.2008y p. 353-364.

7. *Lisha Lu, Gaoming Jiang, Guangjun Wu*. The knitting methods for seamless garments based on four-needle bed computerized flat machine. *Textile Research Journal*. Aug 16, 2021 <https://journals.sagepub.com/action/doSearch?AllField=knitting&SeriesKey=trjc>

8. *Xing Liu, Xuhong Miao*. Analysis of yarn tension based on yarn demand variation on a tricot knitting machine. *Textile Research Journal* Mar 3, 2016. – <https://journals.sagepub.com/action/doSearch?AllField=knitting&SeriesKey=trjc>

9. *Jorge Llinares Berenguer, Pablo Diaz-García and Pau Miro Martínez*. Determining the loop length during knitting and dyeing processes. *Textile Research Journal* 2021, Vol. 91(1–2) 188–199 journals.sagepub.com/home/trj

10. *Joanne Yip, Sun-Pui Ng*. Study of three-dimensional spacer fabrics: Physical and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 206, Issues 1–3, 12 September 2008, Pages 359–364. – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.073>

11. *Kholboev E., Khamidova D., Khankhadzaeva N.* Structures of complex knitted weaves // Sat. tr. Intl. scientific conference dedicated to the 135th anniversary of the birth of Professor V.E. Zotikova. May 25, 2022. M.: RSU named after. A.N. Kosygina, 2022. Part 3. P. 119...123.

12. *Elyor Kholboyev, Dilafruz Khamidova, Gulfiya Gulyayeva and Nilufar Khankhadjaeva*. Investigation of the structures of complex knitted fabrics. *International Journal of Mechanical Engineering* ISSN: 0974-5823 Vol. 7 No. 1 January, 2022.

Рекомендована кафедрой переработки текстильных изделий Джизакского политехнического института. Поступила 30.03.23.

УДК 677.025

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_107

## ПАРАМЕТРЫ И СВОЙСТВА ТРИКОТАЖА ДЛЯ КОМПРЕССИОННЫХ ЧУЛОЧНО-НОСОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

### PARAMETERS AND PROPERTIES OF KNITWEAR FOR COMPRESSION HOSIERY PRODUCTS

*Ф.М. КОМОЛИДИНОВА, М.М. АБДУРАХИМОВА, Н.Р. ХАНХАДЖАЕВА*

*F.M. KOMOLIDINOVA, M.M. ABDURAKHIMOVA, N.R. KHANKHADJAEVA*

(Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Ташкент, Узбекистан)

(Tashkent Institute of Textile and Light Industry Tashkent, Uzbekistan)

E-mail: sun.textile0394@gmail.com, abdurahimovamaftunakhonkhodja@gmail.com, nilufar.khankhadjaeva@bk.ru

*Данная статья посвящена разработке компрессионных чулочно-носочных изделий для жарких климатических условий с использованием натурального и синтетического сырья. Рассмотрены возможности полу-*

*чения компрессионного трикотажа на основе футерного переплетения на чулочно-носочных автоматах. Разработаны пять вариантов структур трикотажа различного раппорта футерных переплетений. В качестве сырья использованы хлопчатобумажная пряжа, спандекс и латекс. Определены технологические параметры и физико-механические свойства образцов. Приведен анализ закономерностей изменения свойств, получены уравнения регрессии. Даны необходимые рекомендации по применению новых вариантов структур трикотажа для ассортимента компрессионных трикотажных изделий при профилактике варикозных заболеваний.*

*This article examines the results of research in the development of compression hosiery using natural and synthetic raw materials for hot climatic conditions. The possibilities of obtaining compression knitwear based on fleecy knitting structures on hosiery machines are considered. Five variants of knitwear structures of various fleecy knitting structures patterns have been developed. Cotton yarn (a natural type of raw material), spandex and latex (synthetic threads) are used as raw materials. The technological parameters, physical and mechanical properties of the samples were determined. The paper also provides an analysis and regularity of changes in properties, and regression equations are obtained. The necessary recommendations on the use of new variants of knitwear structures are given. Samples of structures are recommended for a range of compression knitting products for the prevention of varicose veins.*

**Ключевые слова:** компрессионный трикотаж, футерное переплетение, технологические параметры, физико-механические свойства, разрывная нагрузка, удлинение, деформация.

**Keywords:** compression knitwear, fleecy structure, technological parameters, physical-mechanical properties, breaking strength, elongation, deformation.

#### *Введение*

Разработка и исследование трикотажного ассортимента с функциональными свойствами, в частности медицинских компрессионных трикотажных изделий, является одним из актуальных направлений в технологии трикотажа. Жаркие климатические условия Узбекистана, а также Средней Азии в целом определяют два основных пункта данного направления: во-первых, необходимость профилактики заболеваний варикозного расширения вен, во-вторых, спрос потребителя на ассортимент из натуральных волокон.

В работе [1] показано, что изделия компрессионного типа, изготовленные из трикотажных материалов, имеющие именно медицинское назначение, должны в обязательном порядке иметь определенные характеристики:

– в качестве основного сырья должны использоваться либо натуральные материалы, либо синтетические, допустимые к применению в определенных медицинских целях. К натуральным материалам такого рода чаще всего относят хлопок и каучук;

– трикотажное полотно должно оказывать неравномерное давление на различные части конечностей в процессе использования изделий;

– в зависимости от конкретного назначения каждое изделие должно оказывать на конечность давление, уровень которого соответствует заранее определенному показателю;

– каждый тип изделия должен соответствовать заранее определенному размерному ряду, будь то чулки, колготки или гольфы;

- давление, обеспечиваемое изделиями на конечность, должно быть постоянным в течение определенного временного периода;
- изделия рассматриваемого типа должны иметь высокие показатели прочности, эластичности;
- изделия не должны иметь швов.

М.А. Маринкиной [2] была сформирована комплексная система показателей, позволяющая осуществлять объективную оценку и анализ качества компрессионных изделий различного типа.

Анализ работ опытно-экспериментального назначения показал, что числовые показатели действующих официальных норм на практике характеризуются как существенно превышенные. В частности, установлено завышенное значение показателя деформации остаточного типа. Как правило, такие деформации имеют место при растяжениях, а кроме того, при изменении линейных размеров в процессе мокрой обработки изделия.

На сегодняшний день не предусмотрено какого-либо единого стандарта или мнения о том, какой именно материал лучше подходит для изготовления изделий компрессионного типа – натуральный или же синтетический. Аналитики *Меди Байройт* склонны считать, что предпочтительнее использовать материалы второго типа, поскольку хлопковое волокно не может соответствовать полному спектру требований. Одновременно с этим синтетические материалы имеют такие неоспоримые преимущества, как гипоаллергенность и низкая гигроскопичность [3]. Другая группа специалистов из *Офа Бамберг и Сигварис*, напротив, склонна к противоположному мнению, считая, что хлопок является гораздо более предпочтительным материалом в ситуациях, когда речь идет о контакте трикотажа с кожей человека.

Использование новых технологий и методов производства делает возможным изменение свойств и характеристик материалов синтетического типа, что в значительной степени приближает их к натуральным полотнам. Однако исследования, проведенные ранее в сфере спроса среди потребителей на изделия рассматриваемого типа [4],

показывают, что большим спросом пользуются именно изделия из натуральных волокон. Отсюда следует вывод, что применение материалов обоих типов может иметь место в равной степени. Также следует рассматривать возможности производства изделий из трикотажа комбинированного типа. Такой подход позволит максимизировать качество готовых изделий, минимизируя недостатки трикотажа обоих типов.

Механические свойства оплетенной нити, которая является основным компонентом пряжи для эластичного трикотажа медицинских компрессионных чулок, исследовались несколькими авторами. Структурный анализ показывает, что свойства вложенных нитей в значительной степени отражают общее поведение полотна. Поэтому, характеризуя эластичные свойства прокладываемой нити, можно прогнозировать механическое поведение всех медицинских компрессионных полотен [5, 6].

С течением времени хлопковые материалы, используемые при производстве изделий компрессионного типа, постепенно уступают место таким материалам натурального происхождения, как бамбук и каучук. Популярность материала второго типа обусловлена тем, что он имеет высокие показатели сцепления с кожей, что весьма существенно при изготовлении чулок и гольфов (борта таковых). Но поскольку на структурном уровне каучук характеризуется как материал высокобелковый, он может способствовать возникновению аллергических реакций. Однако нужно также подчеркнуть, что полному спектру требований, предъявляемых к компрессионным изделиям, на сегодняшний день не соответствует на 100 % ни один из существующих типов полотен.

Сегодня продолжается активная разработка методов, способствующих улучшению характеристик синтетических полотен. Однако натуральные аналоги существенно превосходят их по показателям гигиеничности.

В ТИТЛП ведутся работы по разработке и исследованию трикотажного ассортимента с функциональными свойствами, в

частности медицинских компрессионных трикотажных изделий [7, 8, 9].

#### Методы исследования

С целью получения компрессионного чулочно-носочного изделия с улучшенными свойствами разработаны пять вариантов структуры футерованных переплетений на базе кулирной глади. Варианты разработанных структур различаются друг от друга раппортом переплетения, т. е. количеством футерной нити в петли глади и сдвигом ее прокладывания.

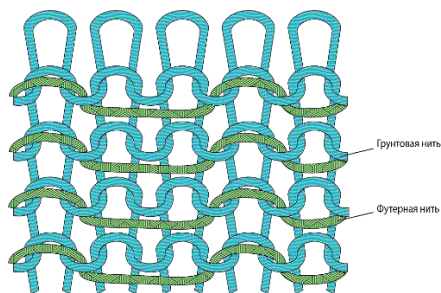


Рис. 1

Разработаны следующие вариации футерных переплетений, обозначенных как: 2/1 (число столбиков в проекции футерной протяжки / число столбиков, в которых футерный набросок сбрасывается вместе с петлей грунта),  $c=0$  (сдвиг кладки футерной нити); 3/1,  $c=0$ ; 2/1,  $c=1$ ; 3/1,  $c=1$ ; 3/1,  $c=2$ . Все варианты выработаны с заправкой: грунт – х/б 18 текс\*1, спандекс 7,5 текс \*1 (40 филаментов), футер – латекс 166 текс. Один из вариантов футерных пе-

реплетений, разработанных для компрессионного чулочно-носочного изделия, приведен рис. 1.

Согласно рис. 1 раппорт переплетения состоит из одного ряда и трёх столбиков. Переплетение содержит футерную нить, наброски которой через два столбика сбрасываются вместе с игольными дугами старых петель на новые. Наброски одного петельного ряда, первого и четвертого столбика соединяются с протяжкой, лежащей на изнаночной стороне трикотажа. Протяжка футерной нити удлиняется на две ширины петель глади. Футерная нить в виде наброска закрепляется на игольную дугу грунтовой петли. При этом сдвиг футерной нити равен нулю.

#### Результаты и обсуждение

Ключевые технические характеристики футерного трикотажа, применяемого на практике для изготовления чулочно-носочной продукции компрессионного назначения, определены с применением стандартных методик и отражены в табл. 1.

Выполненная оценка показателей, характеризующих плотность выбранных вариаций футерного трикотажного полотна в разрезе горизонтали и вертикали, позволила сделать вывод о том, что при идентичных условиях формирования переплетений в случае с каждым конкретным полотном в существенной степени различаются показатели, характеризующие плотность таковых.

Таблица 1

Показатели	Варианты					
	I	II	III	IV	V	
Виды и линейные плотности применяемого сырья	грунт – х/б 18 текс*1, спандекс 7,5 текс *1 (40 филамент), футер – латекс 166 текс					
Раппорт переплетений	2/1 $c=0$	3/1 $c=0$	2/1 $c=1$	3/1 $c=1$	3/1 $c=2$	
Средний петельный шаг А, мм	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	
Высота петельного ряда В, мм	1	1	1	0,9	0,9	
Плотность по горизонтали П <sub>г</sub> , петель	90	90	90	90	90	
Плотность по вертикали П <sub>в</sub> , петель	100	100	100	110	110	
Длина нити в петле L, мм	х/б	6,2	6,8	6,3	7	6,8
	спандекс	6	6,5	6	6,8	6
	латекс	1,0	1,1	1,1	1,3	1,1
Толщина М, мм	1,1	1,2	1	1,2	1,1	
Поверхностная плотность трикотажа $\rho$ , г/м <sup>2</sup>	354	372	330	404	370	
Объемная плотность трикотажа $\delta$ , мг/см <sup>3</sup>	322	310	330	336	336	

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что показатель плотности по горизонтали

остается неизменным во всех случаях и составляет П<sub>г</sub>=90. Плотность по вертикали

В первых трех вариантах равна 100, в последующих двух вариантах – 110. Т.е. в выработанных вариантах плотность по вертикали и горизонтали сильно не меняется. Это позволяет наблюдать изменение других параметров и свойств образцов при стабильной плотности.

Необходимо уточнить, что показатели плотности оказывают непосредственное влияние на материалоемкость трикотажа. Это обусловлено тем, что изменение данного показателя приводит к корреляционному изменению показателей, характеризующих поверхностную плотность и толщину трикотажа. Показатели поверхностной плотности трикотажа могут подвергаться существенным изменениям, если изменяется показатель плотности вязания, толщина нитей или режим отделки. Прочие показатели при этом могут оставаться неизменными.

При изучении показателей, отраженных в табл. 1, становится ясно, что поверхностная плотность колеблется в диапазоне 330–404 г/м<sup>2</sup>. Нижнее значение характерно для третьего варианта, наиболее высокое – для четвертого. Разница составляет 18 %, хотя все образцы изготовлены из аналогичного материала с применением аналогичного оборудования. В данном случае показатель поверхностной плотности изменяется за счет изменения как плотности вязания, так и раппорта переплетения. В частности, чем большим является количество грунтовых петельных столбиков, которые пересекает протяжка футерной нити, тем выше будет показатель, характеризующий поверхностную плотность материала. Если же футерная нить сдвигается в раппорте, данный показатель, напротив, пропорционально снижается: вариант 1 (раппорт 2/1, с=0) – 354 г/м<sup>2</sup>, вариант 3 (раппорт 2/1, с=1) – 330 г/м<sup>2</sup>.

Очевидно, что изменение плотности материала способствует изменениям эксплуатационных и гигиенических показателей. Предложен показатель облегченности структуры материала, посредством которого может быть осуществлена характеристика как качества полотна, так и его материалоемкости. В контексте данного пока-

зателя учитывается как поверхностная плотность материала, так и его толщина.

Важно понимать, что показатель толщины напрямую связан с показателями, отражающими физические и механические свойства: жесткостью, поверхностной плотностью, воздухопроницаемостью и т.п. [10]. Показатель толщины материала находится в прямой зависимости от толщины нитей, а также типа их переплетения, показателя плотности вязания и того, какие отделочные операции были применены при изготовлении полотна.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что показатель толщины материала меняется в диапазоне 1–1,2 мм и пропорционально возрастает с увеличением количества нитей. Если имеет место изменение сдвига и раппорта, толщина материала изменяется в пределах 16,7 %.

Таким образом, сдвиг футерного наброска и длины футерной протяжки оказывают непосредственное влияние на толщину материала.

Показатель, характеризующий облегченность материала на структурном уровне, – объемная плотность, которую рассчитывали с использованием следующей формулы:

$$\delta = \frac{\rho}{M}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – объемная плотность, мг/см<sup>3</sup>;  $\rho$  – поверхностная плотность, г/м<sup>2</sup>;  $M$  – толщина, мм.

Установлено, что объемная плотность футерного переплетения изменяется в диапазоне 310–336 мг/см<sup>3</sup>. Наиболее высокое значение, характеризующее объемную плотность, наблюдается у образцов варианта 4, 5, а самое низкое – у образца варианта 2. Интересен тот факт, что варианты 2, 4 и 5 имеют одинаковую толщину, но при этом разное значение объемной плотности по причине разного раппорта переплетения. Вариант 2 подразумевает наиболее низкий расход сырья, о чем свидетельствует низкий показатель объемной плотности.

Повышение протяженности футерных протяжек в раппорте переплетения спо-

способствует возрастанию поверхностной плотности. В случае сдвига футерного наброска со следующего ряда раппорта данный показатель снижается. Важно уточнить, что связь показателей поверхностной и объемной плотностей с протяженностью футерных протяжек имеет нелинейный характер.

К ключевым физико-механическим характеристикам материала рассматриваемого типа следует отнести показатели проч-

ности, удлинения при разрыве, растяжение при усилении, меньшем разрывного, показатели устойчивости к однократным и многократным растяжениям, а также усадку при влажно-тепловой обработке [11].

Анализ гигиенических характеристик готовых изделий показал, что параметр воздухопроницаемости зависит от пористости и толщины материала [12].

Таблица 2

Показатели		Варианты				
		I	II	III	IV	V
Виды и линейные плотности применяемого сырья		грунт – х/б 18 текс*1, спандекс 7,5 текс *1 (40F), футер – латекс 166 текс				
Раппорт переплетений		2/1 с=0	3/1 с=0	2/1 с=1	3/1 с=1	3/1 с=2
Воздухопроницаемость В, см <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> ·с		72	74,8	51	54,42	70,6
Устойчивость к истиранию, об.		27500	27500	27500	28500	29000
Разрывная нагрузка Р, Н	по длине	292	210	223	220	270
	по ширине	309	314	304	290	314
Разрывное удлинение ε, %	по длине	160	170	150	160	153
	по ширине	290	318	278	305	279
Растяжимость при 5кгс (49Н) ε <sub>р</sub> , %	по длине	110	110	110	98	105
	по ширине	180	205	200	183	190
Обратимая деформация ε <sub>о</sub> , %	по длине	91	92	85	88	92
	по ширине	100	97	99	99	99
Необратимая деформация ε <sub>н</sub> , %	по длине	9	8	15	12	8
	по ширине	0	3	1	1	1
Усадка У, %	по длине	13	16	11	6	12
	по ширине	5	4	5	5	6

Чем выше показатель пористости, тем больше воздухопроницаемость и меньше весовое заполнение материала. Показатель воздухопроницаемости находится в непосредственной зависимости от числа пор, а также размерных параметров и формы таковых, что зависит от структуры переплетения материала. Тип сырья имеет второстепенное значение. Показатели воздухопроницаемости определяли с использованием устройства AP-360 SM при 20°С и давлении 1 атм. Для исследуемых образцов меняются в пределах 51–74,8 см<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>·с. Самый низкий показатель воздухопроницаемости наблюдается у третьего варианта футерного трикотажа, наиболее высоким значением исследуемого показателя в данном случае характеризовался образец 2 (74,8 см<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>·с).

Проводя итоги, можно сказать, что воздухопроницаемость исследованных образцов футерного трикотажа для компресси-

онных чулочно-носочных изделий можно менять в пределах 32%, изменяя раппорт переплетения.

Показатели разрывной нагрузки варьируются в диапазонах 210–292 Н по длине и 290–314 Н по ширине. Применение сдвига футерного наброска в раппорте меняет прочность к разрыву трикотажа по длине и ширине. По данным графика на рис. 2, а получены уравнения регрессии в области, характеризующей изменение показателей разрывной нагрузки по длине и ширине ввиду раппорта сдвига футерного наброска:

– уравнения регрессии изменения показателя разрывной нагрузки по длине

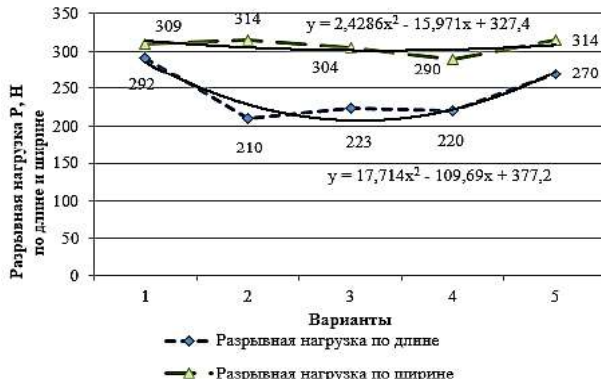
$$y = 17,714x^2 - 109,69x + 377,2;$$

– уравнения регрессии изменения показателя разрывной нагрузки по ширине

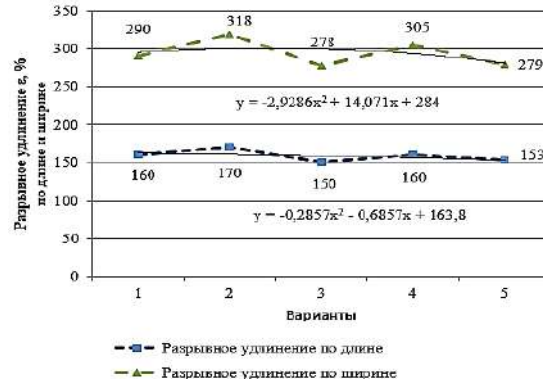
$$y = 2,4286x^2 - 15,971x + 327,4,$$

где x – варианты футерного переплетения с различным раппортом.





а)



б)

Рис. 2

Разрывное удлинение исследуемых образцов также меняется при прибавлении в раппорт трикотажа сдвига футерного наброска (рис. 2, б). Самый высокий показатель, характеризующий разрывное удлинение по длине, имел место у варианта 2. Он составил 170 %. Нижнее значение зафиксировано у варианта 3 – 150 %. Нижнее значение разрывного удлинения по ширине зафиксировано для варианта 3 – 278 %, верхнее – у варианта 2 – 318 %.

В ходе работы получены:

– уравнения регрессии изменения разрывного удлинения по длине

$$y = -0,2857x^2 - 0,6857x + 163,8;$$

– уравнения регрессии изменения разрывного удлинения по ширине

$$y = -2,9286x^2 + 14,071x + 284.$$

Основным показателем компрессионных изделий, который создает более комфортную эксплуатацию, является показатель растяжимости [13]. Определение вышеуказанного показателя может быть выполнено через растяжение образца до тех пор, пока стрелка измеряющего силу при-

бора не достигнет значения 5 кгс. ГОСТ 58236–2020 регламентирует, что растяжимость по длине не должна быть менее 80 %. Показатель растяжимости исследуемых образцов компрессионного чулка находится в пределах 98–110 % по длине и 180–205 % по ширине (рис. 3, а).

Представленные результаты свидетельствуют о следующем: при изменении длины футерной протяжки соответственно изменяется и растяжимость компрессионного трикотажа; сдвиг футерного наброска, увеличивая количество грунтовой петли, влияет на растяжимость компрессионного трикотажа.

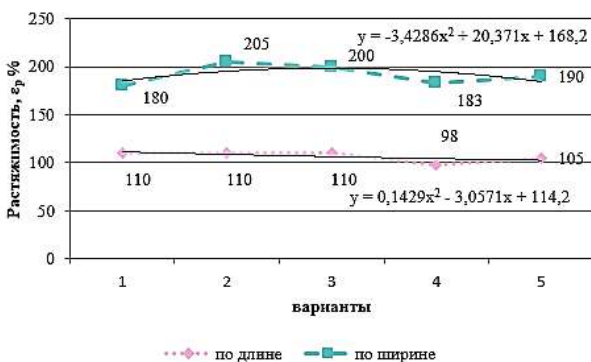
Получены уравнения регрессии изменения растяжимости по длине и ширине в зависимости от раппорта переплетения:

– уравнения регрессии изменения растяжимости по длине

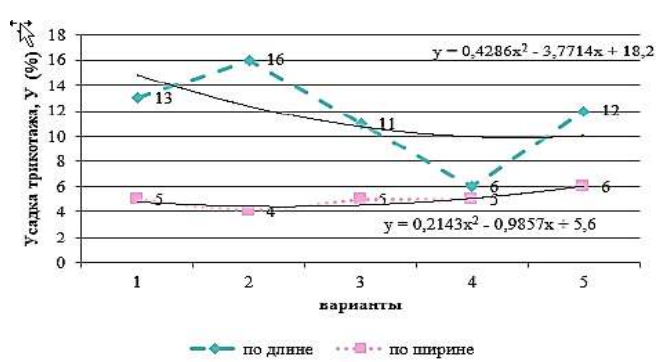
$$y = 0,1429x^2 - 3,0571x + 114,2;$$

– уравнения регрессии изменения растяжимости по ширине

$$y = -3,4286x^2 + 20,371x + 168,2.$$



а)



б)

Рис. 3

Согласно ГОСТ 58236–2020 изменение линейно-размерных параметров изделий рассматриваемого типа, а также изделий фиксирующего типа при первичной усадке не должно превышать отметку в 20 %. Вышеуказанные показатели варьируются в диапазоне 6–16 % по длине и 4–6 % по ширине, что считается нормой, График, характеризующий изменения усадки, приведен на рис. 3.

Из рис. 3, б видно, что при применении сдвига футерной нити показатель усадки по длине больше, чем по ширине, т. е. сдвиг футерной нити отрицательно влияет на формоустойчивость футерованного материала по длине. По ширине показатель усадки менее значителен. Это говорит о том, что сдвиг футерной нити положительно влияет на формоустойчивость трикотажа по ширине, а также при повышении протяженности футерной протяжки снижается показатель усадки по длине.

В ходе работы получены уравнения регрессии изменения усадки по длине и ширине согласно раппорту переплетения:

– уравнения регрессии изменения усадки по длине

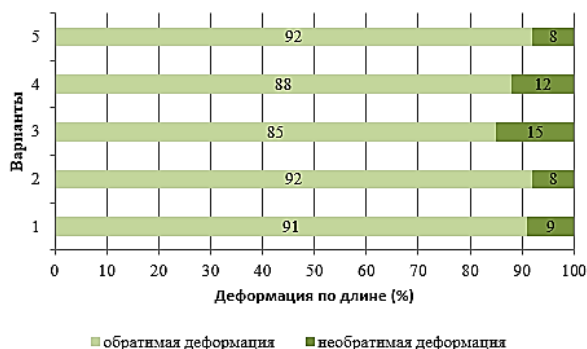
$$y = 0,4286x^2 - 3,7714x + 18,2;$$

– уравнения регрессии изменения усадки по ширине

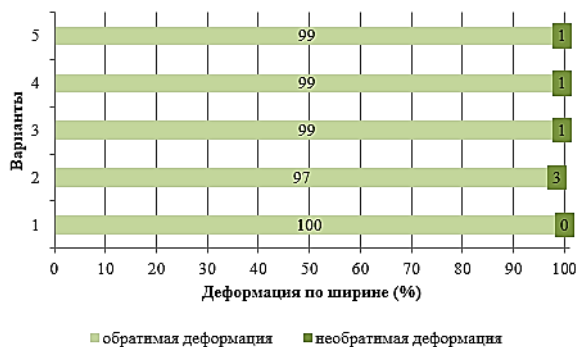
$$y = 0,2143x^2 - 0,9857x + 5,6.$$

Показатель деформации обратимого типа можно вычислить с помощью формулы:

$$\varepsilon_0 = \frac{l_2 - l_1}{l_1 - l_0} * 100\% \quad (2)$$



а)



б)

Рис. 4

Из анализа показателей необратимой (остаточной) деформации исследуемых

Здесь  $l_0$  – начальная длина образца, мм;  
 $l_1$  – длина образца после приложения нагрузки, мм;

$l_2$  – длина образца после «отдыха», мм.

Показатель деформации остаточного типа можно вычислить по формуле:

$$\varepsilon_1 = 100 - \varepsilon_0 \quad (3)$$

Согласно ГОСТ 58236–2020 значение остаточной деформации изделий не может превышать показатель в 10 % для изделий рассматриваемого типа.

На рис. 4, а, б представлены изменения доли обратимой и остаточной деформации по длине и ширине по вариантам образцов чулка указанного типа.

Результаты исследования показывают, что деформация обратимого типа для готовых изделий из футерованного трикотажа рассматриваемого назначения может существенно изменяться в диапазоне 85–92 % по длине и 97–100 % по ширине. Наиболее высокий показатель деформации первого типа является характерным для образцов 2 и 5 (92 %). Наиболее высокий показатель обратимой деформации по ширине отмечен для образцов с 1 по 5 (97–100 %).

Таким образом, варианты образцов № 2, 3, 4, 5 имеют низкий показатель остаточной деформации, а вариант 1 не имеет необратимой деформации, т. е. изделие полностью возвращается в исходный размер.

образцов следует, что более подходящими для выработки компрессионного чулочно-

носочного изделия являются 1, 3, 4, 5 варианты. 2 вариант тоже соответствует показателям по ГОСТ, так как остаточная деформация не превышает 10 %.

#### Заключение

Выработано пять вариантов структуры на основе футерного переплетения, предназначенных для компрессионных бесшовных трикотажных изделий. Получены следующие вариации раппорта футерных переплетений, обозначенных как 2/1, с=0; 3/1, с=0; 2/1, с=1; 3/1, с=1; 3/1, с=2. Все варианты выработаны с заправкой: грунт – х/б 18 текс\*1, спандекс 7,5 текс \*1 (40F), футер – латекс 166 текс. В результате экспериментальных исследований определены технологические параметры и физико-механические свойства образцов.

В результате исследований выявлено, что технологические параметры и физико-механические свойства исследуемых образцов трикотажа соответствуют нормам ГОСТ 58236–2020 и должны быть учтены при проектировании компрессионных чулочно-носочных изделий. Образцы выработаны в основном из натурального сырья с добавлением эластомерных нитей для обеспечения компрессионных свойств и предназначены для регионов с жаркими климатическими условиями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ровинская Л.П. Трикотаж специального назначения: текст лекций. СПб.: СПГУТД, 2015. 34 с.
2. Маринкина М.А. Разработка методик оценки и исследование свойств, определяющих качество изделий компрессионного назначения из льняных трикотажных полотен: дис. ... канд. техн. наук. Кострома, 2015. 171 с.
3. Компрессионный трикотаж – причины использования хлопка и каучука при изготовлении компрессионного трикотажа. – <http://compressionworld.ru/articles/i/13>
4. Об искусственных и природных материалах в изделиях компрессионного трикотажа – мнение потребителей. – <http://compressionworld.ru/news/i/166>
5. Bruniaux P, et al. Modeling the mechanics of a medical compression stocking through its components behavior: Part 1 – modeling at the yarn scale // Textile Research Journal. 2012. 82(18) P. 1833-1845.
6. Maklewska E, Nawrocki A, Ledwoń J, Kowalski K. Modelling and Designing of Knitted Products Used

in Compressive Therapy // Fibers & Textiles in Eastern Europe. 2006. 14(5), 111-113.

7. Ханхаджаева, Н. Р. Исследование антиварикозных чулочно-носочных изделий для компрессионной терапии / Н.Р. Ханхаджаева, Ф.М. Рискалиева, Н.М. Азимова // Прогрессивные технологии и оборудование: текстиль, одежда, обувь: материалы докладов Международного научно-практического симпозиума, Витебск, 3 ноября 2020 г. Витебск: ВГТУ, 2020. С. 119...122.

8. Ханхаджаева Н.Р. Качественные характеристики компрессионных чулочно-носочных изделий / Н.Р. Ханхаджаева, Ф.М. Комолидинова // Технический текстиль – основа научно-технического развития России: сб-к науч. тр. Всероссийского круглого стола с международным участием. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023.

9. Абдурахимова М.М. Комплексная оценка качества компрессионных изделий / М.М. Абдурахимова, М.К. Кулметов // Технический текстиль – основа научно-технического развития России: сб-к науч. тр. Всероссийского круглого стола с международным участием. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023.

10. Шалов И.И. Технология трикотажа / И.И. Шалов, А.С. Далидович, Л.А. Кудрявин. М.: Легпромбытиздат, 1986. 376 с.

11. Кобляков А.И. Лабораторный практикум по текстильному материаловедению / А.И. Кобляков, Г.Н. Кукин, А.Н. Соловьев. 2-е изд. М.: Легпромбытиздат, 1986. С. 232...245.

12. Торкунова З.А. Испытание трикотажа. М.: Легпромбытиздат, 1985. 200 с.

13. Дроботун Н.В. Разработка методов оценки упруго-релаксационных свойств высокоэластичного трикотажа и проектирования медицинских изделий компрессионного назначения: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 132 с.

#### REFERENCES

1. Rovinskaya, L.P. Knitwear for special purposes: Lecture text. St. Petersburg State University of Technology and Design. St. Petersburg, 2015. 34 p.
2. Marinkina M.A. Development of evaluation methods and research of properties that determine the quality of products for compression purposes of linen knitted fabrics: diss. ... cand. technical sciences. Kostroma, 2015. 171p.
3. Compression knitwear – the reasons for the use of cotton and caoutchouc in the manufacture of compression knitwear. – <http://compressionworld.ru/articles/i/13>
4. On artificial and natural materials in compression knitwear – consumer opinion. – <http://compressionworld.ru/news/i/166>
5. Bruniaux P, et al. Modeling the mechanics of a medical compression stocking through its components behavior: Part 1 – modeling at the yarn scale // Textile Research Journal. 2012. 82(18) P. 1833...1845

6. *Maklewska E, Nawrocki A, Ledwoń J, Kowalski K.* Modelling and Designing of Knitted Products Used in Compressive Therapy // *Fibers & Textiles in Eastern Europe*. 2006. 14(5), 111-113.

7. *Khankhadjaeva N.R.* Research of anti-varicose hosiery for compression therapy/ N.R. Khankhadjaeva, F.M. Riskalieva, N.M. Azimova // *Proceedings of the International Scientific and Practical Symposium Progressive technologies and equipment: textile, clothing, shoes*. Vitebsk: VSTU, November 3, 2020. 119...122 p.

8. *Khankhadjaeva N.R.* Qualitative characteristics of compression hose products / N.R. Khankhadjaeva, F.M. Komolidinova. // *Proceedings of the All-Russian round table with international participation technical textiles – the basis of scientific and technological development of Russia*. M.: RNU after A.N. Kosygin, 2023.

9. *Abdurahimova M.M.* Comprehensive assessment of the quality of compression products / *M.M. Abdurahimova, M.K. Kulmetov* // *Proceedings of the All-Russian round table with international participation technical textiles – the basis of scientific and techno-*

*logical development of Russia*. M.: RNU after A.N. Kosygin, 2023.

10. *Shalov I.I.*, *Knitwear technology* / I.I. Shalov, A.S. Dalidovich, L.A. Kudryavin. M.: Legprombytizdat, 1986. 376 p.

11. *Koblyakov A.I.* Laboratory workshop on textile materials science / A.I. Koblyakov, G.N. Kulin, A.N. Soloviev // *Moscow: Legprombytizdat*, 2nd ed. 1986. 232...245 p.

12. *Torkunova Z.A.* Testing of knitwear. M.: Legprombytizdat, 1985. 200 p.

13. *Drobotun N.V.* Development of methods for assessing the elastic-relaxation properties of high-stretch knitwear and designing medical products for compression purposes: dis. ... cand. technical sciences. St. Petersburg, 2009. – 132 p.

Рекомендована кафедрой технологии текстильных полотен Ташкентского института текстильной и легкой промышленности. Поступила 07.07.23.

УДК 677.016

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_117

**ОЦЕНКА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПИГМЕНТОВ И ЭФФЕКТА САМООЧИЩЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ASSESSMENT OF PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF INTERFERENCE PIGMENTS AND SELF-CLEANING EFFECT OF TEXTILE MATERIALS**

*Н.В. ДАЩЕНКО<sup>1</sup>, А.М. КИСЕЛЕВ<sup>1</sup>, О.И. ОДИНЦОВА<sup>2</sup>, В.Е. РУМЯНЦЕВА<sup>3</sup>, Е.В. РУМЯНЦЕВ<sup>3</sup>*

*N.V. DASHCHENKO<sup>1</sup>, A.M. KISELEV<sup>1</sup>, O.I. ODINTSOVA<sup>2</sup>, V.E. RUMYANTSEVA<sup>3</sup>, E.V. RUMYANTSEV<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
<sup>2</sup>Ивановский государственный химико-технологический университет,  
<sup>3</sup>Ивановский государственный политехнический университет)

<sup>1</sup>St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,  
<sup>2</sup>Ivanovo State University of Chemical Technology,  
<sup>3</sup>Ivanovo State Polytechnic University)

E-mail: dnv77@mail.ru, odolga@yandex.ru, varrim@gmail.com

*Представлены результаты исследований в области синтеза и применения наноразмерных интерференционных пигментов на основе диоксида титана и оксидов других элементов с целью формирования покрытий на текстильном материале с эффектами «структурной» окраски, самоочищения поверхности от загрязнений и защиты от ультрафиолетового излучения. В работе использованы методы энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии для анализа состава синтезированных пигментов и распределения наночастиц на поверхности. В результате проведенных исследований установлено, что максимальный эффект самоочищения поверхности текстильных материалов достигается в том случае, когда в качестве фотокатализаторов используются интерференционные пигменты, имеющие в своем составе оксиды металлов с обязательным присутствием наночастиц диоксида титана в анатазной кристаллической модификации. Экспериментально доказано, что покрытия на основе интерференционных пигментов, содержащих TiO<sub>2</sub>, сформированные на поверхности ткани, оказывают на нее защитное действие, блокируя и снижая интенсивность солнечного (дневного) УФ-излучения, что подтверждается сравнительными данными о разрывной нагрузке исходной и модифицированной ткани.*

*The results of research in the field of synthesis and application of nano-sized interference pigments based on titanium dioxide and oxides of other elements are presented for the purpose of forming coatings on textile materials with the effects of structural coloring, surface self-cleaning from contamination and protection from ultraviolet radiation. The work used methods of energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy and scanning electron microscopy to analyze the composition of synthesized pigments and the distribution of nanoparticles on the surface. As a result of the studies, it was established that the maximum effect of self-cleaning of the surface of textile materials is achieved when interference pigments containing metal oxides with the obligatory presence of titanium dioxide nanoparticles in the anatase crystalline modification are used as photocatalysts. It has been experimentally proven that coatings based on interference pigments containing TiO<sub>2</sub> formed on the surface of the fabric have a protective effect on it, blocking and reducing the intensity of solar (daytime) UV radiation, which is confirmed by comparative data on the breaking load of the original and modified fabric.*

**Ключевые слова:** наноразмерные частицы, интерференционный пигмент, диоксид титана, фотокаталитическая активность, текстильный материал, эффект самоочистки, защита от излучений.

**Keywords:** nanoscale particles, interference pigment, titanium dioxide, photocatalytic activity, textile material, self-cleaning effect, radiation protection.

#### *Введение*

Развитию текстильной промышленности в полной мере отвечает внедрение в процессы отделки текстиля принципиально новых нано-, био-, информационных и когнитивных (NBIC) технологий, направленных на создание интеллектуальных, многофункциональных текстильных материалов и изделий нового поколения [1].

В рамках данного перспективного научно-технологического направления выполнен цикл исследований по синтезу и применению наноразмерных интерференционных пигментов на основе диоксида титана и оксидов других элементов с целью формирования покрытий с эффектом «структурной» окраски, обладающих фотокаталитической активностью и свойствами самоочистки поверхности текстильных материалов. В частности, проведен синтез наноразмерных неорганических пигментов с фотокаталитической активностью с их элементным анализом, исследованы фотокаталитические свойства покрытий на их основе с использованием тестовых красителей, изучено влияние УФ-

излучения и фотокаталитических пигментов на прочностные показатели текстильного материала и эффект самоочистки его поверхности от загрязнений различной природы.

#### *Методы*

Экспериментально осуществлен поэтапный золь-гель синтез наноразмерных оксидных пигментов с фотокаталитической активностью путем нанесения на подложку из диоксида кремния SiO<sub>2</sub> (слюды) нанослоев TiO<sub>2</sub> и SnO<sub>2</sub> с дополнительным слоем оксидов различных металлов (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, CoO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Содержание элементов в синтезированных пигментах оценивали методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии на приборе EDX-8100P фирмы «Shimadzu». Оценку распределения наночастиц синтезированных пигментов на поверхности проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU. Фотокаталитическую активность синтезированных интерференционных пигментов изучали в реакции разложения модельного органического за-

грязнителя метиленового голубого (МГ) под действием УФ-лучей. В качестве источника УФ-излучения использовали ртутную лампу низкого давления ДРТ-125 мощностью 125 Вт. Для пигментов в свободном состоянии оценивали значение оптической плотности растворов МГ на приборе КФК-3; для пигментов, закрепленных на поверхности текстильного материала, – значение коэффициента отражения R на спектрофотометре ColorI5 фирмы «Gretag Macbeth», на основании значений R рассчитывали интенсивность окраски по функции Гуревича-Кубелки-Мунка (K/S).

Разрывную нагрузку образцов оценивали на приборе РМ-250.

### Результаты и обсуждение

При оценке свойств диоксида титана отмечена его высокая фотокаталитическая активность в анатазной кристаллической модификации. Исходя из квантово-электронных представлений и особенностей протекания фотоокислительных процессов, рассмотрены механизмы фотокатализа и фотоокислительной деструкции химических соединений (в частности, загрязнений) на поверхности текстильного материала под влиянием УФ-излучения (рис. 1).

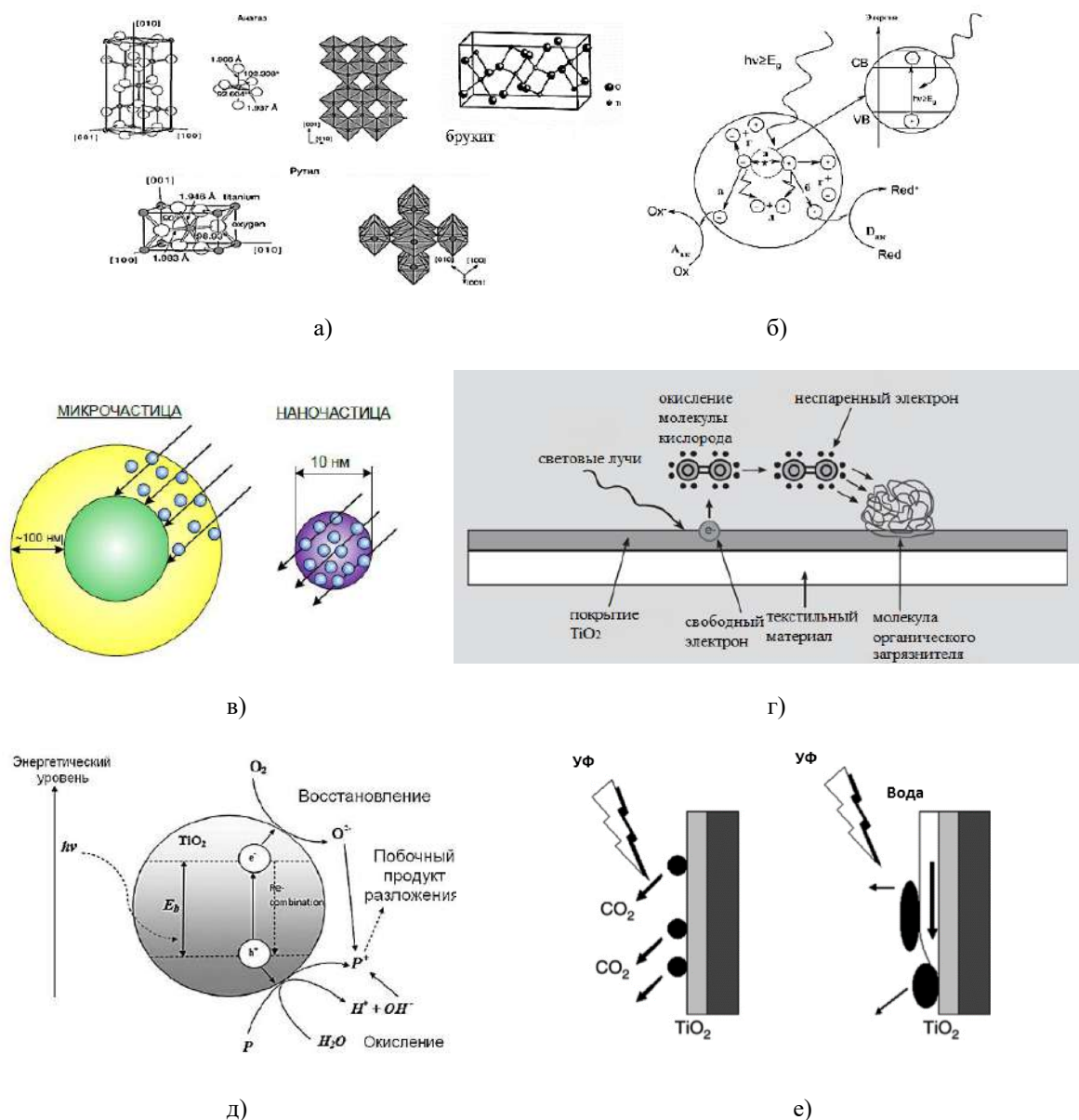
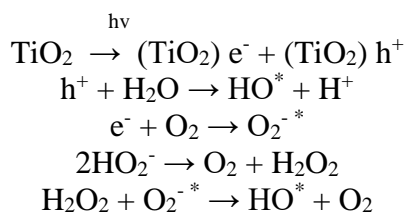


Рис. 1

Процессы, происходящие на поверхности частиц диоксида титана при фотоокислении органических соединений, можно представить следующими реакциями:



Один из вариантов синтеза наночастиц  $\text{TiO}_2$  и  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и их нанесения на текстильный материал показан на рис. 2.

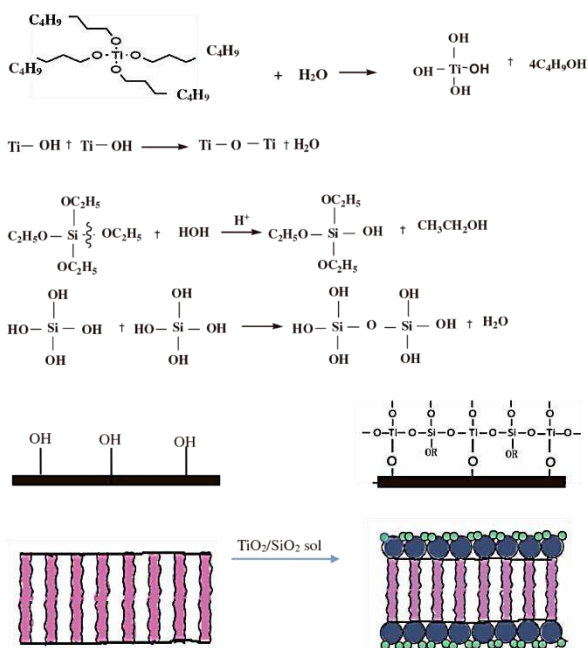


Рис. 2

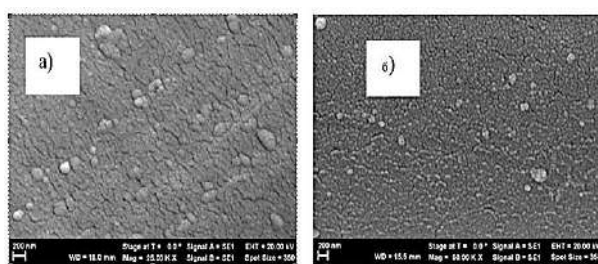
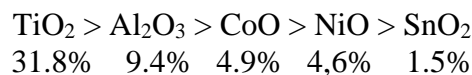


Рис. 3

Слои наночастиц диоксида титана и других индивидуальных и гибридных оксидов металлов, а также наноразмерных интерференционных пигментов на их основе, обеспечивающие достижение эффекта самоочистки текстильного материала и его защиты от УФ-излучения, могут

формироваться различными методами, некоторые из которых показаны на рис. 3.

Методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии установлено различное содержание оксидов металлов в нанослоях, определяющих цвет синтезированных пигментов, которые можно расположить в следующей убывающей последовательности:



Присутствие других оксидов составляет от 4.5 (MgO) до десятых и сотых долей процента, в малых количествах (0.001-0.89%) выявлено содержание галогенов.

Доказано, что качественное и количественное содержание элементов и соединений с фотокаталитической активностью в наноразмерных интерференционных пигментах позволяет использовать их в форме покрытий для сообщения текстильным материалам эффектов самоочистки поверхности, защиты от излучения и биоцидных свойств.

Изучены фотокаталитические свойства наноразмерных оксидных пигментов и покрытий на их основе. Установлено, что в свободном состоянии эти пигменты инициируют высокую скорость фотохимического окисления органических соединений (на примере тестового красителя метиленового голубого) (рис. 4).

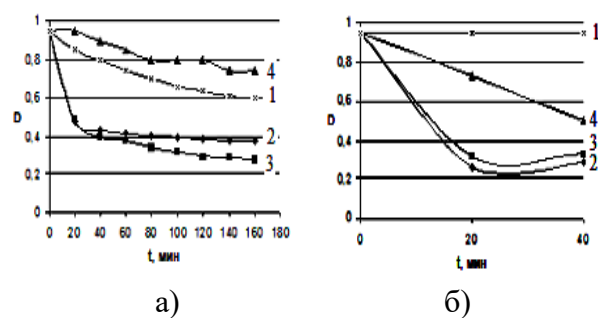
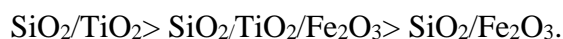


Рис. 4

Показано, что в зависимости от состава используемых пигментов их фотокаталитическая активность убывает в следующей последовательности, определяемой главным образом содержанием диоксида титана:





Максимальное деструкционное воздействие  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  на органические соединения обусловлено наибольшей емкостью слоя диоксида кремния, обеспечивающего иммобилизацию молекул разрушенного вещества вблизи каталитически активных центров  $\text{TiO}_2$  с проявлением высокого эффекта самоочистки поверхности текстильного материала. Следует отметить, что исследованные пигменты-фотокатализаторы в условиях УФ-облучения вызывают различную степень деструкции хромофорных органических соединений и не вызывают разрушения веществ неорганической природы (на примере пигментно-сажевого загрязнения) [5].

Экспериментально доказано, что покрытия на основе интерференционных пигментов, содержащих  $\text{TiO}_2$ , сформированные на поверхности ткани, оказывают на нее защитное действие, блокируя и снижая интенсивность солнечного (дневного) УФ-излучения, что подтверждается сравнительными данными о разрывной нагрузке исходной и модифицированной ткани (рис. 5).

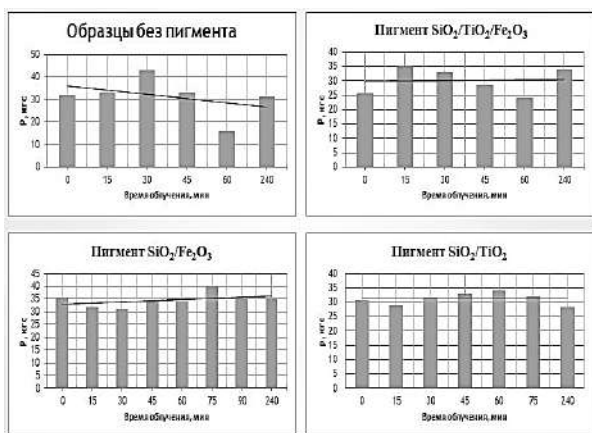
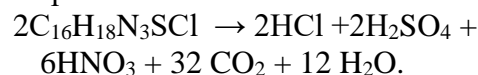


Рис. 5

Наблюдаемый защитный эффект обусловлен спецификой структуры наноразмерных интерференционных пигментов, представляющих собой прозрачные тонкие пластинки с высоким коэффициентом преломления, которые снижают доступ УФ-световой энергии к волокнообразующему полимеру с уменьшением его деструкции и сохранением прочности ткани, имеющей модифицирующее покрытие.

При оценке эффекта самоочистки модифицированной поверхности текстильного материала установлено, что максимальное обесцвечивание тестовых органических загрязнителей на сформированном покрытии достигается при содержании в нем диоксида титана. На примере тестового красителя метиленового голубого его деструкция под воздействием УФ-излучения мощностью более 3.2 эВ протекает следующим образом:



Показано, что натуральные загрязнения (кофе, сок, чай) труднее подвергаются фотохимическому обесцвечиванию по сравнению с модельным органическим красителем метиленовым голубым, и в этом случае для эффективного самоочистки поверхности требуется выбор конкретных интерференционных пигментов для каждого вида натурального загрязнения (рис. 6).

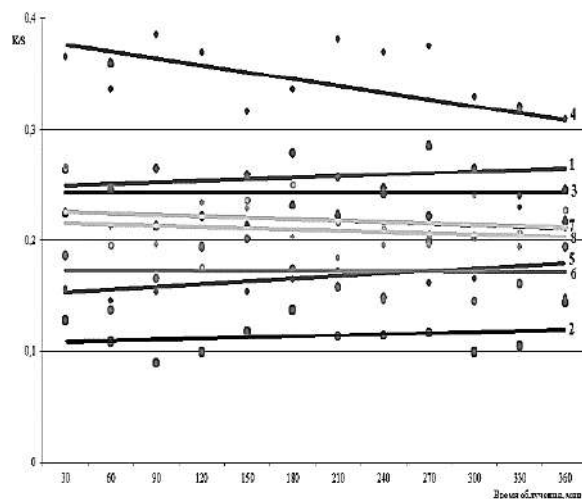


Рис. 6

Таким образом, эффект самоочистки поверхности текстильных материалов с покрытием на основе интерференционных и оксидных наноразмерных пигментов с фотокаталитической активностью максимально проявляется по отношению к органическим загрязнениям с лабильной структурой, в меньшей степени – по отношению к натуральным загрязнениям и практически не проявляется для загрязнений неорганической природы [9].

## ВЫВОДЫ

1. Осуществлен синтез наноразмерных оксидных пигментов с фотокаталитической активностью, образующих на текстильном материале покрытия с эффектами самоочищения поверхности и защиты от УФ-излучения. Предложен ряд указанных пигментов с убывающей в следующей последовательности фотокаталитической активностью:  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2 > \text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ .

2. Установлено, что максимальный эффект самоочищения поверхности текстильных материалов достигается в том случае, когда в качестве фотокатализаторов используются интерференционные пигменты, имеющие в своем составе оксиды металлов с обязательным присутствием наночастиц диоксида титана в анатазной кристаллической модификации.

3. Доказано, что натуральные загрязнения труднее подвергаются фотохимическому обесцвечиванию по сравнению с модельными органическими, а загрязнения неорганической природы практически не проявляют эффекта самоочищения на модифицированной поверхности текстильного материала.

4. Полученные результаты служат основой для производства инновационных текстильных материалов и изделий улучшенного качества и с принципиально новыми свойствами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кривевский Г.Е. Нано-, био-, химические технологии в производстве нового поколения волокон, текстиля и одежды. М., 2011. 528 с.
2. Diebold U. The surface science of titanium dioxide / U. Diebold // Surf. Sci. Rep. 2003. Vol. 48. P. 53...229.
3. Linsebigler A.L. Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results / A.L. Linsebigler, G. Lu, J.T. Yates // Chemical Reviews. 1995. Vol. 95. P. 735...758.
4. Савинов Е.Н. Фотокатализ окислительно-восстановительных реакций в водных растворах с участием дисперсных металлов и полупроводников: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.15 / Савинов Евгений Николаевич. Новосибирск, 1993. 344 с.
5. Жук Л.А., Дащенко Н.В., Киселев А.М., Одинцова О.И. Синтез и применение наноразмерных интерференционных пигментов для колорирования и защи-

ты текстильных материалов от загрязнений // Российский химический журнал. 2019. Т. LXIII, №2. С. 3-9. – DOI: 10.6060/rcj.2019632.1

6. Пармон В.Н. Разработка физико-химических основ преобразования солнечной энергии путем разложения воды в молекулярных фотокаталитических системах: дис. ... д-ра хим. наук / Пармон Валентин Николаевич. Новосибирск, 1984. 680 с.

7. Liu K. Bio-inspired titanium dioxide materials with special wettability and their applications / K. Liu, M. Cao, A. Fujishima, L. Jiang // Chemical Reviews. 2014. V. 114. P. 10044...10094.

8. Yuranova T., Mosteo R., Bandara J., Laub D., Kiwi J. Self-cleaning cotton textiles surfaces modified by photoactive SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> coating. J. Mol. Catal. A Chem. 2006, 244, 160-167.

9. Киселев А.М., Дащенко Н.В. Нанотехнологии в индустрии текстиля // Вестник СПГУТД. 2020. №1. С. 89...103.

## REFERENCES

1. Krichevskij G.E. Nano-, bio-, himicheskie tehnologii v proizvodstve novogo pokoleniya volokon, tekstilya i odezhdy. M., 2011. 528 s.
2. Diebold U. The surface science of titanium dioxide / U. Diebold// Surf. Sci. Rep. 2003. Vol. 48. P. 53...229.
3. Linsebigler A.L. Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results / A.L. Linsebigler, G. Lu, J.T. Yates // Chemical Reviews. 1995. Vol. 95. P. 735...758.
4. Savinov E.N. Fotokataliz okislitel'no- vosstanovitel'nyh reakcij v vodnyh rastvorah s uchastiem dispersnyh metallov i poluprovodnikov: diss... dok. him. nauk: 02.00.15 / Savinov Evgenij Nikolaevich. Novosibirsk, 1993. 344 s.
5. Zhuk L.A., Dashchenko N.V., Kiselev A.M., Odintsova O.I. Synthesis and Application of Nanoscale Interference Pigments for Coloring and Protection of Textile Materials from Contamination // Russian Journal of General Chemistry. 2021. Vol. 91. No. 3. pp. 1...6.
6. Parmon V.N. Razrabotka fiziko himicheskikh osnov preobrazovaniya solnechnoj energii putem razlozheniya vody v molekulyarnykh fotokataliticheskikh sistemah: diss... dok. him. nauk / Parmon Valentin Nikolaevich. Novosibirsk, 1984. 680 s.
7. Liu K. Bio-inspired titanium dioxide materials with special wettability and their applications / K. Liu, M. Cao, A. Fujishima, L. Jiang // Chemical Reviews. 2014. V. 114. P. 10044...10094.
8. Yuranova T., Mosteo R., Bandara J., Laub D., Kiwi J. Self-cleaning cotton textiles surfaces modified by photoactive SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> coating. J. Mol. Catal. A Chem. 2006, 244, 160...167.
9. Kiselev A.M., Dashchenko N.V. Nanotechnologies in textile industry // Vestnik SPGUTD. 2020. №1. P. 89...103. DOI: 10.46418/2079-8199\_2020\_1\_13

Рекомендована кафедрой химической технологии волокнистых материалов Ивановского государственного химико-технологического университета. Поступила 29.06.23.

**МОДИФИКАЦИЯ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ СОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ\***

**MODIFICATION OF FIBROUS MATERIALS  
TO INCREASE THEIR SORPTION ACTIVITY**

Ф.А. БЫКОВ, Е.Л. ВЛАДИМИРЦЕВА, Н.Л. ОВЧИННИКОВ, М.Ф. БУТМАН, О.И. ОДИНЦОВА

F.A. BYKOV, E.L. VLADIMIRTSEVA, N.L. OVCHINNIKOV, M.F. BUTMAN, O.I. ODINTSOVA

(Ивановский государственный химико-технологический университет)

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia

E-mail: elvladimirtseva@mail.ru

*Предложена методика модификации свойств хлопчатобумажного и полиакрилонитрильного волокнистых материалов с применением природного бентонита и обогащенного  $TiO_2$ -pillарированного монтмориллонита. Имобилизация частиц алюмосиликатов на поверхности волокнистых материалов повышает их сорбционную активность по отношению к органическим красителям. Появление такого эффекта обусловлено состоянием поверхности волокнистого материала, его электростатическими характеристиками. Присутствие на волокне частиц модифицированного бентонита позволяет удалить до 95 % красителя из раствора. Кроме того, в зависимости от вида закрепленных на волокне частиц волокно приобретает способность к самоочищению от органических красителей или защиту от УФ-излучения.*

*A method for modifying the properties of cotton and polyacrylonitrile fibrous materials using natural bentonite and  $TiO_2$ -enriched pillared montmorillonite is proposed. The immobilization of aluminosilicate particles on the surface of fibrous materials increases their sorption activity with respect to organic dyes. This effect is determined by the state of the surface of the fibrous material, its electrostatic characteristics. The presence of modified bentonite particles on the fiber makes it possible to remove up to 95% of the dye from the solution. In addition, the fiber acquires the ability to self-clean from organic dyes or protection from UV radiation, depending on the type of particles attached to the fiber .*

**Ключевые слова:** волокнистый материал, алюмосиликаты, модификация, сорбция, бентонит,  $TiO_2$ -pillарированный монтмориллонит, краситель, УФ-излучение, самоочищение.

**Keywords:** fibrous material, aluminosilicates, modification, sorption, bentonite,  $TiO_2$ -pillared montmorillonite, dye, UV radiation, self-cleaning.

---

\* Работа выполнена в рамках Государственного задания на выполнение НИР, тема № FZZW-2023-0008, с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Основная цель модификации текстильных материалов состоит в придании им новых характеристик, необходимых при дальнейшей эксплуатации. Для синтетических волокон этого добиться проще, для натуральных – сложнее. Одним из путей изменения свойств полимерных материалов, в том числе и волокнистых, является метод малых добавок, а именно распределение по поверхности волокна или внедрение в его структуру веществ, незначительное количество которых по отношению к массе волокнистого полимера способно кардинально влиять на его характеристики [1].

На кафедре химической технологии волокнистых материалов совместно с кафедрой технологии керамики и электрохимических производств ИГХТУ не первый год ведутся исследования по модификации текстиля различной химической природы и назначения путем закрепления на его поверхности микрочастиц нерастворимых алюмосиликатов.

Известно, что нерастворимые алюмосиликаты широко применяются в качестве адсорбентов для удаления синтетических красителей из отработанных растворов как у нас в стране, так и за рубежом [2-4]. Высокая сорбционная активность, термическая и химическая стабильность, а также дешевизна, большие запасы, возможность утилизации, а в некоторых случаях и регенерации делают экономически целесообразным применение глин в процессах очистки воды [5-7].

Наиболее часто в качестве адсорбентов используются бентонитовые глины, которые в первую очередь состоят из минералов группы монтмориллонита (ММ). Строение этого минерала представляет собой сочетание двойного слоя обращенных вершинами друг к другу кремнекислородных тетраэдров (Т) с расположенным между ними слоем алюмогидроксильных октаэдров (О) [8]. Эти слои характеризуются изоморфными замещениями, например,  $Al_3^+$  на  $Si_4^+$  в Т слое и/или  $Al_3^+$  на  $Mg_2^+$  в О слое, что обуславливает ярко выраженную способность монтмориллонитовых глин к ионному обмену [9-12].

Благодаря такому строению ММ обладают высокими адсорбционными характеристиками, повысить которые, а также придать новые свойства возможно путем интеркалирования в межслоевое пространство ММ различных катионов неорганического происхождения. Введение дополнительного элемента в структуру повышает сорбционную активность природных минералов и придает им новые функциональные свойства. Так, обогащение бентонита оксидом титана ( $TiO_2$ ) придает ему фотоактивность, что позволит не только эффективно сорбировать краситель, но и активировать его разрушение под действием инсоляции.

Ранее были проведены исследования по созданию композиционного материала, включающего волокнистый материал в качестве основы, на которой закрепляется минеральный сорбент: натуральный бентонит (НБ) и обогащенный  $TiO_2$  (МБ) [13-15]. Доказано, что частицы алюмосиликата достаточно прочно фиксируются на волокнах различной химической природы – натуральных и синтетических, равномерно распределяясь по их поверхности. Предварительные исследования показали, что наиболее высокие сорбирующие свойства по отношению к синтетическим красителям НБ и МБ проявляют в сочетании с натуральными волокнами, такими, как шерсть или хлопок. Также неплохие результаты были получены с полиакрилонитрильным волокном, которое без присутствия алюмосиликатов обладает крайне низкой сорбционной способностью.

Настоящая работа продолжает эти исследования и направлена на углубленное изучение сорбционных свойств композиционных материалов, полученных при иммобилизации частиц монтмориллонита на поверхности волокнистого полимера, а также их возможного самоочищения от сорбата под действием ультрафиолета.

#### *Методы исследования*

В качестве основы композиционного сорбента использовались волокнистые материалы различной химической природы: хлопчатобумажное волокно (Хл), прошедшее обработку в виде щелочной отварки

для придания ему гидрофильных свойств, и полиакрилонитрил (ПАН). На волокно из водной дисперсии наносили природный бентонит – минерал светлого цвета с брутто-формулой  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot NaO \cdot nH_2O$  и монтмориллонит, искусственно обогащенный  $TiO_2$  методом гидротермально активированной интеркаляции гидроксокомплексов титана [16].

Модификация волокнистого материала алюмосиликатами производилась из водной дисперсии при постоянном перемешивании в течение 20 мин.

Содержание алюмосиликатов на волокне контролировали гравиметрическим методом путем взвешивания предварительно высушенного до постоянной массы материала на аналитических весах OHAUS Pioneer PR224 с точностью до 0,0001 г.

Для определения сорбционной активности полученных композиционных материалов произвели расчет их статической обменной емкости (СОЕ). Для этого использовалась методика, разработанная в НИИ Минерального сырья [17]. Для расчета использована формула:

$$COE = \frac{(C_{исх.} - C_{равн.})V}{g}, \quad (1)$$

где  $g$  – масса сухого сорбента, г;  $V$  – объем раствора красителя, л;  $C_{исх.}$  – исходная концентрация красителя, мг/л;  $C_{равн.}$  – равновесная (остаточная) концентрация красителя в растворе после перемешивания с сорбентом в течение времени  $t$ , мг/л.

Сорбция осуществляется путем интенсивного перемешивания раствора модельного красителя метиленового синего с концентрацией 0,1 г/л, который традиционно применяется в подобных исследованиях, с композитом в условиях термостатирования при температуре 20-25 °С в течение времени, необходимого для достижения равновесной сорбции [18]. Изменение оптической плотности испытуемого раствора оценивали каждые 5 мин на приборе КФК-3-30МЗ. В качестве раствора сравнения использовали дистиллированную воду.

Для расчета степени удаления красителя  $E$  использовали формулу:

$$E = \frac{C_{исх.} - C_{равн.}}{C_{исх.}} \cdot 100. \quad (2)$$

Для оценки скорости фоторазложения красителя проведены исследования с применением лампы UVB-313 с диапазоном УФ-излучения 313 нм. Навески волокна массой 1 г, исходные и модифицированные, окрашенные красителем метиленовым синим, в виде ковриков размерами 5\*10 см облучали в интервале от 0 до 24 часов с шагом в 4 часа.

Интенсивность окрашивания композиционного материала и его обесцвечивание под действием УФ-излучения контролировали по величине коэффициента отражения на спектрофотометре модели YS 3010 при длине волны  $\lambda=610$  нм с последующим расчетом  $K/S$  с применением теории Кубелки-Мунка, описывающей взаимосвязь явлений поглощения, отражения и рассеяния света [19]. Расчет проводился по формуле:

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R}, \quad (3)$$

где  $R$  – коэффициент диффузного рассеяния света;  $K$  – коэффициент поглощения света;  $S$  – коэффициент рассеяния света.

#### Результаты и обсуждение

Выбор для исследования хлопчатобумажного и полиакрилонитрильного волокна обусловлен высокой сорбционной активностью этих волокон по отношению к частицам алюмосиликатов [14].

В табл. 1 приведены данные о размерах частиц используемых в работе НБ и МБ и количественном содержании их на волокне.

Таблица 1

Параметры		НБ	МБ
Размер частиц, мкм		0,75*/0,28**	0,25/0,20
Содержание на волокне, масс. %	Хлопок	5,5	8,5
	ПАН	1,7	2,0

В первые минуты обработки частицы природного бентонита имеют больший размер, чем пилларированного. Однако при активном перемешивании изначально более крупные частицы НБ диспергируют-

ся и их величина практически сравнивается с МБ.

Масса волокна после обработки дисперсией алюмосиликатов в большей степени меняется у хлопка. Известно, что и природный бентонит, и хлопчатобумажное волокно приобретают в воде отрицательный заряд, поэтому двойной электрический слой мешает иммобилизации НМ на его поверхности. Но поскольку в работе использовано натуральное хлопковое волокно низкого сорта, имеющее высокую степень дефектности структуры, в его микропорах и микротрещинах происходит фиксация большинства частиц НМ. В случае с МБ заряд алюмосиликата скомпенсирован, что позволяет минералу равномерно распределяться по всей поверхности волокна. Подробно этот момент разбирается авторами в статьях [14, 15].

ПАН приобретает в воде положительный заряд, однако, являясь синтетическим волокном, практически не имеет дефектов, количество закрепленных частиц как природного, так и модифицированного бентонитов на нем примерно одинаково [14, 15].

О сорбционных способностях исходных и модифицированных алюмосиликатами волокон судили по степени поглощения красителя из раствора в зависимости от времени контакта с адсорбентом при активном перемешивании.

На рис. 1 и 2 приведено изменение концентрации растворов красителя метиленового синего (0,1 г/л) при контакте с волокнистыми материалами.

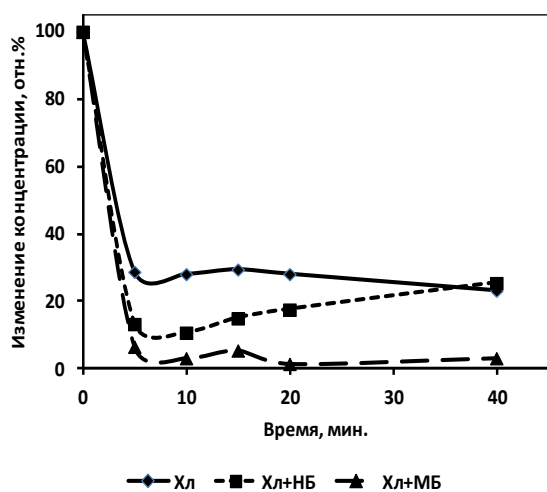


Рис. 1

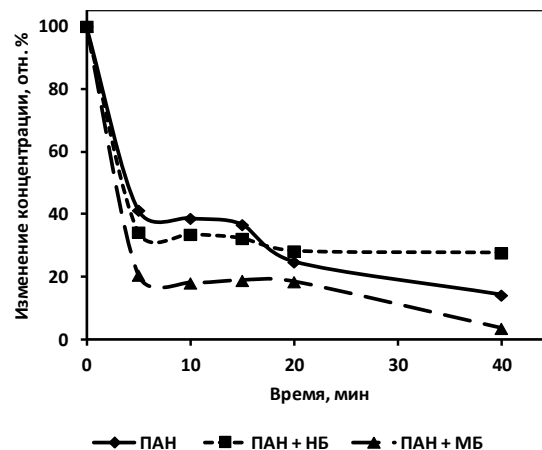


Рис. 2

Из представленных рисунков видно, что присутствие на волокне как НБ, так и МБ заметно повышает сорбционные свойства волокон, особенно в первые минуты процесса: за 5-10 мин пребывания модифицированного волокна в растворе им извлекается на 20-30 % больше красителя, чем «чистым» материалом. Наиболее высокую сорбционную активность при этом проявляют композиции волокно+МБ, что подтверждают данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Волокно	СОЕ, мг/г		
	исходное	модифицированное	
		НБ	МБ
Хлопок	0,23	0,52	0,85
ПАН	0,12	0,34	0,76

Сорбционная емкость по отношению к метиленовому синему хлопкового волокна в сочетании с МБ возрастает при формировании в дефектах структуры волокнообразующего полимера дополнительного объема за счет присутствия пилярного материала. Создается своеобразный синергетический эффект.

Кроме того, увеличение по сравнению с НБ содержания в МБ наноразмерного оксида титана (TiO<sub>2</sub>) в форме пиляров, представляющих собой смесь фаз анатаза и рутила, придает композиционному материалу возможность самоочищения от поглощенного красителя под действием инсоляции или направленного УФ-излучения.

В качестве примера на рис. 3 представлены данные по выцветанию волокон

хлопка после максимально возможного поглощения красителей. Аналогичные результаты получены и для ПАН-волокна.

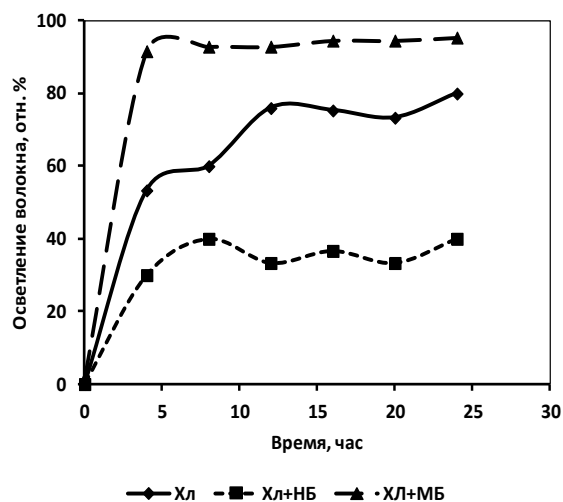


Рис. 3

Под действием УФ-излучения нанесенные на волокно красители разрушаются — интенсивность окраски снижается на 30–60%. При этом наибольшее снижение происходит в присутствии на волокне МБ, который активно проявляет свойства фотоактиватора. В отличие от  $TiO_2$ -обогащенного монтмориллонита, НБ, напротив, проявляет протекторные свойства и замедляет деструкцию поглощенных волокном красителей. Вероятнее всего, такой эффект связан с существенным различием в поглощательной способности УФ-излучения НБ и МБ [14, 15]. Отражательная способность НБ снижает интенсивность воздействия квантов света на поверхность волокна, особенно в местах неровностей его структуры, где в основном иммобилизованы частицы. В отличие от НБ,  $TiO_2$ -пилларированный монтмориллонит, находясь в форме наноразмерного оксида, под действием УФ-излучения в сочетании с кислородом воздуха генерирует на поверхности волокнистого материала электронно-дырочные пары, способствующие возникновению активных радикалов, которые оказывают деструктивное воздействие на органические молекулы, обесцвечивая сорбированный краситель [20].

## ВЫВОДЫ

Исследование показало, что модификация поверхности натурального или синтетического волокнистого материала частицами натурального или обогащенного оксидом титана монтмориллонита позволяет получать ряд востребованных технологических эффектов. К ним относятся повышение сорбционной активности волокон по отношению к синтетическим красителям, протекторные свойства по отношению к действию УФ-излучения и самоочищающие свойства материала. При этом если сорбционные показатели волокнистых материалов возрастают при фиксации на их поверхности как НБ, так и МБ (с  $TiO_2$ -пилларированным монтмориллоном в большей степени), то защита от УФ-излучения или активация фотодеструкции под его воздействием зависит от того, какой вид алюмосиликата используется — нативный или пилларированный.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лунатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. 304 с.
2. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды. М.: Химия, 1989. 512 с.
3. Яковлев С.В. Очистка производственных сточных вод. М.: Стройиздат, 1985. 335 с.
4. Кондратюк Е.В., Комарова Л.Ф. Перспективы создания волокнистых сорбционно-ионообменных материалов на основе природного минерального сырья // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2009. Т. 52. Вып. 2. С. 134...137.
5. McClellan, A.L., Hamsberger H.F. Cross-sectional areas of molecules adsorbed on solid surfaces // J. Colloid Interface SCL. 1962. V. 23. P. 577...599.
6. Барнабишвили, Д.Н., Цицишвили Г.В., Годдзе Н.И. Поверхностные явления на алюмосиликатах. Тбилиси: Мецниереба, 1965. 81 с.
7. Farkas A.I. Dekany Interlamellar adsorption of organic pollutants in hydrophobic montmorillonite // Colloid Polymer Sci., 2001, V. 279. P.459.
8. Kuschel B., Gille W. Schweiger W. Analysis of the morphology of hectorite by use of small-angle Xray scattering // Colloid Polym Sci. 2000. V. 278. P. 805...809.
9. Пуцаровский Д.Ю. Структурная минералогия силикатов // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 3. С. 83...91.

10. Уорелл У. Глины и керамическое сырье: [пер. с англ.]; под ред. В.П. Петрова. М.: Мир, 1978. 236 с.

11. Evtukhov S.A., Berezyuk V.G. Sorption properties of natural aluminosilicates (clay, loam, sandy loam, zeolite) // Russian Journal of Applied Chemistry. 2003. Т. 76, № 9. С. 1414...1417.

12. Злочевская Р.И., Зиангиров Р.С., Сергеев Е.М., Рыбачук А.Н. Исследование свойств связанной воды и двойного электрического слоя системы «глины – раствор» // Связанная вода в дисперсных системах. 1970. Вып. 1. С. 102...138.

13. Быков Ф.А., Наливаева А.М., Владимирцева Е.Л. Модификация волокон бентонитовыми глинами // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2021. № 3. С. 82...86.

14. Бутман М.Ф., Овчинников Н.Л., Владимирцева Е.Л., Быков Ф.А. Композиционные материалы на основе волокнистых полимеров и бентонита, модифицированного оксидом титана // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6 (396). С. 167...173.

15. Овчинников Н.Л., Владимирцева Е.Л., Быков Ф.А., Изюмова О.С., Бутман М.Ф. Получение самоочищающихся композитов шерстяное волокно – TiO<sub>2</sub>-пилларный монтмориллонит с УФ-протектными свойствами // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2023. Т. 59, № 3. С. 298...304.

16. Butman M.F., Ovchinnikov N.L., Karasev N.S., Kochkina N.E., Agafonov A.V., Vinogradov A.V. Photocatalytic and adsorption properties of TiO<sub>2</sub>-pillared montmorillonite obtained by hydrothermally activated intercalation of titanium polyhydroxocomplexes // Beilstein J. Nanotechnol. 2018. V.9. P. 364...378. – doi: 10.3762/bjnano.9.36

17. СТО РосГео 08-002-98. Технологические методы исследования минерального сырья.

18. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. Киев: Наукова думка, 1983. 208 с.

19. Кричевский Г.Е. Методы исследования в текстильной химии: справочник. М.: Легпромбыт-издат, 1993. 401 с.

20. Mills A., Hunte S.L. An overview of semiconductor photocatalysis // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 1997. V.108. №1. P. 1-35.

## REFERENCES

1. Lipatov Yu.S. Physical chemistry of filled polymers. M.: Chemistry, 1977. 304 s.

2. Rodionov A.I., Klushin V.N., Toroshnikov N.S. Environmental protection technique. M.: Chemistry, 1989. 512 p.

3. Yakovlev S.V. Purification of industrial wastewater. M.: Stroyizdat, 1985. 335 p.

4. Kondratyuk E.V., Komarova L.F. Prospects for the creation of fibrous sorbent-ion-exchange materials

based on natural mineral raw materials // Izvestia vuzov. Chemistry and Chemical Technology, 2009. Vol. 52, Issue 2, pp. 134...137.

5. McClellan, A.L., Hamsberger H.F. Cross-sectional areas of molecules adsorbed on solid surfaces // J. Colloid Interface SCL. 1962. V. 23. P. 577...599.

6. Barnabikhvili D.H., Hijikhvili G.V., Gogodze N.I. Surface phenomena on aluminosilicates. Tbilisi: Metzniere-ba, 1965. 81 p.

7. Farkas A.I. Dekani Interlayer adsorption of organic pollutants in hydrophobic montmorillonite // Science of colloidal polymers, 2001, vol. 279, p. 459.

8. Kuschel B., Gille W. Schweiger W. Analysis of hectorite morphology using small-angle X-ray scattering // Colloidal polymerization. 2000. Vol. 278. P. 805...809.

9. Pushcharovsky D.Yu. Structural mineralogy of silicates // Sorosovsky Educational Journal. 1998. No. 3. P. 83...91.

10. Worell U. Clay and ceramic raw materials: trans. from eng.; edited by V.P. Petrov. M.: Mir, 1978. 236 p.

11. Evtukhov S.A., Berezyuk V.G. Sorption properties of natural aluminosilicates (clay, loam, sandy loam, zeolite) // Russian Journal of Applied Chemistry. 2003. Vol. 76, No. 9. P. 1414...1417.

12. Zlochevskaya R.I., Zianguirov R.S., Sergeev E.M., Rybachuk A.N. Investigation of the properties of bound water and a double electric layer of the "clay-solution" system // Bound water in dispersed systems. 1970. Issue 1. Pp. 102...138.

13. Bykov F.A., Nalivaeva A.M., Vladimirtseva E.L. Modification of fibers by bentonite clays // Bulletin of Young Scientists of the St. Petersburg State University of Technology and Medicine. 2021. No. 3. pp. 82...86.

14. Butman M.F., Ovchinnikov N.L., Vladimirtseva E.L., Bykov F.A. Composite materials based on fibrous polymers and bentonite modified with titanium oxide // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 6 (396). P. 167...173.

15. Ovchinnikov N.L., Vladimirtseva E.L., Bykov F.A., Izyumova O.S., Butman M.F. Obtaining self-cleaning composites wool fiber - TiO<sub>2</sub>-pillar montmorillonite with UV-protective properties // Physicochemistry of the surface and protection of materials. 2023. Vol. 59, No. 3. Pp. 298...304.

16. Butman M.F., Ovchinnikov N.L., Karasev N.S., Kochkina N.E., Agafonov A.V., Vinogradov A.V. Photocatalytic and adsorption properties of columnar montmorillonite TiO<sub>2</sub> obtained by hydrothermally activated intercalation of titanium polyhydroxocomplexes // Beilstein J. Nanotechnol. 2018. V.9. pp. 364...378. – doi: 10.3762/bjnano.9.36

17. СТО РосГео 08-002-98. Технологические методы исследования минерального сырья.

18. Тарасевич Ю. И. Natural sorbents in water purification processes. Kiev: Naukova dumka, 1983. 208 p.



19. Krichevsky G.E. Research methods in textile chemistry: Handbook under.ed. M.: Legprombytizdat, 1993. 401 p.

20. Mills A., Hunt S. L. Review of semiconductor photocatalysis // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 1997. Vol.108. No. 1. pp. 1...35

Рекомендована кафедрой химической технологии волокнистых материалов Ивановского государственного химико-технологического университета. Поступила 29.06.23.

УДК 678.555

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_129

## **РАСТВОРЫ АГАРА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА УПАКОВОЧНЫХ БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ТЭКСТИЛЬНЫХ И КОЖАНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

### **AGAR SOLUTIONS FOR IMPROVING THE QUALITY OF PACKAGING PAPER MATERIALS, TEXTILES AND LEATHER PRODUCTS**

*И.И. ОСОВСКАЯ, А.Е. БАРАНОВА*

*I.I. OSOVSKAYA, A.E. BARANOVA*

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна  
Высшая школа технологии и энергетики)

(St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design  
Graduate School of Technology and Energy)

E-mail: iraosov@mail.ru

*На основе физико-химических свойств агара из красных морских водорослей разработан способ создания новых покрытий для улучшения блеска ткани, проявления рисунка кожи с целью повышения качества изделий текстильной и кожевенной промышленности. Создан эффективный и экологически безопасный метод повышения жиростойкости упаковочных материалов на основе целлюлозы для уменьшения барьерных свойств.*

*Based on the physicochemical properties of red seaweed agar, a method for creating new coatings to improve the lustre of fabric, the development of leather pattern in order to improve the quality of textile and leather products has been developed. An effective and environmentally friendly method for increasing the fat resistance of cellulose-based packaging materials to reduce barrier properties has been developed.*

**Ключевые слова:** красные водоросли, агар-агар, новые покрытия, упаковочные материалы, жиростойкость, блеск ткани и кожи.

**Keywords:** red algae, agar-agar, new coatings, packaging materials, fat resistance, lustre of fabric and leather.

Красные морские водоросли – важное сырье для получения агар-агара – природного гелеобразующего вещества, загустителя и стабилизатора [1-3]. Агар – высушенный, аморфный, желатиноподобный, неазотистый экстракт из красных морских водорослей, представляющий собой смесь двух компонентов: линейного полисахарида агарозы и гетерогенной смеси более мелких молекул агаропектина. Основная повторяющаяся единица агара состоит из чередующихся 1,3-связанных -D-галактопиранозы и 1,4-связанных 3,6-ангидро- -L-галактопиранозы [4].

Агар широко применяется в медицине, является источником энергии, используется в средствах против воспалений, в качестве асептической повязки, перевязочных и гидрогелевых покрытий для лечения ожоговых ран [5]. В фармакологии применяется для капсулирования лекарственных препаратов. В химии и биохимии используется в качестве специального носителя для гель-хроматографии и гелевого электрофореза [6, 7].

Целью данной работы является повышение качества упаковочных материалов, текстильных и кожаных изделий на основе растворов агара из красных морских водорослей семейства *Porphyra*.

На основании исследований вязкости и гелеобразующей способности агара в широком диапазоне концентраций выбран однопроцентный раствор, обеспечивающий устойчивое гелеобразование для получения пленок [8-10]. В работе получена зависимость растворимости пленки в  $H_2O$  от температуры (рис. 1).

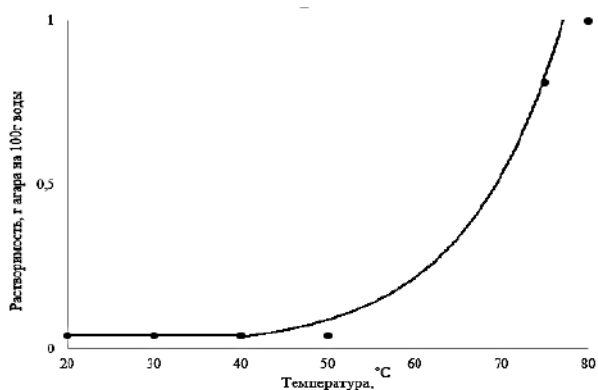


Рис. 1

Как видно из рис. 1, пленка агара не растворяется в  $H_2O$  при нагревании до  $50^{\circ}C$ . На рис. 2 представлена зависимость растворимости пленки агара от времени при различных температурах.

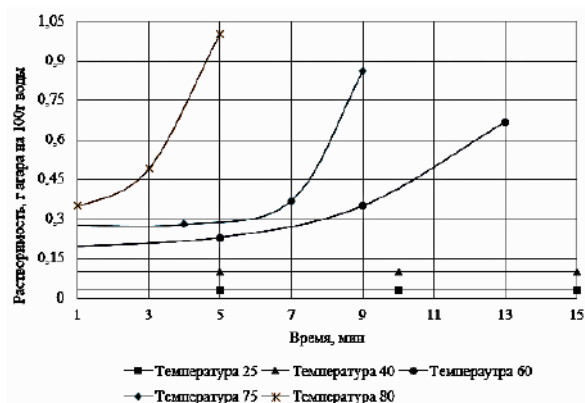


Рис. 2

Как видно из рис. 2, полное растворение пленки происходит при  $80^{\circ}C$  в течение 5 минут. В интервале температур  $60-80^{\circ}C$  наблюдается частичное растворение пленки; при температуре менее  $60^{\circ}C$  растворения не происходит.

Нерастворимость пленки агара до  $50^{\circ}C$  может быть использована при нанесении раствора агара на тканевую поверхность. Для покрытия раствор агара наносили форсунками распылителя типа V-110-5 на поверхность образца площадью  $40 \times 60$  мм с углом наклона при распылении  $90^{\circ}$ , сухой обработанной поверхности при температуре  $25^{\circ}C$  в течение 60 мин до влажности 5-7 масс. %. Для изучения воздействия растворов агара в качестве покрытий материалов измеряли блеск ткани на фотоблескомере ВУК-60 согласно ГОСТ 31975-2017. Принцип определения блеска основан на измерении направленно отраженного пучка света. Интенсивность этого пучка света измеряют в определенном угловом поле. Измеренный блеск покрытия составил 77%, без покрытия 53%. Причем замачивание обработанной ткани в воде не приводит к изменениям свойств.

При обработке поверхности кожи происходит увеличение яркости и проявление рисунка. Влияние раствора агара, нанесенного на поверхность бумаги для измерения жиростойкости, определяли путем уста-

новления отталкивающей способности поверхности и капиллярных свойств бумаги, измеряли в баллах Кита согласно ГОСТ ISO 16532-2-2016. Показано увеличение жиростойкости бумаги с 3 баллов для необработанной бумаги до 9 баллов для бумаги, обработанной 1.0%-ным раствором агара.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследований, полученные в работе, позволяют рекомендовать к использованию растворы агара для улучшения качества тканевых и кожаных материалов с целью повышения потребительских и эксплуатационных свойств изделий. Показана перспектива использования раствора агара в целлюлозно-бумажной промышленности для повышения жиростойкости упаковочных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Боголицын К.Г., Каплицин П.А., Кашина Е.М. и др. Особенности минерального состава бурых водорослей Белого и Баренцева морей // Химия растительного сырья. 2014. № 1. С. 243...250. – DOI: 10.14258/jcprm.1401243.
2. Паршина А.Э., Боголицын К.Г., Добродеева Л.К., Дружинина А.С. Антибактериальная активность полифенолов бурых водорослей и их биологическая активность на клеточном уровне // Актуальные вопросы органической химии и биотехнологии. Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2020. С. 622...623.
3. Подкорытова А.В., Роцина А.Н. Морские бурые водоросли – перспективный источник БАВ для медицинского, фармацевтического и пищевого применения // Труды ВНИРО. 2021. Т. 186. С. 156...172. – DOI: 10.36038/2307-3497-2021-4-156-172.
4. Stanley N. F. Agar. Food polysaccharides and their use // CRC Press, Boca Raton, FL. 2006. С. 186...204.
5. Кузнецова Т.А., Беседнова Н.Н., Усов В.А. Биосовместимые и биodeградируемые раневые покрытия на основе полисахаридов из морских водорослей // Вестник хирургии им. И.И. Грекова, 2020. Т. 179. №4. С.109...115. – DOI: 10.24884/0042-4625-2020-179-4-109-115.
6. Surender Reddy K, Abraham A, Berihu A, Biniam T., Ghebremedhin H., Teklehaimanot B., Reddy K.S. (2018) Extraction of Agar and Alginate from Marine Seaweeds in Red Sea Region. Int J Marine Biol Res 3(2): 1-8. – DOI: 10.15226/24754706/3/2/00126

7. Пат. РФ 2568909. Повязка медицинская, способ ее изготовления и применения. Оpubл. 2015.

8. Баранова А.Е., Осовская И.И. Выделение и свойства агар-агара из красных морских водорослей // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2022. Серия 1, № 3. С.100...104. – DOI: 10.46418/2079-8199\_2022\_3\_17

9. Осовская И.И., Баранова А.Е. Оптимизация условий образования стойкого геля из агар-агара // Химия растительного сырья. 2023. №2. С. 71...78. – DOI: 10.14258/jcprm.20230211723.

10. Шулунов Б.П., Маркин В.И., Контев В.И. Особенности реологии растворов агар-агара // Химия растительного сырья. 2018. No1. С. 53–60. – DOI: 10.14258/jcprm.2018013720

## REFERENCES

1. Bogolitsyn K.G., Kaplitsyn P.A., Kashina E.M., et al. Features of the mineral composition of brown algae of the white and Barents Seas // Chemistry of plant raw materials, 2014. № 1. P. 243-250. – DOI: 10.14258/jcprm.1401243.
2. Parshina A.E., Bogolitsyn K.G., Dobrodeeva L.K., Druzhinina A.S. Antibacterial activity of borax-algae polyphenols and their biological activity at the cellular level // Topical issues of organic chemistry and biotechnology. Ekaterinburg: AMB Publishing House, 2020. P. 622...623.
3. Podkorytova A.V., Roshchina A.N. Brown seaweed is a promising source of biologically active substances for medical, pharmaceutical and food use. Proceedings of VNIRO. 2021. T. 186. S. 156...172. – DOI: 10.36038/2307-3497-2021-4-156-172.
4. Stanley N. F. Agar. Food polysaccharides and their use // CRC Press, Boca Raton, FL. 2006. S. 186...204.
5. Kuznetsova T.A., Besednova N.N., Usov V.A. Biocompatible and biodegradable wound coatings based on polysaccharides from seaweed. // Bulletin of surgery named after I.I. Grekov, 2020. T. 179. No. 4. P.109...115. – DOI: 10.24884/0042-4625-2020-179-4-109-115.
6. Surender Reddy K, Abraham A, Berihu A, Biniam T., Ghebremedhin H., Teklehaimanot B., Reddy K.S. (2018) Extraction of Agar and Alginate from Marine Seaweeds in Red Sea Region. Int J Marine Biol Res 3(2): 1-8. – DOI: 10.15226/24754706/3/2/00126.
7. Pat. RF 2568909 (publ.2015). Medical bandage, the method of its manufacture and application.
8. Baranova A.E., Osovskaya I.I. Isolation and properties of agar-agar from red seaweed // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. 2022. Series 1, No. 3. P.100...104. – DOI: 10.46418/2079-8199\_2022\_3\_17.
9. Osovskaya I.I., Baranova A.E. Optimization of conditions for the formation of a stable gel from agar-agar // Chemistry of plant raw materials. 2023. №2. P. 71...78. – DOI: 10.14258/jcprm.20230211723.

10. Shipunov B.P., Markin V.I., Koptev V.I.  
Features of rheology of agar-agar solutions //  
Chemistry of plant raw materials, 2018. No1.  
P. 53...60. – DOI: 10.14258/jcprm.2018013720.

Рекомендована оргкомитетом XIX Междуна-  
родной научно-практической конференции «Новые  
полимерные композиционные материалы». Посту-  
пила 29.09.23.

УДК 677.027.254.13: 620.30  
DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_132

## МОДИФИКАЦИЯ НАТУРАЛЬНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

### MODIFICATION OF NATURE TEXTILE MATERIALS WITH BIMETALLIC NANOPARTICLES AND THEIR PRACTICAL APPLICATION

*Е.В. КУДРЯВЦЕВА<sup>1</sup>, А.А. БУРИНСКАЯ<sup>1</sup>, П.А. ИЛЬИНА<sup>2</sup>, Э.Л. АКИМ<sup>1</sup>, А.А. ТАРАЗАНОВ<sup>3</sup>*  
*E.V. KUDRIAVTSEVA<sup>1</sup>, A.A. BURINSKAYA<sup>1</sup>, P.A. ILYINA<sup>2</sup>, E.L. AKIM<sup>1</sup>, A.A. TARAZANOV<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных  
технологий и дизайна,

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера,  
<sup>3</sup>ООО «Проммонтажсервис НТ»)

(<sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,

<sup>2</sup>Saint-Petersburg Pasteur Institute,

<sup>3</sup>LTD “Prommontajservis”)

E-mail: ekaterina.kudr@bk.ru

*В статье представлены результаты процесса модификации текстильных материалов натурального происхождения путем синтеза бикомпонентных наночастиц медь-серебро для придания им антимикробных свойств. В процессе модификации материалы приобретают окраску, что позволяет исключить операцию крашения. Подтверждено вирулицидное действие модифицированных субстратов в отношении вирусов гриппа А и Коксаки В3, фунгицидное действие на штамм *P. chrysogenum*, бактерицидное действие в отношении штаммов, вызывающих нозокомиальные инфекции: *E. coli*, *S. aureus*, *A. baumannii*, *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae*, *E. Faecalis*.*

*The article presents the results of the process of modifying textile materials of natural origin by synthesizing bicomponent copper-silver nanoparticles to possess antimicrobial properties. In the process of modification, the materials acquire color, which makes it possible to exclude the dyeing operation. The virucidal effect of the modified substrates against influenza A and Coxsackie B3 viruses, the fungicidal effect on the *P. chrysogenum* strain, the bactericidal effect on strains that cause nosocomial infections were confirmed: *E. coli*, *S. aureus*, *A. baumannii*, *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae*, *E. Faecalis*.*

**Ключевые слова:** биметаллические наночастицы, медь, серебро, целлюлоза, шерсть, бактерицидное действие, вирулицидные свойства.

**Keywords: bimetallic nanoparticles, copper, silver, cellulose, wool, bactericidal effect, virucidal properties.**

Развитие резистентности микроорганизмов к существующим антимикробным препаратам является глобальной проблемой для здоровья человека. Это подчеркивает необходимость поиска более сильных действующих препаратов. Широкое применение антибиотиков приводит к возникновению новых резистентных к ним штаммов бактерий, что еще больше усугубляет обозначенную проблему. Как следствие, такие бактерии, как *Streptococcus pneumoniae*, *Streptococcus pyogenes*, *Staphylococci* и *S. aureus*, а также некоторые представители семейств *Pseudomonas* и *Enterobacteriaceae*, в настоящее время устойчивы почти ко всем обычным антибиотикам [1].

Натуральные текстильные материалы являются благоприятной питательной средой для развития и роста бактерий, вирусов и плесневых грибов. Таким образом, актуальной задачей является модификация текстильных материалов с целью придания им антимикробных свойств.

Наночастицы металлов и их оксидов (серебро, медь и др.) обладают более широкими антимикробными свойствами [1–4] по сравнению с обычными препаратами, спектр действия которых распространяется в среднем на 5–10 видов, и применяются для обработки текстильных материалов в виде готовых дисперсий [5–8]. Однако такой способ нанесения наночастиц не обеспечивает прочного их закрепления в субстрате и высокую устойчивость к физико-химическим воздействиям. Кроме того, коммерческое распространение препаратов, содержащих наночастицы серебра, привело к возникновению резистентных к серебру штаммов микроорганизмов, например микобактерии *Agr-1* [9]. Биметаллические наночастицы, например медь-серебро, способны уничтожать резистентные к серебру штаммы.

Нами проведены исследования процесса модификации текстильных материалов натурального происхождения (хлопчатобумажные и шерстяные) путем синтеза в

их структуре и на поверхности бикомпонентных наночастиц медь-серебро для придания им бактерицидных, фунгицидных и вирулицидных свойств. Использован метод восстановления катионов металлов из растворов их солей – пентагидрата сульфата меди  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и нитрата серебра  $\text{AgNO}_3$  с концентрациями в диапазоне 0,0001–0,001 М – без использования восстановителей за счет разности окислительных потенциалов ( $E_0$ ) пар  $\text{Ag}^+/\text{Ag}^0$  и  $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^0$  и взаимодействия с функциональными группами текстильного материала, которые имеют восстановительный характер.

Ранее проведенными исследованиями доказано образование химических связей в дополнение к физическим при взаимодействии катионов металлов с функциональными группами субстрата ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{CO}-\text{NH}-$ ,  $-\text{S}-\text{S}-$ ), выступающими в качестве восстановителя для металлических наночастиц, что подтверждено ИК-Фурье и КР спектрами и испытаниями на устойчивость модификации к физико-химическим воздействиям по ГОСТ [10–12].

Вследствие модификации материалы приобретают цвет от золотисто-желтого до темно-коричневого в зависимости от условий синтеза, что позволяет исключить операцию крашения и таким образом снизить нагрузку на окружающую среду. Спектры отражения модифицированных образцов, зафиксированные с помощью спектрофотометров *ShimadzuUV-2401 PC* (Япония) и *GretagMacbeth* (Швейцария), показали минимумы коэффициента отражения в диапазоне длин волн 410–420 нм, что коррелирует с полосой поверхностного плазмонного резонанса нульвалентного серебра. Это свидетельствует о том, что в структуре и на поверхности материала формируются наночастицы, содержащие ядро из меди и оболочку из серебра.

Размер синтезированных наночастиц определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа фирмы *JEOL JSM-6390 LA* (Япония). На рис. 1 пред-

ставлена микрофотография хлопчатобумажной ткани, модифицированной наночастицами Cu-Ag, при суммарной концентрации прекурсоров 0,0009 М. Размеры образовавшихся наночастиц зафиксированы в диапазоне до 100 нм.

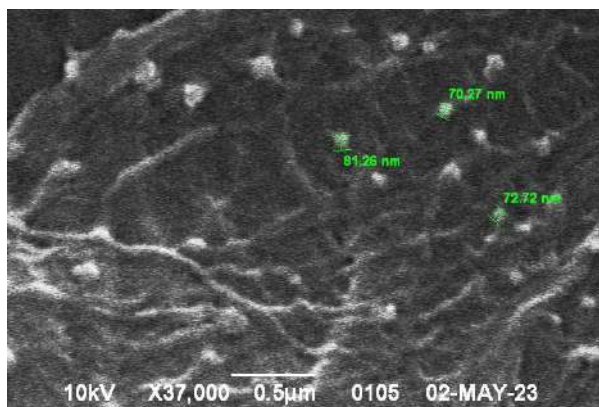


Рис. 1

На рис. 2 представлены результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии модифицированной хлопчатобумажной ткани, полученные с использованием полевого эмиссионного сканирующего электронного микроскопа *HitachiS-4700* (Япония).

Представленные данные подтверждают образование на поверхности хлопчатобумажной ткани биметаллических наночастиц медь-серебро. Причем интенсивность пиков, характеризующих нульвалентное серебро, во много раз больше по сравнению с пиками, относящимися к нульвалентной меди. Это подтверждает образование наночастиц с оболочкой из серебра.

Ранее проведенными исследованиями подтверждена устойчивость модифицированных полимерных материалов к микробиологическому разрушению, воздействию плесневых грибов *P. chrysogenum*, их высокое бактерицидное действие в отношении штаммов *S. Aureus* и *E. coli*, а также штаммов, вызывающих нозокомальные инфекции (*E. coli*, *S. aureus*, *A. baumannii*, *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae*, *E. Faecalis*). После 25 стирок в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6330-99 бактерицидная активность сохранилась [10–12].

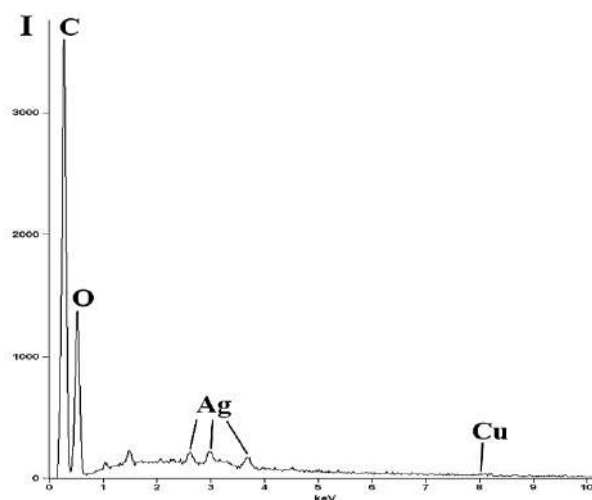


Рис. 2

Исследования вирулицидных свойств модифицированных образцов в отношении вируса гриппа А и вируса Коксаки В3 (табл. 1) проводились в Санкт-Петербургском НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера.

Т а б л и ц а 1

Образец	Инфекционный титр вируса (lg TCID <sub>50</sub> /0.2 мл) после инкубации с образцами хлопчатобумажной ткани		
	Контроль вируса	12 ч	24 ч
<b>Вирус гриппа A/Puerto Rico/8/34 (H1N1)</b>			
Без модификации	3,7±0,6	2,3±0,6 (p = 0.0474)	2,3±0,6 (p=0.1835)
Модификация НЧ Cu-Ag0,003 М		1,7±0,6 (p=0.0132)	1,0±0,0 (p<0.0001)
Модификация НЧ Cu-Ag0,0009 М		2,0±0,0 (p=0.0377)	1,3±0,6 (p=0.0377)
Модификация НЧ Ag0,002 М		2,3±0,6 (p=0.0474)	1,0±0,0 (p<0.0001)
<b>Вирус Коксаки В3</b>			
Без модификации	3,7±0,6	4,0±0,0 (p=0.4226)	3,0±0,0 (p=0.4226)
Модификация НЧ Cu-Ag0,003 М		0,3±0,6 (p=0.0021)	0,0±0,0 (p=0.0099)
Модификация НЧ Cu-Ag0,0009 М		0,0±0,0 (p=0.0082)	0,0±0,0 (p=0.0099)
Модификация НЧ Ag0,002 М		0,3±0,6 (p=0.0021)	0,0±0,0 (p=0.0099)

Вирус гриппа А культивировали в клетках *MDCK*, вирус Коксаки В3 – в клетках *Vero*. Клетки рассеивали в 96-луночные планшеты в количестве  $10^4$  кл./лунку и объеме 100 мкл/лунку полной среды *MEM*. Инкубацию проводили в течение суток в  $\text{CO}_2$ -инкубаторе при  $36^\circ\text{C}$  в 5% атмосфере  $\text{CO}_2$ . Непосредственно перед экспериментом клетки промывали средой *MEM*, дальнейшие манипуляции проводили в бессывороточной среде.

Образцы ткани размером  $1 \times 1$  см помещали в лунки 6-луночного планшета, куда затем вносили 1 мл вирусосодержащей жидкости. Планшет закрывали и инкубировали при  $36^\circ\text{C}$  в течение 12 или 24 ч. По истечении этого срока в вирусосодержащей жидкости определяли инфекционную активность вируса, как описано ниже. В каждой группе образцов использовали три параллели.

Из исследуемой вирусосодержащей жидкости готовили серию 10-кратных разведений ( $10^{-1}$ – $10^{-7}$ ) на среде *MEM*. Этими разведениями заражали клетки соответствующей линии и инкубировали в термостате в течение 72 часов. По окончании срока инкубации визуально оценивали проявление вирусоспецифического цитопатогенного действия (ЦПД) в клетках. За титр вируса принимали величину наибольшего разведения вируса, способного вызвать ЦПД. Титр выражали в логарифмах 50% инфекционной дозы вируса ( $\lg\text{TCID}_{50}$ ).

Как видно из представленных результатов, инкубация обоих вирусов с контрольными образцами ткани не приводила к достоверной потере инфекционной активности вируса. В то же время инкубация с об-

разцами ткани, модифицированной наночастицами, во всех случаях достоверно снижала инфекционную активность вирусов. При этом степень инактивации прямо зависела от времени инкубации. Вирус Коксаки В3 был более чувствителен к инактивирующему действию модифицированных образцов, его инфекционная активность через 24 часа инкубации снизилась до значений ниже порога детекции.

Совместно с ООО «Проммонтажсервис НТ» проведены опытно-производственные испытания технологии получения текстильных материалов, модифицированных биметаллическими наночастицами медь-серебро. В процессе испытаний использовали варочный аппарат “*Digester*” (Австрия), позволяющий поддерживать циркуляцию раствора, заданную температуру и давление. Модуль ванны составлял от 5 до 10.

Модификации подвергали следующие текстильные материалы:

- хлопчатобумажное волокно суровое, степень белизны составляет  $R = 53,45 \%$ ;
- хлопчатобумажную пряжу не отбеленную,  $R = 41,33 \%$ ;
- шерстяную пряжу не отбеленную,  $R = 21,46 \%$ ;
- носки состава: 70 % лен, 15 % крапива, 15 % хлопок,  $R = 43,56 \%$ .

В ходе испытаний опытные образцы приобрели светло-коричневый цвет с минимумом коэффициента отражения, зафиксированным при длине волны  $410 \pm 10$  нм (табл. 2), что подтверждает образование бicomпонентных наночастиц медь-серебро.

Т а б л и ц а 2

$\lambda$ , нм	Шерст. пряжа исх.	Шерст. пряжа с НЧ Cu-Ag	Х/б волокно исх.	Х/б волокно с НЧ Cu-Ag	Х/б пряжа исх.	Х/б пряжа с НЧ Cu-Ag	Носки с НЧ Cu-Ag
380	14,2	3,61	35,2	22,55	26,22	14,59	20,64
390	14,48	3	38,36	23,22	27,86	16,58	22,3
400	15,05	2,63	40,61	23,28	29,34	17,15	23,78
410	15,99	2,61	42,96	23,12	31,33	17,06	25,29
420	17,16	2,78	45,12	23,2	33,32	16,9	24,63
430	18,33	2,98	47,22	23,47	35,27	17,03	28,13
440	19,44	3,2	49,27	24,01	37,24	17,33	28,53
450	20,48	3,43	51,38	24,81	39,25	17,83	28,62
460	21,46	3,71	53,45	25,95	41,33	18,59	28,59
470	22,41	4,05	55,44	27,35	43,42	19,46	28,64
480	23,32	4,45	57,37	28,98	45,49	20,38	28,93

## ВЫВОДЫ

Исследованиями установлено, что при модификации текстильных материалов натурального происхождения путем синтеза бикомпонентных наночастиц Cu-Ag в структуре и на поверхности материала формируются наночастицы, содержащие медное ядро и серебряную оболочку, о чем свидетельствует минимум отражения при длине волны  $\lambda_{\max} = 410\text{--}420$  нм. Размеры образовавшихся наночастиц зафиксированы в диапазоне до 100 нм. Модифицированные материалы приобретают окраску от золотисто-желтой до темно-коричневой, что позволяет исключить операцию крашения и таким образом снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Подтверждено вирулицидное действие образцов модифицированной хлопчатобумажной ткани в отношении вируса гриппа А и вируса Коксаки В3, устойчивость к микробиологическому разрушению, воздействию плесневых грибов *P. chrysogenum*, высокое бактерицидное действие модифицированных материалов в отношении штаммов, вызывающих нозокомиальные инфекции: *E. coli*, *S. aureus*, *A. baumannii*, *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae*, *E. Faecalis*.

Проведена апробация разработанного способа модификации текстильных материалов натурального происхождения совместно с ООО «Промонтажсервис НТ». Модифицированные материалы могут найти применение в производстве большого постельного белья, средств индивидуальной защиты, медицинской одежды, раневых повязок, нижнего белья, чулочно-носочных изделий, спортивной одежды и др.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ali S., Perveen S., Shah M.R. et al. Bactericidal potentials of silver and gold nanoparticles stabilized with cefixime: a strategy against antibiotic-resistant bacteria // J Nanopart Res. 2020, Vol. 22, № 201. P. 1...12.
2. Shirin M., Asghar E., Somayeh H.-N. Copper Nanoparticles as Antibacterial Agents // Journal of Molecular Pharmaceutics & Organic Process Research. 2018. Vol. 6, Issue 1, № 1000140. P. 1...7.
3. Zachar O. Formulations for COVID-19 Treatment via Silver Nanoparticles Inhalation Delivery

at Home and Hospital // ScienceOpen Preprints. 2020. P. 1...17.

4. Sa-nguanmoo N., Namdee K., Khongkow M. et al. Review: Development of SARS-CoV-2 immunoenhanced COVID-19 vaccines with nano-platform // Nano Res. 2022. Vol. 15. P. 2196...2225.

5. Song J., Birbach N.L., Hinestroza J.P. Deposition of silver nanoparticles on cellulosic fibers via stabilization of carboxymethyl groups // Cellulose. 2012. Vol. 19. P. 411...424.

6. Smiechowicz E., Niekraszewicz B., Kulpinski P. et al. Antibacterial composite cellulose fibers modified with silver nanoparticles and nanosilica // Cellulose. 2018. Vol. 25. P. 3499...3517.

7. Ashraf S., Saif-ur-Rehman, Sher F., Khalid Z. M., Mehmood M., Hussain I. Synthesis of cellulose-metal nanoparticle composites: development and comparison of different protocols // Cellulose. 2014. № 21. P. 395...405.

8. Xu Q., Ke X., Ge N. et al. Preparation of Copper Nanoparticles Coated Cotton Fabrics with Durable Antibacterial Properties // FibersPolym. 2018. Vol.19. P.1004...1013.

9. XiongZiye. Ag-Cu bimetallic nanoparticle synthesis and properties. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh. 2017. 177 p.

10. Кудрявцева Е.В., Буринская А.А., Malinowski P. Синтез биметаллических наночастиц медь-серебро в растворах и на полимерных материалах // Химические волокна. 2022. № 3. С. 17...23.

11. Кудрявцева Е.В., Буринская А.А. Качественная оценка хлопчатобумажных текстильных материалов, модифицированных бикомпонентными наночастицами металлов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 6 (402). С. 106...116.

12. Кудрявцева Е.В., Буринская А.А. Антибактериальные текстильные материалы, модифицированные бикомпонентными наночастицами металлов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сб. материалов XXV Междунар. науч.-практ. форума «SMARTEX-2022», 25 августа 2022 года, 6–7 октября 2022 года. Иваново: ИВГПУ, 2022. С. 215...220.

## REFERENCES

1. Ali S., Perveen S., Shah M.R. et al. Bactericidal potentials of silver and gold nanoparticles stabilized with cefixime: a strategy against antibiotic-resistant bacteria // J Nanopart Res. 2020, Vol. 22. № 201. P. 1...12.
2. Shirin M., Asghar E., Somayeh H.-N. Copper Nanoparticles as Antibacterial Agents // Journal of Molecular Pharmaceutics & Organic Process Research. 2018, Vol. 6, Issue 1, № 1000140. P. 1...7.
3. Zachar O. Formulations for COVID-19 Treatment via Silver Nanoparticles Inhalation Delivery



at Home and Hospital // ScienceOpen Preprints. 2020. P. 1...17.

4. *Sa-nguanmoo N., Namdee K., Khongkow M. et al.* Review: Development of SARS-CoV-2 immunoenhanced COVID-19 vaccines with nano-platform // Nano Res. 2022. Vol. 15. P. 2196...2225.

5. *Song J., Birbach N.L., Hinestroza J.P.* Deposition of silver nanoparticles on cellulosic fibers via stabilization of carboxymethyl groups // Cellulose. 2012. Vol. 19. P. 411...424.

6. *Smiechowicz E., Niekraszewicz B. Kulpinski P. et al.* Antibacterial composite cellulose fibers modified with silver nanoparticles and nanosilica // Cellulose. 2018, Vol. 25. P. 3499...3517.

7. *Ashraf S., Saif-ur-Rehman, Sher F., Khalid Z. M., Mehmood M., Hussain I.* Synthesis of cellulose-metal nanoparticle composites: development and comparison of different protocols // Cellulose. 2014. № 21. P. 395...405.

8. *Xu Q., Ke X., Ge N. et al.* Preparation of Copper Nanoparticles Coated Cotton Fabrics with Durable Antibacterial Properties // Fibers Polym. 2018. Vol. 19. P. 1004...1013.

9. *XiongZiye.* Ag-Cu bimetallic nanoparticle synthesis and properties. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh. 2017. 177 p.

10. *Kudriavtseva E.V., Burinskaya A.A., Malinowski P.* Synthesis of Bimetallic Copper-Silver Nanoparticles in Solutions and on Polymeric Materials // Fibre Chemistry. 2022. Vol. 54. No. 3. P. 160...165.

11. *Kudriavtseva E.V., Burinskaya A.A.* Qualitative assessment of cotton textile materials modified with bicomponent metallic nanoparticles // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. № 6 (402). P. 106...116.

12. *Kudriavtseva E.V., Burinskaya A.A.* Antibacterial textile materials modified with bicomponent metallic nanoparticles // Physics of fibrous materials: structure, properties, high technology and materials: collection. materials of the XXV International scientific-practical forum "SMARTEX-2022", August 25, 2022, October 6-7, 2022. Ivanovo: IVGPU, 2022. P. 215...220.

Рекомендована оргкомитетом XIX Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы». Поступила 04.10.23.

УДК 687.016

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_138

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ  
МАЛООБЪЕМНОЙ ОДЕЖДЫ****SHAPING DIGITAL TWINS OF TIGHT-FITTING CLOTHES**А.Ю. МОСКВИН<sup>1</sup>, М.А. МОСКВИНА<sup>1</sup>, В.Е. КУЗЬМИЧЕВ<sup>2</sup>A.YU. MOSKVIN<sup>1</sup>, M.A. MOSKVINA<sup>1</sup>, V.E. KUZMICHEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,  
<sup>2</sup>Ивановский государственный политехнический университет)

(<sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design  
<sup>2</sup>Ivanovo State Polytechnic University)

E-mail: wkd37@list.ru

*Цифровые двойники – быстроразвивающаяся концепция в рамках цифровизации швейной промышленности. В статье представлен метод формообразования виртуальных двойников малообъемной одежды, базирующийся на аппроксимации участков поверхности аватара эллипсоидами относительно плоскостей, проведенных через антропометрические точки. Метод развертывания поверхности и новый математический аппарат позволяют моделировать выточки одежды. Разработана антропометрическая база данных для фигур ASTM с 34 до 52 размера, содержащая параметры аппроксимирующих эллипсоидов и нагрудных выточек. Проверка метода осуществлена средствами компьютерного моделирования процесса формообразования мужской одежды с различной степенью прилегания.*

*“Digital twins” is a rapidly developing concept in digitisation of apparel industry. The article introduces a new method for reproducing shaping of convex areas of tight-fitting clothes in a virtual environment. It bases on 3D approximation of areas of the avatar with ellipsoids. The areas are bounded by planes drawn through anthropometric points. Surface development methods and related calculations were employed to model a dart that reproduces clothes shaping. A new anthropometric dataset covering ASTM body sizes from 34 to 52 was developed. The dataset contains parameters of approximating ellipsoids and darts for chest area shaping. The data was used to analyse the shaping area and describe the variability of its contours within the sizing system. The efficiency of the method was accessed by experimental computer modelling which shown that the method reproduces tight, semi-tight and loose clothes shaping within the chest area.*

**Ключевые слова:** цифровой двойник, вытачка, виртуальная примерка, формообразование одежды, аватар, 3D аппроксимация.

**Keywords:** digital twin, dart, virtual try on, clothes shaping, avatar, 3D approximation.

### Introduction

The concept of digital twins, which was introduced by M. Grieves in 2002 [1], opens new ways for technological modernisation of apparel industry. Digital twins are intended to reflect the physical objects by means of reproducing each step of apparel manufacturing in a virtual environment. Those include shaping, i.e., a transformation of flat parts of the garment into a 3D twin.

This study aims to develop a method of tight-fitting clothes shaping through geometrical modelling in convex areas of digital twins. Only several methods have accessed 3D geometrical modelling and shaping of clothes in relation with avatars. STAPRIM system utilises truncated cones to approximate the 3D garment and converts them into a flat layout from which the block pattern is formed [2]. However, the incisions of the cone development and its segments are hidden from the user and cannot be used to control the apparel shape. Bust CAD [3] employs UV-mapping technology to flatten tight-fitting garments. The algorithm, though, does not take into account air gaps between the avatar and the garment. This shortcoming is addressed in Look Stailor X [4] software, which, however, requires a number of subjective post-processing operations in order to produce a flat pattern. The same technology was used ([5]-[8]) to reproduce garment shaping by using darts. However, this approach has not instrumented for darts calculating. Virtual try-

on software, such as Clo3D [9] and Assyst Vidya [10], provide 3D-2D mapping functions to convert 3D shape of an avatar into a 2D pattern. Those, nevertheless, could not be applied to virtual garments because does not take into account an air gaps and the result will depend completely on the user's experience.

The avatar contains important information about the surface of the body which is crucial for clothes shaping. However, none of the abovementioned methods provides a generic approach to extracting target areas from a highly detailed avatar and using them for parametric modelling of tight-fitting clothes in a virtual environment.

### Methods

Our approach is based on 3D approximation of convex areas of human body important for clothes shaping. Those are bounded by planes which are drawn through anthropometric points. The resulted segments of the surface are represented with ellipsoids. The ellipsoid is modified in order to model air gaps between two virtual twins – the avatar and the garment – and to reproduce different shaping levels, such as tight, semi-tight and loose. A method of surface approximation and a new mathematical apparatus are employed to calculate a dart to obtain the desirable fit. The dart reproduces clothes shaping and can be used instead of textile materials deformation. Fig. 1 shows the flowchart of the developed method.

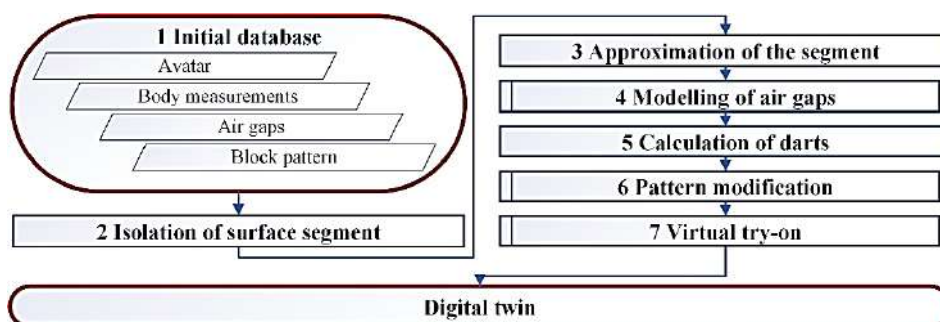


Fig. 1

As can be seen in Fig. 1, the method includes seven steps, which are as follows.

1. Creation of the initial database. The data required to present the mechanism of shaping techniques. It includes information about pattern block, surface of the avatar, avatar dimensions and air gaps located between the avatar and the garment.

2. Analysis of the surfaces of the both objects - the garment and the avatar - in terms of its segments involved in garment shaping. This step aims to render the position of cutting planes relatively to anthropometric points.

3. Approximation of the segments with ellipsoids in accordance with the avatar shape, anthropometric points and cutting planes.

4. Ellipsoid modification. The ellipsoids are scaled along their axes in order to reproduce air gaps between the body and the garment.

5. Calculation of the dart that deforms the edge of the garment in accordance with its shape.

6. Pattern modification, which integrates of the dart into garment construction.

7. Generation of the digital twins by means of computer simulations, i.e. the transition from the 2D pattern to the 3D digital object.

The list of required software programs includes a virtual try-on system (Clo3D, Marvelous Designer, Optitex, Assyst Vidya, etc.) and a 3D graphics package (3dsMax, Maya, Cinema4D, Blender, etc.).

This study employed Clo3D [11] and 3dsMax [12] which are complemented with

Substance painter [13]. The latter was used for analysing the surface of virtual clothes.

The chest area of the body was chosen as the research object since it is one of the most important shaping areas for men's clothing. Fig. 2 (a) shows a mannequin and the scheme for isolating the segment of the surface by four planes through three steps, which are as follows.

1) Auxiliary lines are drawn in top and side views (Fig. 2, b, c) under the following restrictions: point 1 is the centre of the chest girth; line 1-2 lies on the sagittal plane; point 3 is the most protruding point of the chest girth; line 3-4 is parallel to line 1-2; point 5 is the front corner of the axillary hollow; line 5-6 is horizontal. Anthropometric points correspond to ISO 85559-1:2017 [14].

2) The chest contour in the side view is approximated with a circle. The circle with the centre in point 7 (Fig. 2, c) passes through points 3 and 6. Point 7 lies on line 3-4. The chest contour in the top view is approximated with an ellipse. Its centre coincides with the centre of the circle in point 7 (Fig. 2, b) and its longitudinal diameter coincides with diameter 7-3 of the circle (Fig. 2, b). The transverse diameter of the ellipse, 7-8, (Fig. 2, b) is adjusted in such a way as to ensure its contour runs through point 5.

3) Four planes are drawn to isolate the target segment. Plane A is horizontal and passes through the chest level. Plane B is vertical and passes through line 7-3. Plane C is drawn through line 7-6 perpendicularly to plane B. Plane D is oriented vertically and passes through line 7-5.

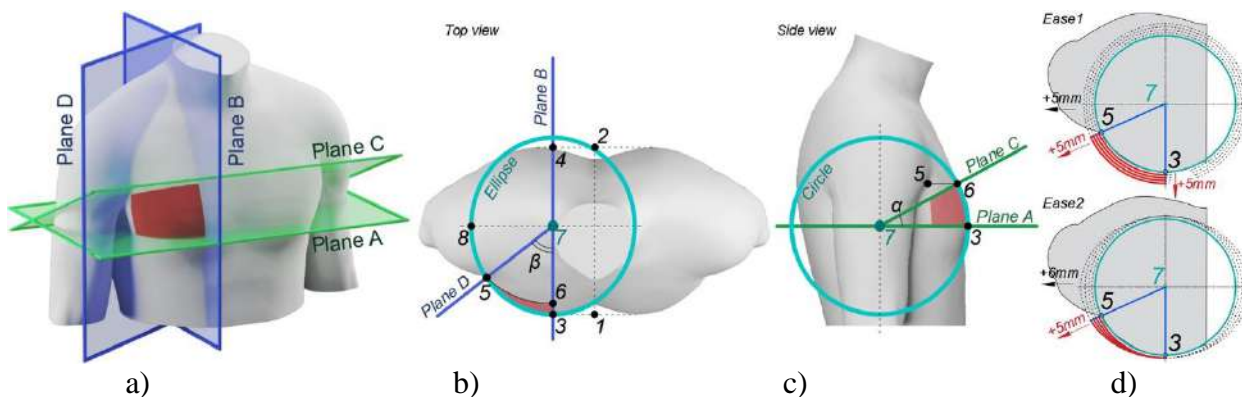


Fig. 2

The circle and the ellipse could be presented as an ellipsoid, namely a spheroid, with two equal semi-diameters. The segment of the ellipsoid bounded by *planes A, B, C and D* (Fig. 2, a) represents the shape of the chest area. The same segment is able to reproduce the shape of the garment covering the chest. The transition from the surface of the body to the surface of clothes requires two adjustments (Fig. 2, d) in accordance with the fit of the garment. Firstly, the ellipsoid should be increased proportionally to the air gap between the body and the garment (Fig. 2, d). Secondly, the transverse diameter of the ellipsoid is increased in order to enlarge the air gap at the front corner of the axillary hollow and thereby to flatten the shape of the garment. For example, *ease 2* is 5 mm in point 5 and becomes nil in point 3 (Fig. 2, d). When the transverse diameter of the ellipsoid tends to infinity, the segment has the cylindrical shape which results in the absence of shaping.

The presented approach can be projected onto other convex shaping areas, such as

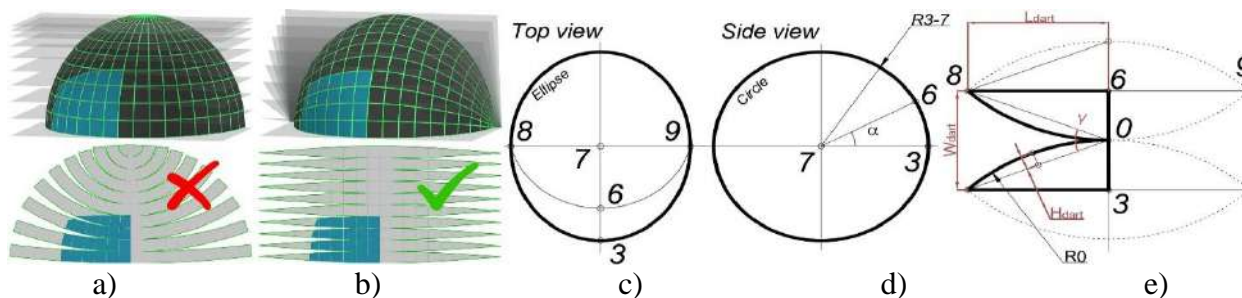


Fig. 3

Two methods were considered in our study. The first one, called “Zone method” [16], uses horizontal planes to cut the object into truncated cones (Fig. 3 a). The second one, so-called “Gore method” [17], employs intersected planes running through the axis of the primitive to cut it into leaf-shaped pieces (Fig. 3, b). In both methods, trapezoidal segments are laid out flat to render a 2D layout. As can be seen from Fig. 3 (a, b), the two developments for the small segment are similar. The difference lies in darts which located on the sides of the flattened shape. The zone method results in unparallel and unequal darts. The gore method forms darts that are parallel and equal. The second layout (Fig. 3,

stomach, scapula and shoulder. Stomach is approximated with a single ellipsoid, the transverse and the vertical diameters of which are equal and lies on the frontal plane. Scapula area is represented by an ellipsoid, similar to the one in Fig. 2, drawn by using the horizontal cross section of the body at scapula level and the back corner of the axillary hollow. The shoulder ellipse can be drawn by employing the shoulder anthropometric point, the front and the back corners of the axillary hollow, the upper arm axis and its cross sections.

In order to find the most suitable way to shape clothes, we compared several approaches by using 3dsMax software and the Unwrap UVW modifier [15]. Fig.3 (a, b) shows an ellipsoid and its rectangular segment. In terms of the presented approach, the segment is considered a geometrical model of the chest area.

b) is more suitable for reproducing clothes shaping because the darts are perpendicular to the edge of the garment part and the number of darts does not affect their direction.

The key point of the developed method is to apply the darts instead of nonpredictable treatment by shortening of garment edges and textile materials during garment shaping. This study presents a new mathematical apparatus that allows to determine the required parameters in accordance with the chosen surface (Fig.2). The four parameters include length ( $L_{dart}$ ), width ( $W_{dart}$ ), deflection ( $H_{dart}$ ) of the sides of the dart and the angle ( $\gamma$ ) between them (Fig. 3, e).

Fig.3 (c, d, e) shows two projections of a sphere and a leaf-shaped segment of its flat layout. In accordance with Fig. 3 (c, d, e), the parameters of the dart are interlinked with those of the ellipsoid that approximates the avatar. Thus, the latter can be used to calculate the dart by applying standard methods [18, 19], trigonometric functions [20] and Ramanujan approximation [21] of ellipse circumference (1...5):

$$W_{\text{dart}} = 3_6 = \frac{\alpha 2\pi R_{3-7}}{180n} = \frac{\alpha 2\pi |3_7|}{180n}, \quad (1)$$

$$L_{\text{dart}} = 3_8 = \frac{\pi}{4} (3(|3_7| + |7_8|) - \sqrt{(3|3_7| + |7_8|)(|3_7| + 3|7_8|)}), \quad (2)$$

$$R_0 = \frac{\left(\frac{3L_{\text{dart}}}{4}\right)^2 + \left(\frac{W_{\text{dart}}}{2}\right)^2}{2\left(\frac{W_{\text{dart}}}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

$$H_{\text{dart}} = R_0 - \sqrt{R_0^2 - \frac{\left(\frac{3L_{\text{dart}}}{4}\right)^2}{4}}, \quad (4)$$

$$\gamma = 2\arctg\left(\frac{0.5W_{\text{dart}}}{L_{\text{dart}}}\right). \quad (5)$$

where  $n$  is the number of darts within the segment and  $R_0$  is the length of the side of the leaf-shaped segment (Fig. 3, e). This study uses one dart for clothes shaping ( $n=1$ ).

### Results and discussion

Ten avatars presented in the Clo3D software library and covering ASTM body sizes from 34 to 52 were analysed. Their shapes were approximated with ellipsoids in accordance with Fig. 2. The parameters of the ellipsoids which are sufficient for their reproduction were measured. Those include the transverse shift, the longitudinal radius, the transverse radius, the horizontal angle, and the sagittal angle.

Table 1 shows new anthropometric dataset. The absolute approximation error  $D_a$  was estimated as the distances measured between two surfaces along normal vector in nine points and averaged as the arithmetic mean. The relative error  $D_r$  was calculated as  $D_a$  divided by the longitudinal radius (3-7). The geometric parameters of the darts, namely, length  $L$ , width  $W$ , deflection  $D$  and angle  $\gamma$ , were calculated by (1-5). The approximation was carried out four times by using different values of *Ease1* and *Ease2* as the table shows. The dataset was used to analyse the shaping area.

Table 1

Parameter	Values for ASTM body sizes*									
	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52
Body										
Heigh, mm	<b>1778</b>									
Chest girth, mm	864	914	965	1016	<b>1067</b>	1118	1168	1219	1270	1321
Waist girth, mm	724	775	826	876	<b>927</b>	978	1041	1105	1168	1232
<i>Body mimicking surface: Ease1 = 0 mm; Ease2 = 0 mm**</i>										
Ellipsoid										
Transverse shift (1-3), mm	61	64	67	69	71	74	78	82	86	89
Longitudinal radius (3-7), mm	156	142	133	123	114	111	105	102	98	95
Transverse radius (7-8), mm	121	117	112	115	118	119	120	121	122	123
Horizontal angle ( $\beta$ ), deg.	44,12	52,17	59,83	62,04	65,51	67,92	72,1	75,64	77,81	79,92
Sagittal angle ( $\alpha$ ), deg.	29,53	32,61	36,76	40,98	45,06	48,31	51,34	52,9	55,19	57,98
Absolute error ( $D_a$ ), mm	2,9	2,7	2,8	3,0	3,1	3,1	3,6	3,9	4,5	4,7
Relative error ( $D_r$ ), %	1,9	1,9	2,1	2,4	2,7	2,8	3,4	3,8	4,6	4,9
Dart										
Length ( $L_{\text{dart}}$ ), mm	218	203	192	186	182	180	176	175	172	171
Width ( $W_{\text{dart}}$ ), mm	80	80	85	88	90	93	94	94	94	96
Deflection ( $H_{\text{dart}}$ ), mm	18	18	18	19	19	19	19	19	19	19
Dart angle ( $\gamma$ ), deg.	20,87	22,39	24,92	26,48	27,70	29,04	29,85	29,97	30,46	31,22

<i>Tight fit (level 1): Ease1 = 5 mm; Ease2 = 0 mm**</i>										
Ellipsoid										
Longitudinal radius (3-7), mm	161	147	138	128	<b>119</b>	116	110	107	103	100
Transverse radius (7-8), mm	126	122	117	120	<b>123</b>	124	125	126	127	128
Dart										
Length ( $L_{dart}$ ), mm	225	211	200	194	<b>190</b>	188	184	183	180	179
Width ( $W_{dart}$ ), mm	83	83	88	91	<b>94</b>	97	99	98	99	101
Deflection ( $H_{dart}$ ), mm	19	19	19	19	<b>20</b>	20	20	20	20	20
Dart angle ( $\gamma$ ), deg.	20,79	22,32	24,85	26,45	<b>27,72</b>	29,08	29,94	30,09	30,62	31,43
<i>Semi-tight fit (level 2): Ease1 = 10 mm; Ease2 = 30 mm**</i>										
Ellipsoid										
Longitudinal radius (3-7), mm	166	152	143	133	<b>124</b>	121	115	112	108	105
Transverse radius (7-8), mm	171	167	162	165	<b>168</b>	169	170	171	172	173
Dart										
Length ( $L_{dart}$ ), mm	264	250	239	234	<b>230</b>	228	225	224	222	221
Width ( $W_{dart}$ ), mm	85	86	91	95	<b>97</b>	102	103	103	103	106
Deflection ( $H_{dart}$ ), mm	20	20	21	21	<b>21</b>	22	22	22	22	22
Dart angle ( $\gamma$ ), deg.	18,36	19,55	21,62	22,90	<b>23,92</b>	25,07	25,74	25,85	26,26	26,93
<i>Loose fit (level 3): Ease1 = 15 mm; Ease2 = 60 mm**</i>										
Ellipsoid										
Longitudinal radius (3-7), mm	171	157	148	138	<b>129</b>	126	120	117	113	110
Transverse radius (7-8), mm	223	219	214	217	<b>220</b>	221	222	223	224	225
Dart										
Length ( $L_{dart}$ ), mm	310	297	286	281	<b>278</b>	277	274	273	271	270
Width ( $W_{dart}$ ), mm	88	89	95	98	<b>101</b>	106	107	108	108	111
Deflection ( $H_{dart}$ ), mm	21	21	22	22	<b>23</b>	24	24	24	24	24
Dart angle ( $\gamma$ ), deg.	16,13	17,06	18,77	19,82	<b>20,66</b>	21,64	22,19	22,27	22,60	23,18

Fig. 4 summarises body measurements, dimensions of the ellipsoids and darts parameters for ASTM 34-52avatars.

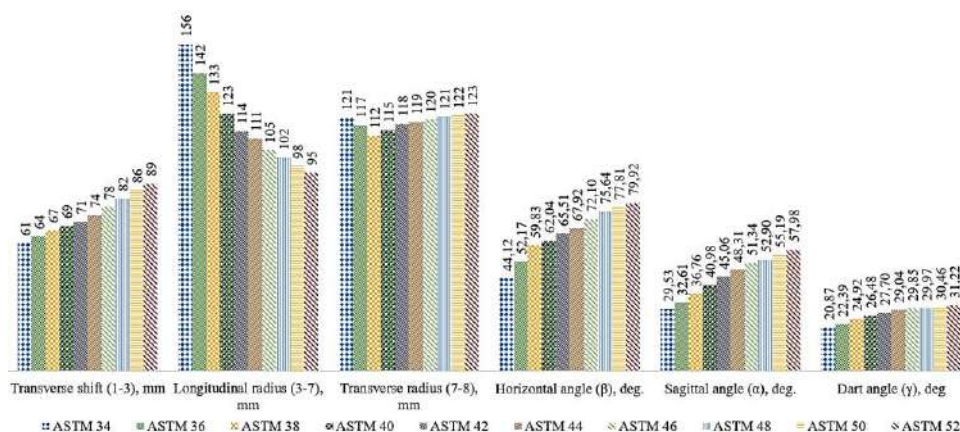


Fig. 4

As can be seen in Fig. 4, the parameters of the ellipsoid changes with increasing size. The transverse shift, i.e., the distance between the approximated surface and the sagittal plane, increases from 61 to 89 mm. Likewise,

the horizontal angle significantly increases from 44° up to 80°. This is in line with body sizing because as the chest girth grows all its segments lengthen. On the contrary, longitudinal radius decreases from 156 to 95 mm

with increasing size. Thus, the profile projection of the ellipsoid becomes smaller, its centre moves closer to the body surface and the approximated area becomes more convex. In order to keep the size of the shaping area, the sagittal angle increases from  $29^\circ$  to  $58^\circ$ . The transverse radius drops from 121 to 112 mm in sizes 34-38 and rises back up to 123 mm in size 52. This indicates that the horizontal projection of the chest area is most pointed for 38 size and becomes smoother for smaller and larger sizes. It is worth mentioning that in 34-40 sizes longitudinal radius is larger than the transverse radius. The horizontal contour of the approximated area for these sizes is more convex than the profile contour. Vice versa, within 42-52 sizes profile contour of the chest is more curved than the horizontal one. All the above-mentioned data, taken together, result in the dart angle that proportionately increases from  $20,87^\circ$  in size 34 to  $31,22^\circ$  in size 52.

To prove the efficiency of our method, the experimental modelling of clothes was done. The ASTM avatar with 42 size was chosen. The basic front part was constructed in accordance with a pattern drafting system [22, p.24]. Three different darts were drawn by using the values marked in Table 1 to generate tight, semi-tight and loose fit. Fig.5 shows how the darts were integrated into the initial construction.

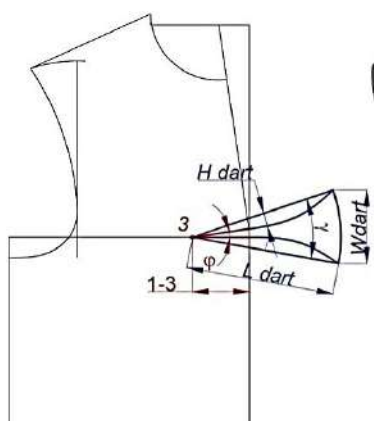


Fig. 5

As can be seen in Fig. 5, the top of dart was overlapped with point 3 at the chest level. The sides of the dart were shortened to the centre line of the garment part. Thus, the dart

angle was reduced from  $\gamma$  to  $\varphi$ . The obtained values of  $\varphi$  were  $8,75^\circ$ ,  $6,24^\circ$  and  $3,45^\circ$  for tight, semi-tight and loose fitting.

Three virtual twins were modelled in Clo3D software. Cotton oxford virtual textile material (id=FCL1PSC011, fibre content is cotton 100%, density is  $182 \text{ g/m}^2$ , thickness is  $0,36 \text{ mm}$ ) was used for simulations due to its ability to render rigid folds similar to mock-up fabrics. A reasonably high level of simulation quality was set up (particle distance is 3 mm, minimal air gap is 1 mm, iteration count is 50). The curvature map of Substance painter software was employed [23] to generate concave and convex information related to the mesh. It calculated angles formed by neighbouring polygons and painted the surface in shades of grey.

In parallel the same fronts were made from real textile material with similar properties as virtual one and presented on an adjustable ASTM standard mannequin.

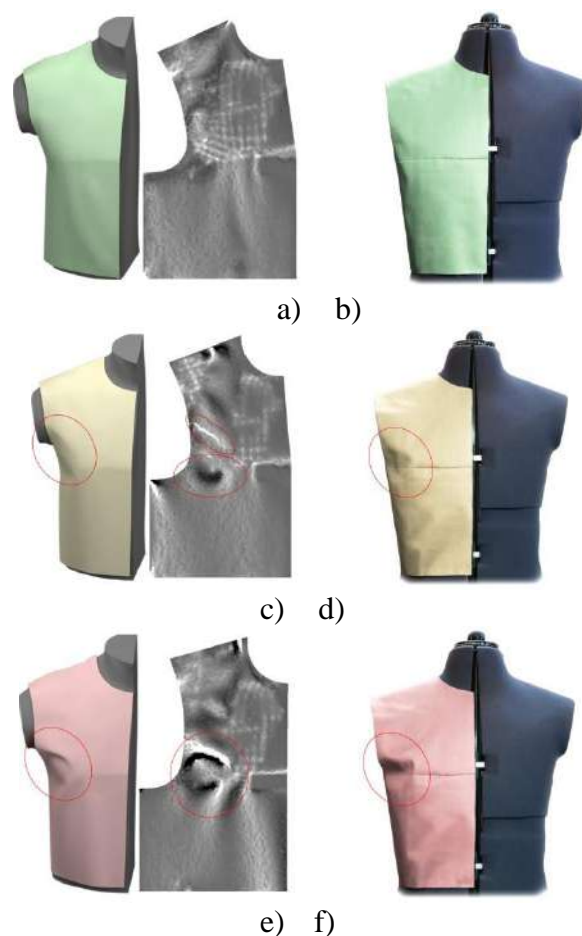


Fig. 6



Fig.6 (a,c,d) shows the curvature maps for all three digital twins in different colours: grey colour represents flat areas, black and white colours represent the concave and the convex areas respectively. Therefore, black and white areas visualised the folds. The first twin (Fig.6, a) has not visible black or white areas because the front shape smoothly bends around the avatar and chest area has minimal air gaps. The real front has similar surface (Fig.6,b).

The second twin and its map (Fig.6, c) reveals weakly expressed wrinkles which are natural for semi-tight clothes.

The third variant (Fig. 6, e, d) shows strong folds around the chest similar to ones visible on the surface of loose fitting garments. In this case the both looks - virtual and real - have the similar relief of surface.

Thus, the developed method reproduces different degrees of clothes shaping within the chest area.

## CONCLUSIONS

The article introduces a method for reproducing clothes shaping in a virtual environment by means of darts. The results of the study are as follows.

1. A new approach to digital clothes shaping was developed based on geometric modelling of the human body by means of approximates convex areas of spheroids. The modelling areas are bounded by four planes through anthropometric points. Surface development methods and related calculations are employed to model a dart which used for clothes shaping.

2. A new anthropometric dataset was developed. The dataset contains parameters of the approximating ellipsoids for chest area ASTM men body sizes 34 to 52 and the darts of front of clothes.

3. The efficiency of the method was accessed by experimental computer and real modelling of three basic shapes of men's clothes. The folds on the surface were visualised by using computer generated curvature maps to reproduce tight, semi-tight and loose clothes.

The developed method has its limitations. Firstly, it uses convex 3D primitives to approximate the body. Thus, concave shapes of body, such as sides and back out of the scope and its application. Secondly, the body varies significantly in different sizing standards and 3D avatars. Therefore, more 3D shapes should be studied in order to establish widely applicable and precise approximation techniques.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, №7. С. 517...531.
2. Staprim: сайт. – 2022. – URL: <http://www.staprim.com/> [дата обращения 30.01.2022]
3. Allsoft. Bust CAD: сайт. – 2023. – URL: <https://allsoft.ru/software/vendors/iit-consulting/bustcad/> [дата обращения 30.01.2022]
4. Informer Technologies. LookStailorX 3.5: сайт. – 2023. – URL: <https://lookstailorx.software.informer.com/> [дата обращения 30.01.2022]
5. Kuzmichev V., Moskvina A., Surzhenko E. and Moskvina M. Computer reconstruction of 19th century trousers // International Journal of Clothing Science and Technology. 2017. Vol. 29. No. 4. P. 594...606.
6. Moskvina A.Yu., Moskvina M.A., Kuzmichev V.E. Block pattern generation of the scanned historical garments // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. №4 (400). P. 147...152.
7. Moskvina A.Yu., Moskvina M.A., Kuzmichev V.E. Digital twins of textile materials for visualization of historical costumes // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. №2 (398). P. 86...93.
8. Kuzmichev V.E., Moskvina A.Yu., Moskvina M.A. Modeling of digital twins of historical fashionable bodies // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. №1 (391). P. 144...150.
9. CLO Virtual Fashion. Manual. Steam: сайт. – 2023. – URL: <https://support.clo3d.com/> [дата обращения 30.01.2022]
10. Human Solution. Assyst: сайт. – 2023. – URL: <https://assyst-cis.com/3d-modelirovanie/> [дата обращения 30.01.2023]
11. CLO Virtual Fashion: сайт. – 2023. – URL: <https://www.clo3d.com/> [дата обращения 30.01.2022]
12. Autodesk. 3ds Max: Create massive worlds and high-quality designs: сайт. – 2023. – URL: <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview> [дата обращения 30.01.2023]
13. Adobe. Substance 3D Painter: сайт. – 2023. – URL: <https://www.adobe.com/products/substance3d-painter.html> [дата обращения 30.01.2023]

14. ГОСТ Р ИСО 8559-1-2020. Обозначения размеров одежды. Часть 1. Антропометрические определения для измерения параметров тела человека. М., 2021.

15. Autodesk. 3ds Max: Support and learning. Unwrap UVW Modifier: сайт. – 2023. – URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learnexplore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2022/ENU/3DSMax-Modifiers/files/GUID-EA10E59F-DE7F-497E-B399-6CF213A02C8D-htm.html> [дата обращения 30.01.2022]

16. Florida Center for Instructional Technology. *ClipArt ETC*. Development of Sphere Zone Method: сайт. – 2023. – URL: [https://etc.usf.edu/clipart/76500/76571/76571\\_dev-sphzone.htm](https://etc.usf.edu/clipart/76500/76571/76571_dev-sphzone.htm) [дата обращения 30.01.2023]

17. Florida Center for Instructional Technology. *ClipArt ETC*. Development of Sphere Gore Method: сайт. – 2023. – URL: [https://etc.usf.edu/clipart/76500/76570/76570\\_dev-sphgore.htm](https://etc.usf.edu/clipart/76500/76570/76570_dev-sphgore.htm) [дата обращения 30.01.2023]

18. *Thomas E. French*. A manual of engineering drawing for students and draftsmen. New York, NY: McGraw-Hill, 1911.

19. *Лазариди К.Х., Карагезян Л.Н.* Построение приближенных и условных разверток поверхностей: методические указания по начертательной геометрии. СПб: СПбГУПТД, 2008.

20. Атанасян, Л.И. Геометрия / Л.И. Атанасян, В.Ф. Бутузов, С.Б. Кадомцев и др. М.: Просвещение, 2010.

21. *John D. Cook*. Ramanujan approximation for circumference of an ellipse: сайт – 2013. – URL: <https://www.johndcook.com/blog/2013/05/05/ramanujan-circumference-ellipse/> [дата обращения 30.01.2023]

22. *Гриншпан И.Я.* Конструирование мужских пиджаков: самоучитель. М.: Рифмополиграф, 1992. 128 с.

23. Adobe. Substance 3D Painter. Documentation: Curvature: сайт. – 2023. – URL: <https://substance3d.adobe.com/documentation/spdoc/curvature-142213459.html> [дата обращения 30.01.2022]

## REFERENCES

1. *Carev M. V., Andreev YU. S.* Cifrovye dvojniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikatsiya, tekhnologii, scenarii ispol'zovaniya // Journal of Instrument Engineering. 2021. T. 64, №7. S. 517...531.

2. Staprim: сайт. – 2022. – URL: <http://www.staprim.com/> [дата обращения 30.01.2022]

3. Allsoft. BustCAD: сайт. – 2023. – URL: <https://allsoft.ru/software/vendors/iit-consulting/bustcad/> [дата обращения 30.01.2022]

4. Informer Technologies. Look StailorX 3.5: сайт. – 2023. – URL: <https://lookstailorx.software.informer.com/> [дата обращения 30.01.2022]

5. *Kuzmichev, V., Moskvina, A., Surzhenko, E. and Moskvina, M.* Computer reconstruction of 19th century trousers // International Journal of Clothing Science and Technology. 2017. Vol. 29 No. 4. P. 594...606.

6. *Moskvina A.Yu., Moskvina M.A., Kuzmichev V.E.* Block pattern generation of the scanned historical garments // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. №4 (400). P. 147...152.

7. *Moskvina A.Yu., Moskvina M.A., Kuzmichev V.E.* Digital twins of textile materials for visualization of historical costumes // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. №2 (398). P. 86...93.

8. *Kuzmichev V.E., Moskvina A.Yu., Moskvina M.A.* Modeling of digital twins of historical fashionable bodies // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. №1 (391). P. 144...150.

9. CLO Virtual Fashion. Manual: сайт. – 2023. – URL: <https://support.clo3d.com/> [дата обращения 30.01.2022]

10. Human Solution. Assyst: сайт. – 2023. – URL: <https://assyst-cis.com/3d-modelirovanie/> [дата обращения 30.01.2023]

11. CLO Virtual Fashion: сайт. – 2023. – URL: <https://www.clo3d.com/> [дата обращения 30.01.2022]

12. Autodesk. 3ds Max: Create massive worlds and high-quality designs: сайт. – 2023. – URL: <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview> [дата обращения 30.01.2023]

13. Adobe. Substance 3D Painter: сайт. – 2023. – URL: <https://www.adobe.com/products/substance3d-painter.html> [дата обращения 30.01.2023]

14. ISO 85559-1:2017. Size designation of clothes. Part 1: Anthropometric definitions for body measurement. Geneva, 2006. 80 p. (Clothing industry).

15. Autodesk. 3ds Max: Support and learning. Unwrap UVW Modifier: сайт. – 2023. – URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learnexplore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2022/ENU/3DSMax-Modifiers/files/GUID-EA10E59F-DE7F-497E-B399-6CF213A02C8D-htm.html> [дата обращения 30.01.2022]

16. Florida Center for Instructional Technology. *ClipArt ETC*. Development of Sphere Zone Method: сайт. – 2023. – URL: [https://etc.usf.edu/clipart/76500/76571/76571\\_dev-sphzone.htm](https://etc.usf.edu/clipart/76500/76571/76571_dev-sphzone.htm) [дата обращения 30.01.2023]

17. Florida Center for Instructional Technology. *ClipArt ETC*. Development of Sphere Gore Method: сайт. – 2023. – URL: [https://etc.usf.edu/clipart/76500/76570/76570\\_dev-sphgore.htm](https://etc.usf.edu/clipart/76500/76570/76570_dev-sphgore.htm) [дата обращения 30.01.2023]

18. *Thomas E. French*. A manual of engineering drawing for students and draftsmen. New York, NY: McGraw-Hill, 1911.

19. *Lazaridi K.H., Karagezyan L.N.* Construction of approximate and conditional surface scans: methodological guidelines for descriptive geometry. – St. Petersburg: SPbGUPTD, 2008.

20. *Atanasyan L.I., Butuzov V.F., Kadomcev S.B., Poznyak E.G. & Yudina, I.I.* Geometry. М.: Education, 2010.

21. *John D. Cook*. Ramanujan approximation for circumference of an ellipse: сайт – 2013. – URL:

<https://www.johndcook.com/blog/2013/05/05/ramanujan-circumference-ellipse/> [data obrashcheniya 30.01.2023]

22. Grinshpan I. Ya. Konstruirovaniye muzhskih pidzhakov: samouchitel'. M.: Rifmopoligraf, 1992, 128 s.

23. Adobe. Substance 3D Painter. Documentation: Curvature: sajt. – 2023. – URL:

<https://substance3d.adobe.com/documentation/spdoc/curvature-142213459.html> [data obrashcheniya 30.01.2022]

Рекомендована кафедрой конструирования швейных изделий ИВГПУ. Поступила 10.03.23.

УДК 687.02:687.17

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_147

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ШВЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### DESIGN OF COMBINED SEWING TECHNOLOGIES

О.В. МЕТЕЛЕВА<sup>1</sup>, Е.В. РУМЯНЦЕВ<sup>1</sup>, В.М. БУЗНИК<sup>2</sup>

O.V. METELEVA<sup>1</sup>, Ye.V. RUMYANTSEV<sup>1</sup>, V.M. BUZNIK<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Ивановский государственный политехнический университет,

<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук)

(<sup>1</sup>Ivanovo State Polytechnical University,

<sup>2</sup>Institute of General and Inorganic Chemistry named after N.S. Kurnakov  
of the Russian Academy of Sciences)

E-mail: olmet07@yandex.ru, rector@ivgpu.ru, bouzник@ngs.ru

*В статье представлены результаты исследований принципов формирования комбинированных технологий для повышения эффективности швейного производства и качества защитных швейных изделий. Исследования проведены с применением методов анализа и синтеза структуры и содержания операций швейного производства и заключительной отделки текстильных материалов. Выполнен сравнительный анализ характеристик процессов получения водоотталкивающих и водонепроницаемых материалов и основных швейных операций стачивания и ВТО. Предложены варианты концентрированных операций с использованием дополнительных физико-химических воздействий. Рассмотрены концентрированные операции при совмещении механического и физического воздействий с физико-химическими. Герметизация ниточных строчек материалов с водоотталкивающей пропиткой обеспечена в концентрированной операции стачивания и блокирования гидрофобизатором. Проклеивание ниточных швов материалов с водонепроницаемым покрытием самоклеящейся полимерной лентой выполнено в процессе стачивания. Локальная или объемная влажно-теплогидрофобная обработка повышает уровень водозащитных свойств одежды или ее участков. Выбор варианта комбинированной технологии может быть осуществлен в зависимости от исходных свойств материалов, проектируемого уровня защиты и качества изделия, его назначения и условий использования, требований потребителя. Все рассмотренные технологические схемы локальной герметизации швейных изделий из водоотталкивающих или*

*водонепроницаемых материалов позволяют повысить защиту ниточных строчек или швов.*

*The article presents the results of research on the principles of forming combined technologies to increase the efficiency of sewing production and the quality of protective sewing products. The studies were carried out using analytical studies based on comparative analysis and synthesis of the structure and content of sewing operations and final finishing of textile materials. A comparative analysis of the characteristics of the processes of obtaining water-repellent and waterproof materials and the main sewing operations of sewing and WTO was carried out. There are presented versions of concentrated operations using additional physicochemical effects. Sealing of thread stitches of materials with water-repellent impregnation is provided in concentrated operation of stitching and blocking with hydrophobizator. Sizing of thread seams of materials with waterproof coating with self-adhesive polymer tape is performed during stitching. Local or volumetric wet-thermally hydrophobic treatment increases the level of water protective properties of clothing or its areas. The choice of the combined technology can be carried out depending on the initial properties of the materials, the required level of water protection quality of the product, its purpose and conditions of use, and the requirements of the consumer. All of the processes discussed above for local sealing of sewing products made of water-repellent or waterproof materials make it possible to increase the protection of thread stitches or seams.*

**Ключевые слова:** комбинированная швейная технология, концентрированная швейная операция, водоотталкивающие и водонепроницаемые материалы, герметизация ниточных швов.

**Keywords:** combined sewing technology, concentrated sewing operation, water repellent and waterproof materials, sealing of thread seams.

Решение технологических проблем швейных предприятий возможно за счет разработки *комбинированных технологий* с применением физико-химических процессов, построенных на новых принципах организации производства и направленных на повышение функциональных или декоративных потребительских свойств швейных изделий. Данные технологии могут применяться при проектировании моделей нового ассортимента одежды, раскрое, дублировании, нанесении контуров линий, обработке срезов, локальной отделке [1]. Словосочетанием «химические технологии швейного производства» в настоящее время называют в узком смысле технологии, основанные на применении химических веществ и материалов, не используемых ранее в швейной промышленности, а в широком смысле непосредственное перенесение физико-химических воздействий

из других производств в процессы изготовления одежды и разработка на их базе новых швейных технологий.

Химизация технологических процессов швейного производства является закономерным продолжением развития его сырьевой базы. Элементы химических технологий давно используются при изготовлении швейных изделий. Однако жизнеспособны только такие новые технологии, которые способствуют решению актуальных проблем предприятий – росту производительности труда, повышению качества и надежности продукции, расширению ассортимента изделий, стимулированию потребительского спроса. А это требует четкого обоснования необходимости и рациональности предлагаемых технологических подходов с применением химических материалов и физических воздействий.

Целью исследования является поиск более эффективного способа применения химических веществ и материалов в швейных операциях, методов гармоничного встраивания их в технологический процесс швейного предприятия с учетом особенностей его структуры и функционирования.

#### Методы исследования

Применены аналитические исследования на основе сравнительного анализа и синтеза структуры и содержания операций швейного производства и заключительной отделки текстильных материалов. Для выявления соответствий между процессами придания водозащитных свойств материалам и основными операциями швейного производства выполнен анализ технологических проводок промышленной водоотталкивающей отделки тканей на ООО «Ярцевский хлопчатобумажный комбинат» Смоленской области, отделочной фабрике «Красный октябрь» в г. Каменке и АО «Родники – Текстиль» Ивановской обл., технологии нанесения пленочных покрытий – по сведениям из [2].

Микрофотографии элементов ниточных соединений получены с использованием USB цифрового микроскопа AM2011-Dino Lite Basic и цифрового фотоаппарата SONY DSC W310.

#### Результаты исследований

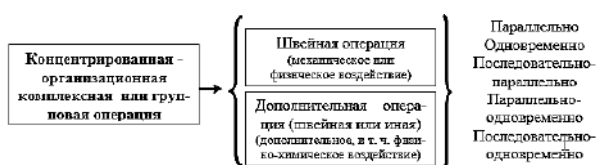


Рис. 1

Достижение технологических и экономических результатов при использовании химических технологий основано на эффективном применении химических веществ и материалов и физических воздействий. Наиболее интересным способом применения химических веществ и материалов является проектирование концентрированных операций (рис. 1), представляющих собой базу для создания новых видов специального оборудования, способствующих разработке робототехнологических комплексов и новых

комбинированных технологий. Однако они должны при этом отвечать ряду общих требований.

Организационные и групповые операции (к ним должны быть отнесены и автоматические линии) основаны на минимальном разнообразии воздействий. Наибольшее разнообразие видов воздействий характерно для комплексных операций. Групповые операции осуществляются только с использованием полуавтоматов и автоматов.

Примеров совмещения во времени и пространстве механических и физических воздействий для стачивающих операций – единицы, но они показывают, что это возможно. В операциях ВТО легко совмещаются механические и физические виды воздействий, но более эффективными считаются операции с разделением во времени этих воздействий. Часто используется соединение в одной организационной операции влажно-тепловой обработки и склеивания. Такая концентрация воздействий очень эффективна и при возможности технологического совмещения неизменно экономически выгодна.

К настоящему времени известны и подробно разработаны алгоритмы группирования деталей по технологическим процессам [3]. Они основаны на анализе последовательности операций по обработке деталей и узлов. Разделение технологического процесса швейного производства на операции в основе своей содержит разделение по видам воздействий и характеру их осуществления. Последовательность их выполнения может изменяться не только в зависимости от модели, но и от используемого оборудования, особенностей материала изделия, а также отличий в организации производства. Разделение цикла операции на стадии обусловлено особенностями и циклом работы инструментов и механизмов оборудования. Неделимая операция полностью выполняется на одном виде оборудования. От операции к операции оборудование может меняться. Параметры и режимы обработки изменяются редко и стабильны для группы материалов и даже изделий.

Очевидно, не все физико-химические процессы могут быть эффективно встроены в процессы швейного производства. Необходимо при этом сформировать совершенно по-новому организованные операции, учитывая особенности процессов производства одежды. Для этого выполнен анализ возможности концентрации разнородных операций при условии достижения эффективной ее организации.

Точкой отсчета в развитии направления создания концентрированных операций, содержащих не используемые ранее технологические воздействия, можно считать применение влажно-тепловой обработки (ВТО) для образования клеевых соединений деталей швейных изделий. Максимальная степень концентрации воздействий использована в операциях ВТО и склеивания, в которых механические деформации полностью совмещены с нагреванием (пластификацией), охлаждением (переводом в исходное упругое состояние), абсорбцией влаги, физико-химическим взаимодействием с клеем. Только разработка специальных термопластичных клеев и клеевых материалов позволила обеспечить совмещение ВТО и склеивания при производстве одежды. В результате применения термосклеивания с прокладочными деталями достигается повышение формоустойчивости основных деталей одежды при одновременном сокращении материальных и трудовых затрат. В силу широкого распространения на многие швейные изделия и гармоничного совмещения с операциями ВТО его можно рассматривать как прецедент успешного проектирования комбинированных технологий.

Таким образом, проектирование концентрированных операций, приводящее к созданию комбинированных технологий, выполняется интегрированием в основную швейную операцию дополнительного вида воздействия, позволяющего получить соответственно дополнительно новый технологический или декоративный эффект.

Наличие заметных различий между операциями в уровне механизации, в воздействующих факторах, в продолжительности операций приводит к необходимости

применения менее эффективного способа объединения – последовательного. Проектирование концентрированных операций даже при максимальном сохранении универсальности действия всегда связано с появлением ограничений в большей или меньшей степени:

- в применении (только для определенного изделия из ограниченного ассортимента материалов);
- в декоративном и пространственном многообразии (ограничении вариантов форм, размеров, конфигурации линий);
- в видах и свойствах применяемых материалов (по волокнистому составу, толщине, растяжимости, структуре, плотности, жесткости т. п.);
- в вариантах конструктивного исполнения (кривизне, виду шва, толщине пакета);
- параметрах обработки (ширине шва, расстоянию между строчками);
- зоне воздействия (незамкнутый контур, унификация зоны обработки).

Внедрение комбинированных технологий позволяет по-новому решить проблемы, раньше решаемые иными, менее эффективными методами: например, дублирование вместо ниточного выстегивания, термопечатавание взамен аппликации, вышивания и т.д. При этом химическое воздействие в рамках комплексной операции возможно только с применением химических веществ или материалов.

В известных технологических решениях, направленных на повышение герметичности ниточных швов водозащитных швейных изделий, используются концентрированные операции, объединяющие стачивание и фиксацию герметика на поверхности или внутри шва. В качестве герметиков предлагаются и жидкие клеевые композиции, и готовые терморезактивные и термопластичные материалы в виде пленок и лент. Осуществление операций предполагает обязательное наличие специальных устройств в комплекте с приспособлениями малой механизации для дозированной подачи и ориентации герметиков. Но все технологии многостадийны, не ограничиваются выполнением только одной концентрированной операции и не предпола-

гают достижения при выполнении этой операции конечного эффекта – герметичного ниточного соединения.

Сравнительный анализ характеристик процессов получения водоотталкивающих и водонепроницаемых материалов и швей-

ных операций (табл. 1) показал, что наличие различий между ними требует предварительных исследований для принятия решения о возможности проектирования концентрированных операций.

Т а б л и ц а 1

Характеристика	Швейные операции	Придание водозащитных свойств материалам	
		водоотталкивающая отделка	пленочное покрытие
Воздействия	Механические и физико-механические	Физико-механические и химические	Физико-механические и химические
Объект	Многослойные пакеты однородных и разнородных материалов небольшой площади	Однослойный протяженный материал	Однослойный протяженный материал
Структура	Разделена на операции по видам воздействий, возможна различная комбинация и исключение операций	Многостадийная неразрывная без пропуска стадий	Многостадийная неразрывная индивидуальная для разных покрытий
Синхронизация стадий	Последовательная или последовательно-одновременная в зависимости от вида оборудования	Непрерывная последовательная	Непрерывная последовательная
Агент	Швейные нитки, пар (вода), горячий и холодный воздух	Гидрофобизирующий раствор, горячий воздух	Растворы, расплавы, дисперсии полимеров, горячий воздух, вода
Способ увлажнения	Пропаривание	Пропитка погружением в ванну и плюсование	Пропитка погружением и плюсование
Параметры пропитки (увлажнения)	$T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $W = 20-40\%$ ; пресс: $P = 0,4-0,5\text{ МПа}$ ; $\tau = 2-14\text{ с}$ ; расход пара – до $15\text{ м}^3/\text{ч}$ ; паровоздушный манекен: $P = 0,3-0,7\text{ МПа}$ при расходе $27-55\text{ м}^3/\text{ч}$ ; $\tau = 1-60\text{ с}$	$T = 25-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $C = 50-200\text{ г/л}$ (зависит от вида гидрофобизатора); $v = 0,5\text{ м/с}$ ; $P = 10-17\text{ кПа}$ ; $W = 25-60\%$	$T = 25-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $C = 12-18\%$ ; $\eta = 0,8\text{ Па}\cdot\text{с}$
Параметры нанесения покрытий	-	-	Каландровым способом $T = 120-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; кашировальным $T = 160-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; наносным способом; прямым из раствора $C = 18-25\%$ ; $\eta = 5-15\text{ Па}\cdot\text{с}$ и обратным, насыпным способом дублирования
Вид и параметры сушки	Контактная: $T = 120-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $P = 30\dots 120\text{ кПа}$ ; $\tau = 3-60\text{ с}$ (пресс); $\tau = 60-65\text{ с}$ на $30\text{ см}$ (утюг). Конвективная – горячим воздухом: $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ с расходом – $450-640\text{ м}^3/\text{ч}$ ; $\tau = 1-60\text{ с}$ ; $P = 0,2-0,5\text{ МПа}$	Контактная: $T = 120-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Конвективная: $T = 60-80\dots 100-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $v = 0,5\text{ м/с}$	Конвективная
Вид и параметры термообработки	Охлаждение конвективное – воздухом помещения: $\tau = 3-15\text{ с}$ (пресс), $\tau = 1-60\text{ с}$ (паровоздушный манекен)	Конвективная: аламин С, ГКЖ-94 – $T = 157-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $\tau = 180-480\text{ с}$ ; хромолан, пловнион ПЕГ, персистол Е не требуется	Конвективная одностадийная с повышением температуры: $T = 50-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Конвективная двухстадийная: $T = 140-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ – первая стадия, $125-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – окончательная (желирование)
Виды и способы декоративной отделки	Конструктивные, технологические, физико-химические	-	Лакирование, нанесение рисунков, окрашивание, тиснение, мятые, металлизация, шлифовка

Наиболее широко используемые операции – стачивающие. Проектирование концентрированных операций может быть основано на последовательном или параллельном соединении стачивания и герметизации химическими материалами (рис. 2, а, б).

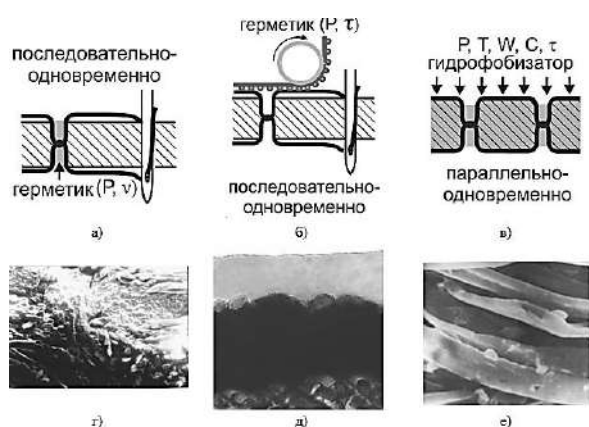


Рис. 2

Технология стачивания с последовательно-одновременным блокированием проколов материалов с водоотталкивающей отделкой гидрофобизатором плювион ПЕГ реализована в концентрированной комплексной операции (схематичное изображение герметизирующей обработки отверстия прокола ниточной строчки – см. рис. 2, а). Осуществление такой операции возможно только при использовании дополнительного устройства, установленного на универсальной швейной машине, работающего синхронно с ней и предполагающего при необходимости его отключение при полном сохранении всех технологических возможностей машины [1]. На основе экспериментальных исследований установлены рациональные сочетания двух основных входных параметров процесса подачи герметика: при вязкости герметизирующей жидкости в пределах 13...28 сСт давление подачи должно быть в интервале 1,9...3,9 кПа; при вязкости 35,6...45,18 сСт – соответственно 3,6... 4,9 кПа.

Концентрированная операция на основе группирования стачивания и герметизации швов водонепроницаемых изделий опирается на дополнительные последовательное или одновременное проклеивание швов герметизирующей пленкой (рис. 2, б). Для

специалистов она трансформируется в разработку специального герметизирующего материала и способа его фиксирования. Герметизирующие материалы должны полностью блокировать шов, легко перерабатываться, обеспечивать высокую адгезию даже на сложных поверхностях материалов, быть устойчивыми к гидролизу и нагреву, к воздействию агрессивных сред и циклических деформаций.

Наиболее эффективны для производства изделий из водонепроницаемых материалов протяженные водонепроницаемые ленты требуемой ширины, адгезионно активные к термореактивным и термопластичным текстильным материалам без необходимости теплового или химического активирования при приклеивании [1]. На основе акрилатных латексов разработаны бесосновные полимерные самоклеящиеся пленки в виде рулонной ленты шириной 1,5...3,0 см, обеспечивающие адгезионную прочность расслаивания не менее 6 Н/см при механическом давлении 20...30 кПа.

Идентичность происходящих физико-механических процессов при водоотталкивающей отделке текстильных материалов и влажно-тепловой обработке швейных изделий, а также существующий опыт совмещения химической модификации текстильных материалов и ВТО для проведения формоустойчивой отделки швейных изделий [4] позволяют сделать вывод о возможности выполнения одновременной влажно-теплогидрофобизирующей герметизации швейных изделий [1, 5].

ВТО свойственна наибольшая маневренность в изменении зоны воздействия за счет выбора не только оборудования, но и инструментов. Комплекс механических и физических факторов, действующих при ВТО, создает условия для интенсификации получения дополнительных эффектов с помощью химических веществ в виде парогидрофобной смеси. Для реализации концентрированной операции могут быть выбраны гидрофобизаторы, обеспечивающие заданный технологический эффект при минимальных подготовительных и основных затратах времени (при отсутствии



необходимости подогрева раствора и термообработки после герметизации). Влажно-теплогидрофобная обработка может быть использована для локальной обработки швов и узлов изделий из материалов с водоотталкивающей отделкой (достигается при этом повышение водоупорности в 1,5-2,0

раза) или для восстановления водозащитных свойств одежды в процессе эксплуатации. Рациональные значения технологических параметров ВТГО узлов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Наименование параметра	Вид гидрофобизатора			
	аламин С	ГКЖ-94	плювион ПЕГ	персистоль Е
Температура греющей поверхности, °С	166	160	160-170	170-180
Удельный расход раствора, $\times 10^{-3}$ м <sup>3</sup> ·м	0,020	0,021	0,020	0,020
Концентрация раствора, %	7,15	3,36	6,0	5,5
Удельное давление греющей поверхности, кПа	1,48	1,72	1,48-1,72	1,48-1,72
Масса утюга, кг	2,4	2,8	2,4-2,8	2,4-2,8
Скорость пароутюжительной обработки, м/с	0,013	0,013	0,013	0,013
Скорость термообработки, м/с	0,015	0,007	-	-

Рассматриваемые технологические схемы локальной герметизации швейных изделий из водоотталкивающих или водонепроницаемых материалов позволяют обеспечить определенный уровень защиты ниточных строчек и швов или деталей, узлов, части поверхности, а также всего изделия. На рис. 2, г-е представлены микрофотографии: г) отверстия прокола ниточной строчки, герметизированного при нижней подаче герметика с верхним отсосом, с увеличением  $3 \cdot 10^2$ ; д) клеевого соединения материала с резиновым покрытием и пленки БАК Ш16-82 с увеличением  $4 \cdot 10^2$ ; е) швейной нитки строчки после влажно-теплогидрофобной обработки с увеличением в  $10^3$ .

В зависимости от уровня водозащитного качества изделия, его назначения и условий использования, требований потребителя, исходных свойств материалов может быть применена та или иная технология герметизации.

Рационально применительно к тканям использовать подходы модифицирования, разработанные для других материалов. В частности, для высокопористых керамических материалов, применяемых в авиационно-ракетной техники, актуален вопрос их гидрофобизации с помощью низкомолекулярных фторполимеров. Была продемонстрирована принципиальная возможность их растворения в сверхкритическом диоксиде углерода, обеспечивавшая нане-

сение тонких фторполимерных покрытий на керамические волокна не только поверхности образца, но и во всем объеме пористого материала [6]. Предложенная методика резко улучшила гидрофобность материала, повысив его функциональность. Помимо этого разработан технологически более простой способ гидрофобизации, основанный на обработке материалов продуктами пиролиза низкоплавких промышленных фторпарафинов.

При проектировании технологии герметичного изготовления швейного изделия необходимо учитывать требуемый уровень качества водозащитного швейного изделия, т. е. необходимо ориентироваться не только на водозащитный эффект, обеспечиваемый материалом, но и на условия эксплуатации готового изделия. Для локальной герметизирующей обработки швейных изделий логичным является применение веществ, механизм воздействия которых имеет ту же природу, что и водозащитная отделка текстильных материалов: для водоотталкивающих материалов – гидрофобизаторов, для водонепроницаемых – полимерных пленок.

Затрачиваемые усилия на разработку и применение технологии герметизации швейного изделия – материальные, трудовые, финансовые затраты – должны соответствовать получаемому технологическому эффекту. Нет смысла стремиться к абсолютной водонепроницаемости большей

части изделий этого ассортимента. Изготовление одежды и технических изделий из материалов с водоотталкивающей отделкой должно быть выполнено с применением технологии герметизирующей обработки, которая позволит обеспечить:

- уменьшение проницаемости ниточных соединений;
- локальную обработку участков деталей и узлов, включая ниточные соединения;
- обработку больших участков швейного изделия и восстановление водозащитной функции после эксплуатации, ухода.

Наличие высокой водоупорности материалов с пленочным покрытием диктует выбор такой технологии локальной герметизации, которая обеспечивает соответствующий уровень водонепроницаемости швов без дополнительной обработки деталей. Использование готовых пленочных материалов позволит выполнить поставленную задачу.

## ВЫВОДЫ

Комбинированные технологии приходят на смену сложным непроизводительным процессам, позволяя улучшить качество изделий и увеличить существующее многообразие вариантов эффективной технологической организации при использовании концентрированных операций.

При проектировании технологии герметичного изготовления швейного изделия должен быть осуществлен выбор технологического подхода к решению поставленной проблемы. Он должен учитывать требуемый уровень качества водозащитного швейного изделия, т. е. при выборе технологии герметизации необходимо ориентироваться на водозащитный эффект, обеспечиваемый материалом, и условия эксплуатации готового изделия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Метелева О.В., Веселов В.В. Роль химии в процессах изготовления швейных изделий // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). 2002. Т. XLVI, № 1. С. 121...132.
2. Хубатхузин, А.А., Алексеев А.Н., Бондарь В.С. Полимерные композиты как альтернатива традици-

онным материалам // Костюмология. 2022, Т.7, №4. - URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/12TLKL422.pdf>.

3. Алдешов С.Е., Аман К.П., Кожобекова А.Е., Аманова Р.П., Буркит А.К., Мусина А.А. Роботизация текстильной промышленности в Республике Казахстан // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 4 (388). С. 117...123.

4. Кузьмичев, В.Е., Веселов В.В., Мельников Б.Н. Исследование процесса обработки швейных изделий паровыми активными средами // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 1983. № 1. С. 68...71.

5. Метелева О.В., Веселов В.В., Припеченкова Н.С. Новое в технологии изготовления водонепроницаемой одежды // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2003. № 2 (271). С. 76...80.

6. Беспалов А.С., Неведов Н.И., Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Бузник В.М. Особенности гидрофобизации высокопористых керамических материалов с помощью фторолигомеров // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. № 5 (77). С. 41...51.

## REFERENCES

1. Meteleva O.V., Veselov V.V. The role of chemistry in the processes of manufacturing garments // Russian Chemical Journal. Journal of the Russian Chemical Society named after D. I. Mendeleev. Modern problems of textile chemistry. Part 1. 2002. Т. XLVI, No. 1. S. 121...132.

2. Khubatkhuzin, A.A., Alekseev A.N., Bondar V.S. Polymer composites as an alternative to traditional materials // Costumology. 2022, Т.7, №4. - URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/12TLKL422.pdf>.

3. Aldeshov S.E., Aman K.P., Kojabekova A.E., Amanova R.P., Burkit A.K., Musina A.A. Robotization of the textile industry in the Republic of Kazakhstan / Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2020. № 4(388). P. 117...123.

4. Kuzmichev, V.E., Veselov V.V., Melnikov B.N. Study of the process of processing sewing products with steam active media // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Legkoi Promyshlennosti. 1983. № 1. P. 68... 71.

5. Meteleva O.V., Veselov V.V., Pripechenkova N.S. New in the technology of manufacturing water-permeable clothing // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2003, № 2 (271). P. 76...80.

6. Bepalov A.S., Nefedov N.I., Deev I.S., Kurshev E.V., Lonsky S.L., Buznik V.M. Features of hydrophobization of highly porous ceramic materials using fluoroligomers // Works of VIAM: electron. scientific-technical magazine. - 2019, № 5(77). P. 41...51.

Рекомендована НОЦ «Центр компетенций текстильной и легкой промышленности ИВГПУ». Поступила 06.09.23.

**ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРМЕНТАТИВНОГО МЯГЧЕНИЯ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЬНЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ПЛАТЬЕВО-БЛУЗОЧНОГО АССОРТИМЕНТА\***

**THE USE OF ENZYMATIC SOFTENING IN THE PRODUCTION  
OF LINEN DRESSES AND BLOUSES**

*C.B. АЛЕЕВА<sup>1</sup>, O.B. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, С.А. КОКШАРОВ<sup>2</sup>, Т.С. СОЛОДУШЕНКОВА<sup>1,3</sup>, Е.В. ЗОБНИНА<sup>4</sup>*  
*S.V. ALEEVA<sup>1</sup>, O.V.RADCHENKO<sup>1</sup>, S.A. KOKSHAROV<sup>2</sup>, T.S. SOLODUSHENKOVA<sup>1,3</sup>, E.V. ZOBNINA<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Ивановский государственный политехнический университет,  
<sup>2</sup>Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново,  
<sup>3</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
<sup>4</sup>ООО «Лидертекс», г. Иваново)

<sup>1</sup>Ivanovo State Polytechnic University,  
<sup>2</sup>G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo,  
<sup>3</sup>Ufa State Petroleum Technical University,  
<sup>4</sup>LLC "Lidertex", Ivanovo)

E-mail: svetlana19750710@gmail.com

*Работа посвящена актуальным вопросам расширения сферы использования льняных тканей в производстве одежды. Избыточная жесткость материалов затрудняет создание модных объемно-силуэтных форм, так как большинству из них присуща вариативность требуемого уровня жесткости материалов на разных участках в зависимости от объемной формы. Новые биохимические технологии позволяют реализовать метод градиентного мягчения деталей швейного изделия. Модификация плательных тканей проведена по варианту жидкостной обработки с использованием прочно адсорбирующихся целлюлаз с размером глобулы более 30 нм. Проведено экспериментальное исследование влияния активности целлюлаз на снижение жесткости материалов. Получена обобщенная модель регулируемого мягчения деталей изделия с учетом показателей жесткости исходного материала. Оценено влияние биообработки на изменение разрывной нагрузки и разрывного удлинения. Выявлена корреляция между показателями жесткости и формуемости биомодифицированных материалов. Установлено, что воздействие ферментов в зоне первичной клеточной стенки льняного волокна хоть и способствует значительному снижению жесткости, но не обеспечивает значимого повышения несминаемости материалов.*

*The work is devoted to topical issues of expanding the use of linen fabrics in the production of clothing. Excessive rigidity of materials makes it difficult to create fashionable three-dimensional silhouette forms. We demonstrate the variability of the required level of materials rigidity in different areas of a woman's dress, depending on the volumetric shape. New biochemical technologies make it possible to implement a method of gradient softening of sewing product parts. The modification of dresses fabrics was carried out according to the variant of liquid treat-*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (гос. контракт №3480ГС1/57516) с использованием оборудования ЦКП «Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований».

*ment using highly adsorbed cellulases with a globule size of more than 30 nm. An experimental study of the effect of cellulase activity on reducing the stiffness of materials was carried out. A generalized model of controlled softening of product parts is obtained, taking into account the stiffness of the source material. The influence of bio-treatment on the change in breaking load and breaking elongation is estimated. The correlation between the indicators of rigidity and formability of biomodified materials is revealed. It has been established that the effect of enzymes in the zone of the primary cell wall of flax fiber, although it contributes to a significant decrease in stiffness, does not provide a significant increase of material crease resistance.*

**Ключевые слова:** льняная одежда, мягчение полуфабрикатов, целлюлаза, жесткость при изгибе, формуемость, разрывная нагрузка, разрывное удлинение, несминаемость.

**Keywords:** linen clothing, softening of semi-finished products, cellulase, bending stiffness, formability, breaking load, breaking elongation, crease resistance.

Подбор материалов и регулирование их жесткости осуществляются не только для улучшения сенсорного комфорта одежды, но и для повышения технологичности ее изготовления и эксплуатационных свойств продукции [1, 2]. Способность плоской текстильной структуры деформироваться, чтобы соответствовать трехмерной поверхности без образования складок, перегибов или разрывов, характеризуется показателем формуемости (*formability*) [3]. Этот показатель зависит от различных свойств ткани, таких, как волокнистый состав, тип переплетения, степень крутки и плотность нитей. Основными характеристиками, связанными с формуемостью, являются формовочная способность, растяжимость при небольших нагрузках, уровень жесткости при изгибе [4, 5].

При изготовлении одежды платьевоблузочного ассортимента основные трудности возникают в связи с повышенной жесткостью льняных тканей, достигающей  $20 \text{ мН} \cdot \text{см}^2$  и более. Как правило, в этом случае применяются ткани с полным циклом подготовки в отбеленном или окрашенном виде либо с набивными рисунками. При прохождении подготовительных операций жесткость ткани возрастает, что связывают с извлечением гемицеллюлоз, разветвленные макромолекулы которых способствуют аморфизации льняного волокна и подвижности его структурных фрагментов

[6, 7]. Из жесткого материала невозможно получить изделия мягкой формы, прилегающие к телу в области талии или свободно струящиеся ниже бедер. С увеличением жесткости возрастает сминаемость материала, что приводит к ухудшению внешнего вида изделия при эксплуатации.

Разные виды финишной отделки могут как понижать, так и повышать жесткость льняных тканей [8]. При этом показано [9], что любой вид умягчающей отделки делает ткани более эластичными и улучшает формуемость. Однако химические смягчители, не имея прочной связи с волокном, вымываются в процессе стирок, что нарушает форму изделия. Стабильное улучшение формуемости без применения смягчителей могут обеспечить добавки к лубяному сырью более мягких волокон, например акриловых [10].

Эффект перманентного (устойчивого к многократным стиркам) смягчения достигается с помощью биохимической модификации льняного волокна, в частности с применением целлюлаз [11, 12]. Стимулом к поиску эффективных биотехнологических решений являются современные успехи генной инженерии в создании новых ферментных препаратов с узконаправленным спектром субстратного действия, более высокой стабильностью и меньшей стоимостью, что способствует расширению их использования малыми и средними предприятиями в сфере текстильной и легкой промышленности [13].

Основной задачей оптимизации условий мягчения целлюлазами является сокращение неминуемых потерь прочности материалов [14, 15]. Нами найден эффективный подход к снижению жесткости без негативных изменений физико-механических показателей за счет пространственной локализации действия целлюлаз в зоне первичной клеточной стенки льняного волокна [16]. В этом случае дополнительными критериями отбора ферментов для ограничения их проникновения вглубь волокна являются размер глобулы целлюлаз и прочность их адсорбции на твердофазном субстрате. Разрабатываемая технология способна решать важнейшую для швейного производства задачу зонированного изменения упруго-деформационных свойств материалов для создания необходимой объемной формы изделий.

В конструкции любого вида одежды характерно сочетание различных требований к жесткости материала на разных участках изделия. Желаемый уровень жесткости условных зон изделий платьевоблузочного ассортимента с разными объемно-силуэтными формами определен нами на основании анализа образцов женской одежды из различных материалов, считающихся «эталонными» при пошиве: шерстяных, хлопчатобумажных, смесовых. На рис. 1 показано распределение условных зон в конструкции женского платья. В табл. 1 указаны диапазоны значений жесткости зон для изделий разных объемно-силуэтных форм (подразделение по степени пластичности формы: «к» – каркасная, «м-ф» – мягко фиксированная, «м-п» – мягкопластичная; по объемности формы: «б» – большая, «у» – умеренная, «м» – малая).

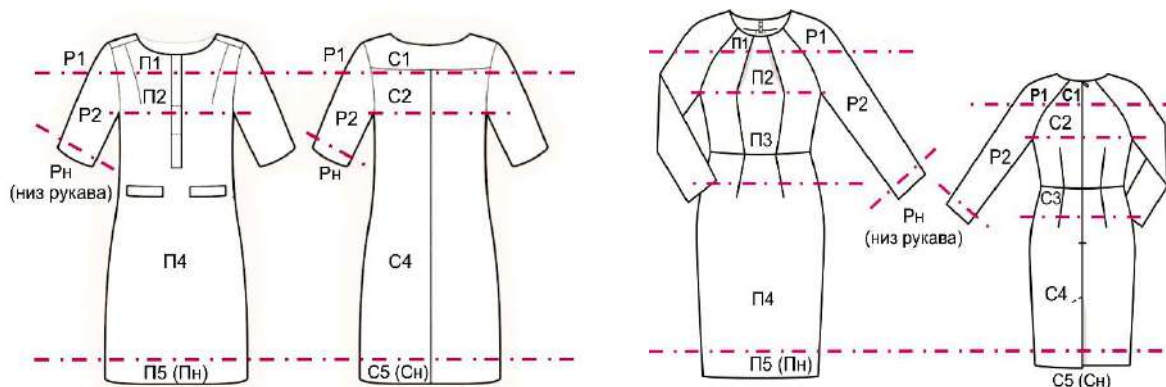


Рис. 1

Таблица 1

Условная зона изделия	Величина жесткости зоны $EI_3$ (мН·см <sup>2</sup> ) для вариантов объемной формы изделия								
	«б»			«у»			«м»		
	«м-п»	«м-ф»	«к»	«м-п»	«м-ф»	«к»	«м-п»	«м-ф»	«к»
П1; С1	5,1-9,0	9,5-16,6	17,7-32,0	3,4-6,2	6,4-12,5	15,0-26,3	2,2-4,2	4,3-8,5	8,9-17,5
П2; С2	3,7-7,3	7,5-12,4	13,8-26,0	2,5-4,4	5,3-8,6	11,1-21,0	1,6-2,9	3,1-6,5	7,5-14,6
П3*; С3*	4,0-7,9	8,2-14,7	16,0-32,4	2,9-5,7	5,8-12,0	13,0-23,8	1,8-3,7	3,8-7,6	8,0-15,9
П4; С4	2,5-5,0	5,1-8,5	10,1-20,0	1,7-3,0	3,6-6,8	7,6-15,0	1,1-2,0	2,1-4,5	5,1-10,0
П5; С5	3,4-6,3	7,0-11,5	13,5-27,5	2,1-3,9	5,0-8,5	9,6-19,0	1,4-2,5	2,7-5,8	6,4-13,0
Р1	2,5-7,0	5,1-12,0	10,1-31,5	1,7-4,2	3,6-9,0	7,6-23,0	1,1-2,7	2,1-6,0	5,1-15,2
Р2	2,5-5,0	5,1-8,5	10,1-20,0	1,7-3,0	3,6-6,8	7,6-15,0	1,1-2,0	2,1-4,5	5,1-10,0
Рн	3,4-6,3	7,0-11,5	13,5-27,5	2,1-3,9	5,0-8,5	9,6-19,0	1,4-2,5	2,7-5,8	6,4-13,0

\* Выделяется только в моделях прилегающего силуэта и отрезных по линии талии.

Данные табл. 1 демонстрируют нарастание жесткости с увеличением каркасности формы («м-п» → «м-ф» → «к» внутри одной объемной группы), а также с увеличением объема («м» → «у» → «б»). Максимальная жесткость наблюдается в плечевой зоне (П1, С1, Р1), минимальная – в зоне свободного расположения материала (П4, С4, Р2). Если исходный материал обладает большей жесткостью, чем требуется

симальная жесткость наблюдается в плечевой зоне (П1, С1, Р1), минимальная – в зоне свободного расположения материала (П4, С4, Р2). Если исходный материал обладает большей жесткостью, чем требуется

для проектируемой модели, необходимо использование технологий умягчения ткани. Если жесткость материала меньше требуемого уровня, необходимо применение швов жестких конструкций и дополнительных деталей (обтачек и прокладок).

Желаемые значения жесткости для большинства изделий «м-п» и «м-ф» форм значительно ниже величины показателя для большинства льняных тканей отечественного производства. Решение проблемы возможно путем введения в технологический процесс швейного производства новых приемов [16] для регулируемого изменения жесткости узлов и деталей изделия. Данный вариант согласуется с современными тенденциями рациональной организации производства одежды, предусматривающей проведение операций промывки материалов для удаления производственных загрязнений и несвязанного формальдегида, для релаксации внутренних напряжений в волокне, а также для нанесения дополнительных отделочных композиций [17, 18].

Цель исследования состоит в выявлении закономерностей для управления процессами мягчения полуфабрикатов из легких льняных тканей с использованием жидкостного способа биомодификации, предусматривающего обработку деталей кроя в объеме раствора биопрепарата, достаточном для набухания волокна.

#### Материалы и методы

Использованы три вида легких льняных тканей, отобранных для экспериментальной технологии пошива моделей женского платья в условиях ООО «Лидертекс». Ткани имеют полотняное переплетение, характеризуются невысокими значениями поверхностной плотности (менее 100 г/м<sup>2</sup>) и не подвергались умягчающим обработкам в текстильном производстве.

Свойства целлюлазного препарата для жидкостного способа биомодификации подбирали в соответствии с рекомендациями [19]. Оценку размера частиц в гидрозоле биопрепарата проводили методом динамического рассеяния света на анализаторе Zetasizer Nano ZS. С учетом поперечных размеров пор в набухшем льняном волокне предпочтительно использование

ферментных комплексов, в составе которых более 80% частиц имеют размеры свыше 30 нм. Прочность сорбционного связывания целлюлаз определяли по поглощению белка микрокристаллической целлюлозой [20] с расчетом константы адсорбции Генри  $K_p$  (л/г) по данным равновесного распределения фермента между раствором и твердофазным субстратом:

$$K_p = \frac{[A_a]}{[A_t]} \cdot C = \frac{[A_0] - [A_t]}{[A_t]} \cdot C, \quad (1)$$

где  $[A_a]$  – количество адсорбированного фермента, определяется по разности между исходным уровнем активности целлюлазы в растворе  $[A_0]$  (ед./мл) и остаточной активности в супернатанте  $[A_t]$  (ед./мл) при длительности выдержки суспензии до центрифугирования  $t = 15$  мин;

$C$  – концентрация микрокристаллической целлюлозы в суспензии (г/л).

На рис. 2 приведены результаты экспериментальной оценки распределения по размеру частиц величины относительного объема дисперсной фазы в растворе используемого биопрепарата (а) и кинетики сорбционного связывания целлюлолитических ферментов на микрокристаллической целлюлозе (б).

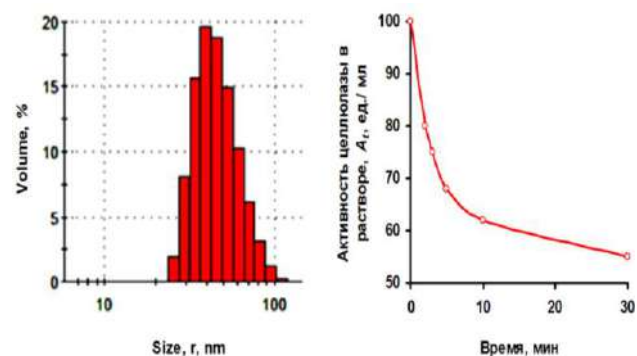


Рис. 2

Согласно приведенным на рис. 2 данным применяемый целлюлазный препарат имеет следующие значения регламентируемых технологических характеристик:

- суммарный объем фракций с размером более 30 нм  $V_m = 90\%$ ;
- константа адсорбции Генри  $K_p = 0,44$  л/г.

Подбор дозировки биопрепарата обеспечивал варьирование рабочих значений

активности целлюлазы в технологических растворах в диапазоне  $A = 20 \dots 45$  ед./мл.

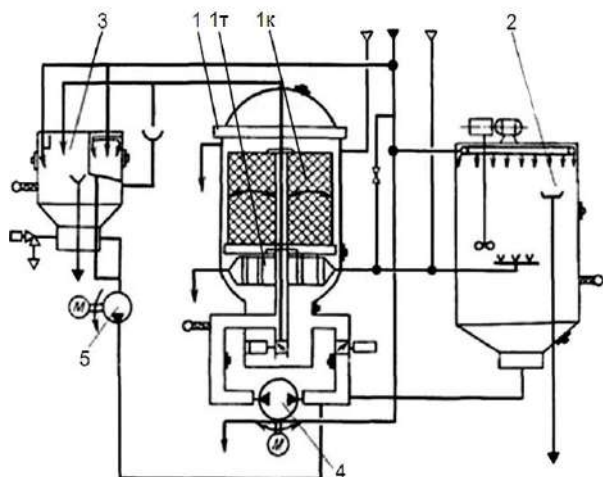


Рис. 3

На рис. 3 представлена схема установки, используемой для реализации жидкостного способа биомодификации льняных заготовок. Основными ее элементами являются: 1 – аппарат автоклавного типа с термостатом (1т) и перфорированной корзиной (1к) для образцов ткани; 2 – бак для приготовления раствора; 3 – бак для циркуляции раствора и введения реагентов во время обработки; 4 – циркуляционный насос; 5 – подпитывающий насос.

Установка предусматривает реверсивную циркуляцию жидкости от периферии к центру и обратно без механических воздействий на материал, что предупреждает его деформацию и обеспечивает сохранность геометрических параметров деталей кроя. Биообработку осуществляли в течение 40 мин при величине жидкостного модуля 20, рН 5,5 и температуре 40...45 °С. После промывки проточной водой образцы сушили в термошкафу при 80 °С в течение 4 ч, обеспечивая инактивацию ферментов.

Оценку технологических свойств льняных материалов осуществляли с применением стандартных методов текстильного материаловедения:

- жесткость при изгибе ( $EI$ , мН·см<sup>2</sup>) – консольным методом на приборе ПТ-2 в соответствии с ГОСТ 10550-93;

- разрывную нагрузку ( $P$ , кГс) и разрывное удлинение ( $L$ , %) – методом одно-

осного растяжения на разрывной машине согласно ГОСТ 3813-72;

- несминаемость в сухом и мокром состоянии – на приборе СМТ в соответствии с ГОСТ 19204-73.

Формуемость образцов ( $F$ , %) определяли по способности материалов повторять сферическую поверхность в соответствии с методом по патенту [21].

#### Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлены характеристики исходного состояния исследуемых тканей в порядке присвоенной им нумерации.

Таблица 2

№ п/п	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Жесткость $EI_0 \pm 1,5$ мН·см <sup>2</sup>	
		основа	уток
1	90,4	14,5	45,7
2	84,6	33,1	10,1
3	74,0	21,6	25,8

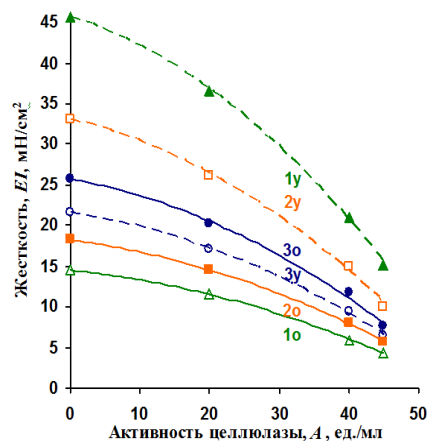


Рис. 4

Особенность отобранного ассортимента состоит в том, что только образец 3 характеризуется близким уровнем показателя жесткости в направлении нитей основы  $EI_0$  и утка  $EI_y$ . В образце 2 величина  $EI_0$  почти в 3 раза превышает значение показателя  $EI_y$ . В образце 1 устойчивость к изгибу в продольном и поперечном направлениях различается в 3 раза. Такое деформационное поведение текстильного материала представляет большую сложность в создании заданной объемной формы одежды. Применяемый способ биомодификации позволяет существенно сократить различие между значениями  $EI_0$  и  $EI_y$ . Об этом свидетельствуют представленные на рис. 4

зависимости влияния активности целлюлазы ( $A$ ) на изменение жесткости биомодифицированных образцов.

Прогрессирующее снижение жесткости с ростом величины  $A$  может быть описано полиномом второй степени с высокими значениями коэффициента детерминации  $R^2$ . Корреляционные уравнения для образца 1 в направлении нитей основы и утка имеют следующий вид:

$$EI_{1_0} = 14,517 - 0,0863 \cdot A - 0,0031 \cdot A^2; R^2 = 0,9994, \quad (2)$$

$$EI_{1_y} = 45,652 - 0,2631 \cdot A - 0,009 \cdot A^2; R^2 = 0,9995. \quad (3)$$

Изменение жесткости при биомодификации образца 2 описывается уравнениями:

$$EI_{2_0} = 33,039 - 0,195 \cdot A - 0,0068 \cdot A^2; R^2 = 0,9985, \quad (4)$$

$$EI_{2_y} = 18,182 - 0,1057 \cdot A - 0,0038 \cdot A^2; R^2 = 0,9996. \quad (5)$$

Для образца 3 справедливы уравнения:

$$EI_{3_0} = 21,573 - 0,1271 \cdot A - 0,0046 \cdot A^2; R^2 = 0,9993, \quad (6)$$

$$EI_{3_y} = 25,731 - 0,152 \cdot A - 0,0054 \cdot A^2; R^2 = 0,9968. \quad (7)$$

Несложно заметить, что величины свободного члена в уравнениях (2) – (7) соответствуют исходным значениям показателя жесткости  $EI_0$  для соответствующей группы нитей модифицируемых льняных полотен (см. табл. 2). Вынесением показателя  $EI_0$  за скобки в качестве общего множителя получаем обобщенную модель для подбора активности целлюлазы и достижения необходимого уровня жесткости умягченных деталей швейного изделия  $EI_s$ :

$$EI_s = EI_0(1 - 0,0059 \cdot A - 0,0002 \cdot A^2). \quad (8)$$

Регулирование параметра  $A$  позволяет не только получить необходимое качество полуфабрикатов, но и минимизировать затраты на биообработку. Технология предполагает дальнейшее применение растворов с пониженным уровнем  $A$  для обработки следующих групп деталей изделия, требующих меньшую степень умягчения. Определенная группа деталей с учетом свойств материала может использоваться при монтаже изделия без умягчающей отделки.

Данные табл. 3 демонстрируют наибольшую величину отклонения разрывных характеристик льняных материалов при максимальной активности целлюлаз в технологическом растворе ( $A = 45$  ед.мл).

Таблица 3

№ п/п	Мягчение	Разрывная нагрузка $P \pm 0,5$ кгс		Разрывное удлинение $L \pm 0,7$ %	
		основа	уток	основа	уток
1	–	45,5	56,0	21,9	14,9
	+	43,5	53,5	23,7	21,9
2	–	47,0	35,5	17,4	21,3
	+	44,5	34,5	22,5	22,5
3	–	35,5	58,0	14,5	13,0
	+	33,5	55,5	18,7	17,4

Полученные результаты свидетельствуют, что используемый вариант биомодификации льняных материалов, обеспечивая снижение жесткости в 3...3,5 раза, практически не ухудшает прочностные свойства материалов. Снижение показателя разрывной нагрузки ( $P$ ) не превышает 4...7%. При этом величина разрывного удлинения ( $L$ ) после биомодификации возрастает в 1,1...1,5 раза. Это характеризует улучшение деформационной способности волокна и закономерно отражается в повышении пластичности льняных полуфабрикатов. Показатели формуемости материалов после биомягчения возрастают в 1,3...1,7 раза. На рис. 5 сопоставлены значения жесткости и формуемости материалов до и после умягчения ( $A = 45$  ед./мл).

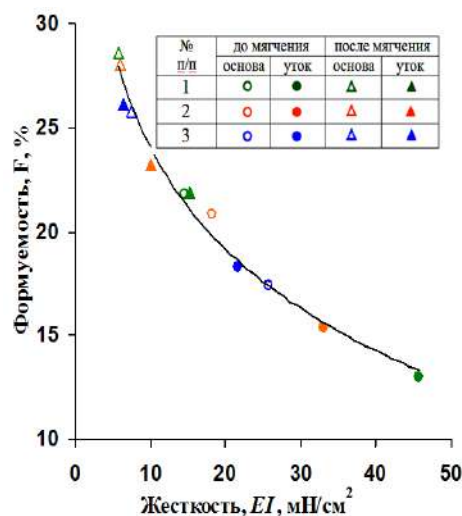


Рис. 5



Обратная пропорциональность в изменении этих важных технологических характеристик льняных полуфабрикатов с высокой степенью корреляции аппроксимируется логарифмической зависимостью:

$$F = 40,278 - 7,09 \cdot \ln EI_s; R^2 = 0,9819. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (8) и (9) позволяет проектировать необходимый уровень формуемости ткани в определенных зонах швейного изделия для создаваемой объемно-силуэтной формы.

С учетом сведений о получении на джинсовых тканях комплексных эффектов ферментативного умягчения и повышения несминаемости [8, 22] проведена оценка влияния периферийного воздействия целлюлаз в поверхностном слое льняного волокна на способность материала сохранять форму под действием сминающих нагрузок. В табл. 4 представлены данные изменения устойчивости образцов к смятию в сухом и мокром состоянии после биообработки ( $A = 45$  ед./мл).

Таблица 4

№ п/п	Мягчение	Несминаемость, %			
		сухое состояние		мокрое состояние	
		основа	уток	основа	уток
1	-	32,6	33,8	33,8	38,6
	+	37,4	38,1	44,7	46,0
2	-	27,9	26,4	33,5	34,0
	+	33,1	37,6	44,3	45,3
3	-	30,4	26,9	34,2	38,6
	+	35,7	33,1	39,2	42,5

Несминаемость в сухом состоянии возрастает в 1,04...1,4 раза, в мокром состоянии – в 1,1...1,34 раза. Вместе с тем полученные результаты далеки от требуемого уровня показателей согласно ГОСТ 15968-87. В лучшем случае можно стремиться к достижению требований для отделки «ЛГ» (в мокром состоянии не менее 45%). При воздействии сминающей нагрузки в сухом состоянии полученные результаты в 1,2...1,4 раза хуже установленного норматива для отделки «МС» (не менее 42%). Следовательно, повышение эксплуатационных свойств льняной одежды является актуальной задачей для дальнейших исследований.

Получено экспериментальное обоснование возможности реализации технологии градиентного мягчения полуфабрикатов при изготовлении льняной одежды, которая обеспечивает получение деталей кроя с уровнем жесткости материала, соответствующим требованиям для определенных конструкционных зон в изделиях различных объемно-силуэтных форм. Вариант жидкостной биообработки предполагает использование прочно адсорбирующихся целлюлаз, характеризующихся величиной константы адсорбции Генри 0,44 л/г и 90%-ным содержанием глобул биокатализатора с размером более 30 нм.

Получены зависимости для описания влияния активности целлюлазы в технологическом растворе на эффективность мягчения с учетом исходного уровня жесткости материала в направлении нитей основы и утка. Варьирование активности фермента в диапазоне 20...45 ед./мл обеспечивает регулируемое снижение жесткости в 1,3...3,5 раза. При этом максимальное снижение разрывной нагрузки образцов не превышает 7%.

Выявлено корреляционное соотношение для оптимизации условий биообработки и достижения необходимого уровня формуемости умягченных льняных материалов. Показано, что специфические условия периферийного воздействия целлюлаз в структуре льняного волокна улучшают восстановление материалов после смятия в мокром состоянии. Однако уровень несминаемости в сухом состоянии в 1,2...1,4 раза ниже нормативных требований для малосминаемой отделки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Го М., Кузьмичев В.Е. Прогнозирование объема и комфортности систем «фигура-платье» из разных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2014. № 1. С. 129...136.
2. Ezazshahabi N., Mousazadegan F., Saharkhiz S. et al. Determining formability function of worsted woven fabrics in terms of fabric direction // J. Eng. Fibers Fabr. 2015, 10, 2. P. 1...10. – <https://doi.org/10.1177/155892501501000201>
3. Mozafary V., Payvandy P., Bidoki S.M. et al. Predicting the influence of seam design on formability

and strength of nonwoven structures using artificial neural network // *Fibers Polym.* 2013, 14, 9. P. 1535...1540. – <https://doi.org/10.1007/s12221-013-1535-z>

4. *Sztandera LM, Cardello AV, Winterhalter Cet al.* Identification of the most significant comfort factors for textiles from processing mechanical, handfeel, fabric construction, and perceived tactile comfort data // *Text. Res. J.* 2013, 83. P. 34...43. – <https://doi.org/10.1177/0040517512438121>

5. *Frydrych I., Matusiak M.* Influence of structure and finishing of woven fabrics on their formability // *Int. J. Cloth. Sci. Technol.* 2015, 27, 3. P. 447...459. <https://doi.org/10.1108/IJCST-07-2014-0085>

6. *Алеева С.В.* Влияние содержания лигнина и гемицеллюлоз на жесткость тканых полотен // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 2013. № 5. С. 129...131.

7. *Солодушенкова Т.С., Корнилова Н.Л., Кокшаров С.А. и др.* Влияние полимерных компонентов льняного волокна на жесткость тканого полотна // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 2022. № 4. С. 128...135. – [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2022\\_4\\_128](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_4_128)

8. *Dalbaşı E.S.N., Kayseri G.Ö.* A research on the comfort properties of linen fabrics subjected to various finishing treatments // *J. Nat. Fibers.* 2019, 18, 2. – <http://doi.org/10.1080/15440478.2019.1675210>

9. *Naujokaitytė L., Strazdiene E.* The effect of finishing upon textile mechanical properties at low loading // *Materials Science (Medžiagotira).* 2007, 13, 3. P. 249...254.

10. *Novakovic M.S., Popović D., Mladenović N. et al.* Development of comfortable and eco-friendly cellulose based textiles with improved sustainability // *J. Clean. Prod.* 2020, 267, 2. 122154. – <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122154>

11. Патент RU 2372430C1. Ферментативный способ заключительной умягчающей отделки льняных тканей. МКИ D06M 16/00. Заявл. 19.05.2008. Оpubл. 10.11.2009, БИ № 31.

12. *Ленько К.А., Ясинская Н.Н., Скобова Н.В.* Инновационный подход к решению проблемы умягчения льняных материалов // *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы.* 2020. № 1. С. 324...328. – [http://doi.org/10.47367/2413-6514\\_2020\\_1\\_324](http://doi.org/10.47367/2413-6514_2020_1_324)

13. *Stănescu M.D.* Applications of enzymes in processing cellulosic textiles – A review of the latest developments // *Cellul. Chem. Technol.* 2023, 57, 1-2. P. 1...15. – <http://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2023.57.01>

14. *Guo Y., Sun Z., Guo X. et al.* Study on enzyme washing process of hemp organic cotton blended fabric // *Int. J. Cloth. Sci. Technol.* 2019, 31. 58...64. – <https://doi.org/10.1108/IJCST-08-2017-0117>

15. *Marzoug I., Cheriaa R.* Effects optimization of bio-polishing industrial process parameters // *JTST.* 2023, 9, 1. P. 30...51. – <http://doi.org/10.4236/jtst.2023.91003>

16. *Koksharov S.A., Bikbulatova A.A., Kornilova N.L. et al.* Justification of an approach to cellulases application in enzymatic softening of linen fabrics and clothing // *Text. Res. J.* 2022, 92, 21–22. P. 4208...4229. – <http://dx.doi.org/10.1177/00405175221101018>

17. Патент CN 111074533A. D06M 11/155. Non-ironing processing method for flax ready-made clothes. Priority 18.10.2018. – <https://patents.google.com/patent/CN111074533A/en?q=CN+111074533A> (дата обращения 5.09.2023).

18. Патент CN 111074578A. D06M 15/17. Method for anti-wrinkle treatment of clothes by using glycerin rosin resin. Priority 18.10.2018. – <https://patents.google.com/patent/CN111074578A/en?q=CN+111074578A> (дата обращения 5.09.2023).

19. *Алеева С.В., Лепилова О.В., Кокшаров С.А. и др.* Ферментативная умягчающая обработка льняных изделий: воздействие целлюлаз в структуре набухшего волокна // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 2022. № 5. С. 126...134. – [http://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2022\\_5\\_126](http://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_5_126)

20. *Короткова О.Г., Семенова М.В., Рубцова Е.А. и др.* Сравнительный анализ рекомбинантной эндо-1,4-глюкоказы II и ее химерных форм с целлюлозо-связывающим модулем // *Вестник Московского университета. Сер. Химия.* 2019, 60, 5. С. 296...303. <https://doi.org/10.3103/S0027131419050067>

21. Патент RU 2343477C2. Способ определения формовочной способности текстильного материала. МКИ G01N 33/36. Заявл. 25.12.2006. Оpubл. 10.01.2009.

22. *Islam R., Mahmud S.F., Begum S.* Comparison of enzyme & bleach washed knitted denim (Z Twill) treated with different amount of softening & anti-creasing agent // *IJSAR.* 2020, 7, 9. 27...37. – <https://doi.org/10.4236/jtst.2020.63010>

## REFERENCES

1. *Guo M., Kuzmichev V.Ye.* Predicting the volume and comfortability characteristics in the systems “body-dress” for different types of materials// *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2014, 349, 1. P. 129...136.

2. *Ezazshahabi N., Mousazadegan F., Saharkhiz S. et al.* Determining formability function of worsted woven fabrics in terms of fabric direction // *J. Eng. Fibers Fabr.* 2015, 10, 2. P. 1...10. – <https://doi.org/10.1177/155892501501000201>

3. *Mozafary V., Payvandy P., Bidoki S.M. et al.* Predicting the influence of seam design on formability and strength of nonwoven structures using artificial neural network // *Fibers Polym.* 2013, 14, 9. P. 1535...1540. – <https://doi.org/10.1007/s12221-013-1535-z>

4. *Sztandera LM, Cardello AV, Winterhalter Cet al.* Identification of the most significant comfort factors for textiles from processing mechanical, handfeel, fabric construction, and perceived tactile comfort data // *Text. Res. J.* 2013, 83. P. 34...43. – <https://doi.org/10.1177/0040517512438121>

5. *Frydrych I., Matusiak M.* Influence of structure and finishing of woven fabrics on their formability // *Int. J. Cloth. Sci. Technol.* 2015, 27, 3. P. 447...459. – <https://doi.org/10.1108/IJCST-07-2014-0085>

6. *Aleeva S.V.* Influence of lignin and hemicellulose content on stiffness of linen fabrics // *Izvestiya*

Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2013, 347, 5. P. 129...131.

7. *Solodushenkova T.S., Kornilova N.L., Koksharov S.A. et al.* Influence of linen fiber polymeric components on the rigidity of woven fabric // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022, 400, 4. P. 128...135. – [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2022\\_4\\_128](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_4_128)

8. *Dalbaşı E.S.N., Kayseri G.Ö.* A research on the comfort properties of linen fabrics subjected to various finishing treatments // *J. Nat. Fibers*. 2019, 18, 2. – <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2019.1675210>

9. *Naujokaitytė L., Strazdiene E.* The effect of finishing upon textile mechanical properties at low loading // *Materials Science (Medžiagotira)*. 2007, 13, 3. P. 249...254.

10. *Novakovic M.S., Popović D., Mladenović N. et al.* Development of comfortable and eco-friendly cellulose based textiles with improved sustainability // *J. Clean. Prod.* 2020, 267, 2. 122154. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122154>

11. Patent RU 2372430C1. D06M 16/00. Enzymatic method of final softening of linen dressing. Priority 19.05.2008. – <https://patents.google.com/patent/RU2372430C1/en?q=RU+2372430> (accessed 5.09.2023).

12. *Lenko K.A., Yasinskaya N.N., Skobova N.V.* Innovative approach to solving the problem of softening of linen materials // *Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials (SMARTEX)*. 2020, 1. P. 324...328. – [http://dx.doi.org/10.47367/2413-6514\\_2020\\_1\\_324](http://dx.doi.org/10.47367/2413-6514_2020_1_324)

13. *Stănescu M.D.* Applications of enzymes in processing cellulosic textiles – A review of the latest developments // *Cellul. Chem. Technol.* 2023, 57, 1-2. P. 1...15. – <http://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2023.57.01>

14. *Guo Y., Sun Z., Guo X. et al.* Study on enzyme washing process of hemp organic cotton blended fabric // *Int. J. Cloth. Sci. Technol.* 2019, 31. 58...64. – <https://doi.org/10.1108/IJCST-08-2017-0117>

15. *Marzoug I., Cheriaa R.* Effects optimization of bio-polishing industrial process parameters // *JTST*. 2023, 9, 1. P. 30...51. – <http://doi.org/10.4236/jtst.2023.91003>

16. *Koksharov S.A., Bikbulatova A.A., Kornilova N.L. et al.* Justification of an approach to cellulases application in enzymatic softening of linen fabrics and clothing // *Text. Res. J.* 2022, 92, 21–22. P. 4208... 4229. – <http://dx.doi.org/10.1177/00405175221101018>

17. Patent CN 111074533A. D06M 11/155. Non-ironing processing method for flax ready-made clothes. Priority 18.10.2018. – <https://patents.google.com/patent/CN111074533A/en?q=CN+111074533A> (accessed 5.09.2023).

18. Patent CN 111074578A. D06M 15/17. Method for anti-wrinkle treatment of clothes by using glycerin rosin resin. Priority 18.10.2018. – <https://patents.google.com/patent/CN111074578A/en?q=CN+111074578A> (accessed 5.09.2023).

19. *Aleeva S.V., Lepilova O.V., Koksharov S.A. et al.* Enzymative softening treatment of linen products: The impact of cellulases in the structure of a sweet fiber // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022, 401, 5. P. 126...134. – [http://dx.doi.org/10.47367/0021-3497\\_2022\\_5\\_126](http://dx.doi.org/10.47367/0021-3497_2022_5_126)

20. *Korotkova O.G., Semenova M.V., Rubtsova E.A., et al.* Comparative analysis of the properties of recombinant endo-1,4-β-glucanase II and its chimeric form with a cellular binding module // *Moscow Univ. Chem. Bull.* 2019, 74, 5. P. 223...228. – <https://doi.org/10.3103/S0027131419050067>

21. Patent RU 2343477C2. G01N 33/36. Method for determining the molding ability of a textile material. Priority 25.12.2006. – <https://patents.google.com/patent/RU2343477C2/ru> (accessed 5.09.2023).

22. *Islam R., Mahmud S.F., Begum S.* Comparison of enzyme & bleach washed knitted denim (Z Twill) treated with different amount of softening & anti-creasing agent // *IJSAR*. 2020, 7, 9. 27...37. – <https://doi.org/10.4236/jtst.2020.63010>

Рекомендована НОЦ «Центр компетенций текстильной и легкой промышленности» ИВГПУ. Поступила 14.09.23.

УДК 677.014-615.468

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_164

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ СОРНЫХ ЧАСТИЦ  
В ИЗОГНУТОЙ ЧАСТИ ТРУБОПРОВОДА ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЛЯ РАССОРТИРОВКИ ВОЛОКОН\***

**THEORETICAL STUDIES OF THE PROCESS OF REMOVING ADVENTITIOUS IMPURITIES  
IN THE CURVED PART OF THE PIPELINE OF FIBER SORTING EQUIPMENT**

*И.Г. ХОСРОВЯН<sup>1</sup>, С.А. РОДИОНОВ<sup>1</sup>, А.Г. ХОСРОВЯН<sup>1</sup>  
А.С. МКРТУМЯН<sup>2</sup>, Г.А. ХОСРОВЯН<sup>1</sup>*

*I.G. KHOSROVYAN<sup>1</sup>, S.A. RODIONOV<sup>1</sup>, A.G. KHOSROVYAN<sup>1</sup>,  
A.S. MKRTUMYAN<sup>2</sup>, G.A. KHOSROVYAN<sup>1</sup>*

*(Ивановский государственный политехнический университет<sup>1</sup>,  
ООО «К-ТЕКС»<sup>2</sup>)*

*(Ivanovo State Polytechnical University<sup>1</sup>,  
LLC «K-TEX»<sup>2</sup>)*

E-mail: khosrovyan\_haik@mail.ru

*В статье приводятся результаты теоретических исследований процесса удаления сорных примесей на закругленном участке трубопровода разработанного оборудования. Предложена методика и получена зависимость для определения смещения сорной частицы, которое происходит под воздействием центробежных и аэродинамических сил, возникающих благодаря движению волокнистой массы и форме трубопровода. Получено численное значение величины смещения сорной частицы и определен оптимальный расход воздуха для удаления сорных частиц.*

*The article deals with theoretical studies of the process of removing adventitious impurities in the developed equipment on a rounded section of the pipeline. A technique has been developed and a dependence obtained to determine the displacement of an impurity, which occurs under the influence of centrifugal and aerodynamic forces arising from the movement of the fibrous mass and the shape of the pipeline. The numerical value of the displacement of adventitious impurities was obtained and the optimal air flow rate for the removal of adventitious impurities was determined.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и Департамента экономического развития и торговли Ивановской обл., проект № 20-43-370010 «Теория и технологии получения инновационных материалов для различных отраслей народного хозяйства с использованием льноволокна».

**Ключевые слова:** закругленный участок трубопровода, сорные частицы, центробежные силы, аэродинамические силы, смещение сорной частицы.

**Keywords:** rounded section of the pipeline, adventitious impurities, centrifugal forces, aerodynamic forces, displacement of adventitious impurities.

В технологическом процессе на этапе разрыхления, разволокнения волокнистой массы из котонизированных и/или регенерированных волокон, а также рассортировки волокон, их транспортировки важную роль играет своевременное удаление сорных примесей, выделяющихся из волокнистой массы [1], [2]. Поэтому при модернизации оборудования [3], [4], которое обеспечивает высокую степень разрыхления, рассортировки волокон и их очистки, большое внимание уделяется дополнительной очистке в зоне транспортировки комплексов волокон с содержанием сорных примесей для обеспечения значительного улучшения в дальнейшем процесса получения одиночных волокон [5], [6].

Выполнены теоретические исследования процесса удаления сорных частиц в изогнутой части трубопровода разработанного оборудования, представленные ниже.

Рассмотрим движение сорной частицы в закругленной части трубы прямоугольного сечения, а именно в области, прилегающей к внешней стенке трубы (рис. 1), где  $|M_{Oт}| = R_0$ ,  $|M_{Oт}, M| = \delta$ ,  $|OM| = r$ .

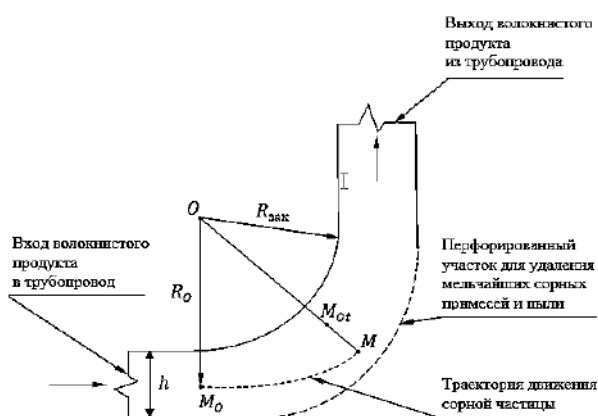


Рис. 1

Сорная частица начинает свое движение от точки  $M_0$ . Расстояние от точки  $O$  до

$M_0$  составляет  $R_0$ . При дальнейшем движении частица благодаря действию центробежных сил оказывается в точке  $M$ . Расстояние по радиусу от точки  $M_{0т}$  до точки  $M$  равно  $\delta$ . Введем следующие обозначения:  $V_{га}$  – средняя скорость воздуха в трубе;  $R_1, R_2$  – внутренний и внешний радиусы закругления трубы;  $r$  – текущий радиус расположения центра массы сорной частицы;  $V_{виг}$  – скорость витания сорной частицы;  $m$  – масса сорной частицы;  $h$  – высота канала;  $V_r$  – радиальная скорость сорной частицы.

Пренебрегая силой притяжения, считаем, что окружная скорость сорной частицы в каждой точке совпадает со скоростью воздушного потока. Центробежная сила, действующая на сорную частицу в трубопроводе в точке  $r = R_0 + \delta$ , выражается формулой

$$F_c = m \frac{v_{га}^2}{R_0 + \delta}. \quad (1)$$

Полагаем, что формулу (1) можно приближенно записать в виде

$$F_c = m \frac{v_{га}^2}{R_{зак} + h}. \quad (2)$$

Аэродинамическая сила, действующая на сорную частицу в трубопроводе по радиальному направлению, определяется по формуле

$$F_a = \frac{mgv_r^2}{V_{виг}^2}, \quad (3)$$

Движение сорной частицы по радиальному направлению трубопровода моделируется следующим уравнением:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{v_{га}^2}{R_{зак} + h} - \frac{gv_r^2}{V_{виг}^2}. \quad (4)$$

Так как

$$v_r = \frac{d\delta}{dt} \text{ и } dt = \frac{d\delta}{v_r}, \quad (5)$$

то

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{dv_r}{dt} = \frac{v_r dv_r}{d\delta} = \frac{dv_r^2}{2d\delta}. \quad (6)$$

Следовательно,

$$\frac{dv_r^2}{2d\delta} = \frac{v_{ra}^2}{R_{zak}+h} - \frac{gv_r^2}{v_{бит}^2} \quad (7)$$

или

$$\frac{dv_r^2}{d\delta} = \frac{2v_{ra}^2}{R_{zak}+h} - \frac{2gv_r^2}{v_{бит}^2}. \quad (8)$$

Обозначим

$$A = \frac{2v_{ra}^2}{R_{zak}+h}, \quad (9)$$

$$B = \frac{2g}{v_{бит}^2}. \quad (10)$$

Тогда уравнение динамики сорной частицы будет иметь следующий вид:

$$\frac{dv_r^2}{d\delta} = A - Bv_r^2. \quad (11)$$

Находим, что

$$\frac{dv_r^2}{A - Bv_r^2} = d\delta. \quad (12)$$

Интегрируем правую и левую части уравнения

$$\int_0^{v_r^2} \frac{dv_r^2}{A - Bv_r^2} = \delta \quad (13)$$

или

$$\frac{-1}{B} \int_0^{v_r^2} \frac{d(A - Bv_r^2)}{A - Bv_r^2} = \delta. \quad (14)$$

Следовательно,

$$\ln|A - Bv_r^2| - \ln A = -B\delta \quad (15)$$

или

$$\ln\left|1 - \frac{B}{A}v_r^2\right| = -B\delta. \quad (16)$$

Отсюда находим, что

$$1 - \frac{B}{A}v_r^2 = \exp(-B\delta), \quad (17)$$

и получаем в итоге, что

$$v_r^2 = \frac{A}{B}[1 - \exp(-B\delta)]. \quad (18)$$

Далее имеем, что

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{A}{B}} \sqrt{[1 - \exp(-B\delta)]}. \quad (19)$$

Так как  $\exp(-B\delta) \ll 1$ , то

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{A}{B}}. \quad (20)$$

Так как

$$\sqrt{\frac{A}{B}} = \sqrt{\frac{2v_{ra}^2}{R_{zak}+h} \frac{v_{бит}^2}{2g}} = \frac{v_{ra} v_{бит}}{\sqrt{g(R_{zak}+h)}}, \quad (21)$$

то

$$\delta = \frac{v_{ra} v_{бит} t}{\sqrt{g(R_{zak}+h)}} \quad (22)$$

Среднее время прохождения сорной частицы по закругленной части трубы определяется из соотношения:

$$t_{пов} = \frac{0,5\pi(R_{zak}+0,5h)}{v_{ra}}. \quad (23)$$

Следовательно, смещение сорной частицы за время поворота относительно точки О на угол  $0,5\pi$  равно:

$$\delta_{пов} = \frac{v_{ra} v_{бит} t_{пов}}{\sqrt{g(R_{zak}+h)}} = \frac{0,5\pi v_{бит} (R_{zak}+0,5h)}{\sqrt{g(R_{zak}+h)}}. \quad (24)$$

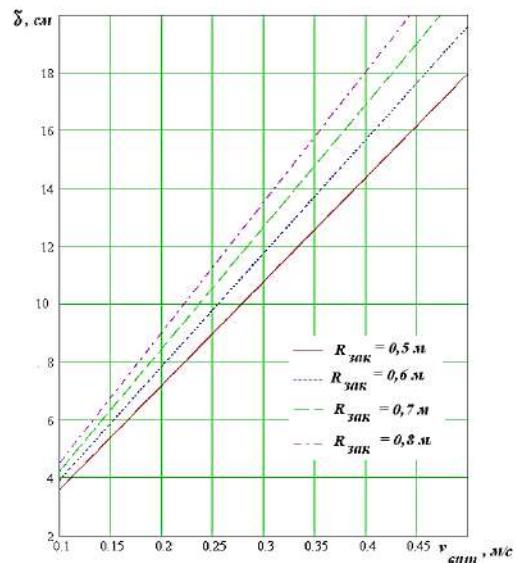


Рис. 2

На рис. 2 представлен график зависимости величины смещения  $\delta$  сорной частицы от скорости ее витания при различных  $R_{\text{зак}}$  ( $h=0.2$  м).

Как следует из расчетов, с изменением скорости витания от 0,1 до 0,5 м/с отклонение сорных частиц за время их прохождения по изогнутой части трубы возрастает с 4 до 20 см.

Необходимо отметить, что смещение сорной частицы происходит под воздействием центробежных и аэродинамических сил, возникающих благодаря движению волокнистой массы и форме трубопровода.

В изогнутой части трубопровода, имеющей перфорированную поверхность, под воздействием пневмоотсоса смещенные сорные частицы легко захватываются и удаляются. Расход воздуха составляет 0,15-0,20 м<sup>3</sup>/с.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика и получена зависимость для определения смещения сорной частицы, которое происходит под воздействием центробежных и аэродинамических сил, возникающих благодаря движению волокнистой массы и форме трубопровода.

2. Получено численное значение величины смещения сорной частицы и определен оптимальный расход воздуха для удаления сорных частиц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хосровян А.Г., Хосровян Г.А. Математическое моделирование процесса очистки волокнистых материалов в разрыхлителе-очистителе // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 4 (106). Ч. 1. С. 86...92.

2. Жукова А.А., Хосровян А.Г., Хосровян Г.А. Разработка технологии и оборудования для подготовки полуфабрикатов из текстильных отходов и вторичного сырья для изготовления композиционных текстильных материалов различного назначения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. №6. С. 184...188.

3. Тувин М.А., Хосровян И.Г., Красик Т.Я., Хосровян Г.А. Математическое моделирование аэродинамической рассортировки волокон в устройстве для получения многослойных нетканых материалов

// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. №6. С. 119...122.

4. Патент 2471897 Российская Федерация. Способ получения многослойных волокнистых материалов и устройство для его осуществления / Хосровян Г.А., Хосровян А.Г., Красик Т.Я., Хосровян И.Г., Жегалина Т.В. – Оpubл. 10.01.2013.

5. Патент 2595992 Российская Федерация. Способ получения многослойных волокнистых материалов и устройство для его осуществления / Г.А. Хосровян, Т.Я. Красик, М.А. Тувин, И.Г. Хосровян. – Оpubл. 05.08.2016.

6. Родионов С.А., Хосровян А.Г., Жукова А.А., Хосровян И.Г., Алешин Р.Р., Хосровян Г.А. Инновационные разработки теории и технологии производства одиночной и крученой пряжи с содержанием льноволокна // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. №4. С. 96...108.

## REFERENCES

1. Khosrovyan A.G., Khosrovyan G.A. Mathematical modeling of the process of cleaning fibrous materials in a baking powder-cleaner // International Scientific Research Journal. 2021, 4 (106). Part 1. P. 86...92.

2. Zhukova A.A., Khosrovyan A.G., Khosrovyan G.A. Development of technology and equipment for the preparation of semi-finished products from textile waste and secondary raw materials for the manufacture of composite textile materials for various purposes // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021, 6. P. 184...188.

3. Tuvin M.A., Khosrovyan I.G., Krasik T.Ya., Khosrovyan G.A. Mathematical modeling of aerodynamic sorting of fibers in a device for obtaining multilayer nonwoven materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2015, 6. P. 119...122.

4. Pat. 2471897 Russian Federation. A method for obtaining multilayer fibrous materials and a device for its implementation / G.A. Khosrovyan, A.G. Khosrovyan, T.Ya. Krasik, I.G. Khosrovyan, T.V. Zhegalina. – Published 01/10/2013.

5. Pat. 2595992 Russian Federation. A method for obtaining multilayer fibrous materials and a device for its implementation / G.A. Khosrovyan, A.G. Khosrovyan, T.Ya. Krasik, M.A. Tuvin, I.G. Khosrovyan. – Published 05/08/2016.

6. Rodionov S.A., Khosrovyan A.G., Zhukova A.A., Khosrovyan I.G., Alechin R.R., Khosrovyan G.A. Innovative developments in the theory and technology of production of single and twisted yarn containing flax fibers // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022, 4. P. 96...108.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 19.07.23.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПНОГО ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ВАЛКОВОЙ МАШИНЫ

## DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE CHAIN CONVEYING DEVICE OF THE ROLLER MACHINE

Г.А. БАХАДИРОВ<sup>1</sup>, А.М. НАБИЕВ<sup>1</sup>, Ф.Р. РАХИМОВ<sup>1</sup>, М.У. МУСИРОВ<sup>2</sup>

G.A. BAHADIROV<sup>1</sup>, A.M. NABIEV<sup>1</sup>, F.R. RAKHIMOV<sup>1</sup>, M.U. MUSIROV<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Институт механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан,  
<sup>2</sup>Ташкентский государственный транспортный университет)

(<sup>1</sup>Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the Academy of Sciences  
of the Republic of Uzbekistan,  
<sup>2</sup>Tashkent State Transport University)

E-mail: instmech@rambler.ru, a.nabiev@mail.ru, rahimov-furqat1992@inbox.ru,  
musirov.mech.1992@mail.ru

*В статье исследовано продольное колебание транспортерных цепей, перемещающих плоский материал с неравномерной поверхностью, уложенный вперегиб на опорной плите, в зону обработки между рабочими валами. Для исследования колебательного движения использован метод Галеркина и составлено уравнение Матье. Получено уравнение движения плоского материала с переменной массой. Значения коэффициентов уравнения зависят от кинематических параметров транспортерной цепи, опорной плиты и плоского материала, а также геометрических параметров рассмотренной технической системы.*

*Результаты исследования показали, что для снижения амплитуды колебаний транспортерных цепей требуется уменьшать линейную скорость подачи плоского материала в зону обработки валковой машины. Предложено техническое решение, которое обеспечит устойчивое положение опорной плиты во время обработки.*

*The article examines the longitudinal vibration of conveyor chains moving flat material with an uneven surface, laid in an inflection on a base plate, into the processing zone between the working shafts. To study the oscillatory motion, the Galerkin method was used and the Mathieu equations were compiled. The values of the equation coefficients depend on the kinematic parameters of the conveyor chain, base plate and flat material, as well as the geometric parameters of the considered technical system. The results of the study showed that in order to reduce the amplitude of vibrations of conveyor chains, it is necessary to reduce the linear speed of feeding flat material into the processing zone of the roller machine. A technical solution that will ensure a stable position of the base plate during processing has been proposed.*

**Ключевые слова:** цепной транспортер, колебание, плоский материал, цепь, переменная масса, равномерное движение, скорость подачи, привод.

**Keywords:** chain conveyor, vibration, flat material, chain, variable mass, uniform motion, feed rate, drive.



## Введение

В промышленности при транспортировке плоских материалов, в частности волокнистых материалов, в зону обработки технологических машин используются цепные и другие транспортирующие устройства. Правильный подбор геометрических и кинематических параметров транспортеров необходим для того, чтобы они работали эффективно и продуктивно в течение длительного времени.

Существуют различные типы транспортеров и методы их расчета. Рассмотрим некоторые работы, посвященные разработке, исследованию, совершенствованию конструкции и расчету транспортирующих устройств технологических машин.

В работе [1] описан инерционный способ транспортирования грузов в складские помещения. Разработана методика расчета, позволяющая синтезировать многофункциональный передвижной ленточный транспортер для конкретных производственных условий.

В работе [2] исследованы колебания в тяговых органах цепного транспортера. Определена частота собственных свободных колебаний тягового органа, возникающих от периодических ударов ходовых роликов пластинчатых транспортеров. Эти периодические удары на стыках увеличивают амплитуду низкочастотных собственных колебаний тягового органа транспортера.

В работе [3] исследована кинематика цепных транспортных конвейеров автоматических линий. Автором получены зависимости, позволяющие уменьшить коэффициент неравномерности движения и оптимизировать динамические процессы в линии при малых межосевых расстояниях.

В работе [4] исследованы динамические воздействия на тяговый орган цепного конвейера с применением компьютерного инженерного анализа Autodesk Inventor. Данный метод анализа позволяет определить возможности снижения динамических нагрузок на цепной конвейер.

В работе [5] решена задача повышения эффективности транспортера линии дробления отходов. Разработана математиче-

ская модель транспортера, позволяющая учитывать неравномерность дробленной продукции, от которой возникают нестабильные динамические воздействия на ленту транспортера.

В работе [6] предлагается механический привод, позволяющий подбирать требуемую скорость вращения вала и в широком диапазоне бесступенчато регулировать число оборотов вала. Данный привод рекомендован к применению в конструкциях технологических и вспомогательных машин.

Также известны различные устройства и машины для обезвоживания текстильных или других волокнистых материалов под механическим воздействием валковой пары. Обрабатываемый материал в зону обработки валковой парой может подаваться транспортером горизонтально, под наклоном и вертикально.

На основе технической системы, показанной на рис. 1, рассмотрим задачу о неравномерных колебаниях транспортерной цепи вертикального транспортера [7].

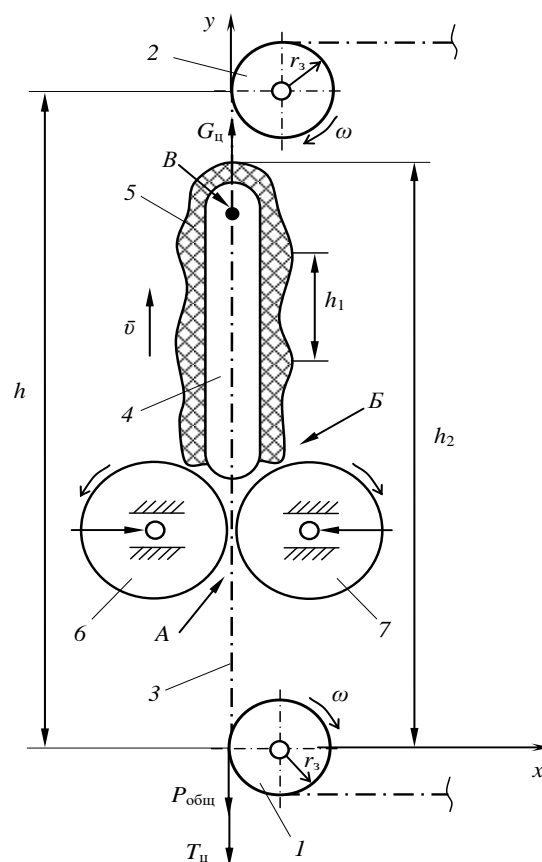


Рис. 1

### Основная часть

Рассматриваемая нами техническая система состоит из звездочек 1 и 2, транспортной цепи 3, опорной плиты 4, плоского материала 5, а также рабочих валов 6 и 7. Система работает следующим образом: транспортные цепи 3 посредством звездочек 1, 2 в вертикальном направлении перемещают опорную плиту 4, на которую предварительно впереди укладывается плоский материал 5. Затем транспортные цепи 3 перемещают плоский материал 5 вместе с опорной плитой 4 между рабочими валами 6, 7, где плоский материал 5 подвергается механической деформации на участке обжатия *A*. Рабочие валы служат, например, для отжима избыточной влаги из влагонасыщенного плоского (текстильного или другого) материала [8, 9]. При дальнейшем перемещении плоского материала 5 на участке *B* происходят колебания транспортирующих цепей 3 и плоского материала 5 с опорной плитой 4 относительно точек ее крепления на участке *B* в рассматриваемой нами технической системе.

В транспортирующем устройстве валковой машины (см. рис. 1) при начальном контакте плоского материала 5 и опорной плиты 4 с рабочими валами 6, 7 происходит удар и приводит к постепенному растягиванию, а в дальнейшем разрыву транспортных цепей 3 или поломке в узле крепления. Рабочие валы 6, 7 находятся под постоянным давлением. После принудительного захвата плоского материала 5 с опорной плитой 4 и дальнейшего их выхода из зоны захвата между вращающимися рабочими валами 6, 7 происходит их резкое колебательное движение по высоте.

Целью данной работы является определение значений колебания плоского материала с опорной плитой при их транспортировании и поиск путей предотвращения этого явления за счет внесения изменений в конструкцию транспортного устройства валковой машины.

Силы тяжести плоского материала, опорной плиты неравномерно распределяются вдоль транспортирующих цепей,

обхватывающих звездочки с радиусом *r*. Рассмотрим небольшие колебания технической системы, где транспортные цепи движутся с постоянной скоростью.

Запишем закон распределения массы плоского материала и опорной плиты в транспортирующем устройстве. При решении этой задачи используем систему координат Эйлера:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial x}{\partial t} + v \frac{\partial x}{\partial y},$$
$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 x}{\partial y \partial t} + v^2 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2}.$$

Вводим силу втягивания транспортных цепей  $G_{ц}$ , затем по принципу Даламбера получаем:

$$m \left( \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\omega r_3 \frac{\partial^2 x}{\partial y \partial t} + \omega^2 r_3^2 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} \right) =$$
$$= (P_{об} + T_{ц} - G_{ц}) \frac{\partial^2 x}{\partial y^2}.$$

Здесь *m* – масса, соответствующая единице длины;  $T_{ц}$  – натяжное усилие транспортных цепей;  $G_{ц}$  – втягивающая сила транспортных цепей.

В данном частном случае

$$m = m_{пм} + m_{оп} + m_{ц} + m_{па} \sin \left( \frac{2\pi}{h_1} (y - vt) \right),$$

где  $m_{пм}$  – среднее значение массы транспортируемого плоского материала на единицу длины транспортирующих цепей, кг/см;  $m_{па}$  – переменная амплитуда функции массы плоского материала, кг/см;  $m_{ц}$  – масса на единицу длины транспортных цепей, кг/см;  $m_{оп}$  – масса опорной плиты;  $h_1$  – ступенчатое изменение переменной массы плоского материала.

Учитывая сложность общего аналитического решения задачи, воспользуемся рядом Тейлора.

Будем предполагать, что отклонение  $m_1$  неравномерно распределенной массы относительно  $m_0$  будет достаточно мало. Тогда, разложив в ряду Тейлора линейную часть  $1/m$  вокруг участка *B* (см. рис. 1), где  $m_1=0$ , запишем уравнение продольного движения в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\omega r \frac{\partial^2 x}{\partial y \partial t} + (\omega r)^2 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} = \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( 1 - \frac{m_{па}}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \sin \left( \frac{2\pi}{h_1} (y - \omega r t) \right) \right) \frac{\partial^2 x}{\partial y^2}. \quad (1)$$

Запишем следующие начальные и граничные условия для полученного уравнения (1) в частных производных:

$$\begin{cases} x(0, t) = 0 \\ x(h, t) = 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Далее по методу Галеркина рассмотрим задачу преобладания малых колебаний:

$$\ddot{f} \sin \left( \frac{\pi y}{h} \right) + \frac{2\omega r}{h} \dot{f} \cos \left( \frac{\pi y}{h} \right) + \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \left( \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( 1 - \frac{m_{па}}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \sin \left( \frac{2\pi}{h_1} (y - \omega r_3 t) \right) \right) - \omega^2 r_3^2 \right) \times f \sin \left( \frac{\pi y}{h} \right) = 0 \quad (4)$$

Для решения дифференциального уравнения (4) построим следующую систему

$$x = f(t) \sin \frac{\pi y}{h}. \quad (3)$$

Функция аппроксимации (3) удовлетворяет граничным условиям (2). Затем, подставляя соотношение (3) в уравнение движения (1), запишем простое дифференциальное уравнение второго порядка для функции  $f(t)$ :

дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{2\omega r}{h} \dot{f} = 0 \\ \ddot{f} + \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \left( \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( 1 - \frac{m_{па}}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \sin \left( \frac{2\pi}{h_1} (y - \omega r_3 t) \right) \right) - \omega^2 r_3^2 \right) f = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Первое уравнение системы уравнений (5) удовлетворяет уравнению (1).

Решим второе уравнение системы (5):

$$\ddot{f} + \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \left( \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( 1 - \frac{m_{па}}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} \left( a_{11} \cos \frac{2\pi \omega r_3 t}{h_1} - a_{12} \sin \frac{2\pi \omega r_3 t}{h_1} \right) \right) - \omega^2 r_3^2 \right) f = 0. \quad (6)$$

Здесь  $a_{11} = \frac{h_1^2}{\pi^2 \omega^2 r_3^2} \int_0^h \sin \frac{2\pi y}{h_1} \sin^2 \frac{\pi y}{h} dy = -\frac{h_1^2}{\pi^2 \omega^2 r_3^2} \frac{h_1}{4\pi} \frac{h_1^2}{h^2 - h_1^2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi h}{h_1} \right);$

$$a_{12} = \frac{h_1^2}{\pi^2 \omega^2 r_3^2} \int_0^h \cos \frac{2\pi y}{h_1} \sin^2 \frac{\pi y}{h} dy = -\frac{h_1^2}{\pi^2 \omega^2 r_3^2} \frac{h_1^2}{4\pi(h - h_1)} \sin \frac{2\pi h}{h_1}$$

Запишем полученное уравнение в следующем виде:

$$b = \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})m_{па}}{(m_{им} + m_{оп} + m_{ц})^2} \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2},$$

$$\ddot{f} + \left( a - b \sin \left( \frac{2\pi \omega r_3 t}{h_1} + \beta \right) \right) f = 0. \quad (7)$$

$$\beta = \arctg \left( \frac{a_{11}}{a_{12}} \right).$$

Здесь  $a = \left( \frac{\pi}{h} \right)^2 \left( \frac{(P_{об} + T_{ц} - G_{ц})}{m_{им} + m_{оп} + m_{ц}} - \omega^2 r_3^2 \right),$

Далее введем некоторую замену и запишем следующее уравнение:

$$\frac{2\pi\omega_3 t}{h_1} = 2\theta - \frac{\pi}{2} - \beta. \quad (8)$$

После замены составляем уравнение Матье [7]:

$$\ddot{f} + (a + 2q \cos 2\theta)f = 0. \quad (9)$$

Здесь  $2q = b$ .

Пользуясь уравнением (8), в графической программе Maple 18 задаем необходимые значения технической системы:  $h_1=0,3$  м,  $\omega=0,0029$  рад/с,  $\beta=0,025$  рад и строим график (рис. 2).

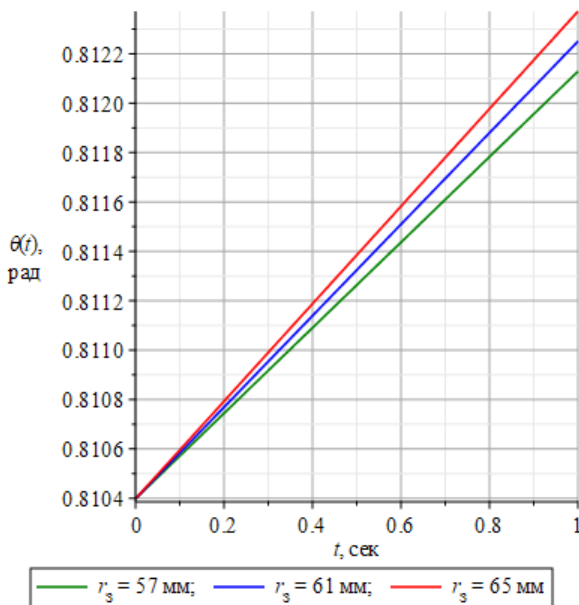


Рис. 2

Из графика видно, что для обеспечения малых значений функции угла  $\theta(t)$  необходимо задавать малые значения радиусов звездочек  $r_3$  транспортирующего устройства. Далее будем решать задачу при среднем значении  $r_3=57$  мм.

Тогда решение уравнения (9) запишем в следующем виде:

$$f(t) = C_1 \text{MathieuC}(a, -q, \theta(t)) + C_2 \text{MathieuS}(a, -q, \theta(t)),$$

где  $\text{MathieuC}$  – косинус Матье;  $\text{MathieuS}$  – синус Матье;  $C_1$  и  $C_2$  являются постоянными коэффициентами дифференцирова-

ния Матье и определяются следующим образом [7]:

$$C_1 = \frac{\text{MathieuC}(\text{MathieuA}(n, q), q, y)}{\text{MathieuCE}(n, q, y)},$$

$$C_2 = \frac{\text{MathieuS}(\text{MathieuB}(n, q), q, y)}{\text{MathieuSE}(n, q, y)}.$$

Используя уравнение (9), построим следующий график (рис. 3) при заданных значениях транспортирующего устройства:  $h_1=0,3$  м,  $h=1$  м,  $T_{ц}=300$  Н,  $P_{общ}=800$  Н,  $v=0,17$  м/с,  $m_{па}=0,2$  кг/см,  $m_{пм}=0,17$  кг/см,  $m_{оп}=0,67$  кг/см,  $m_{ц}=5,7$  кг/см.

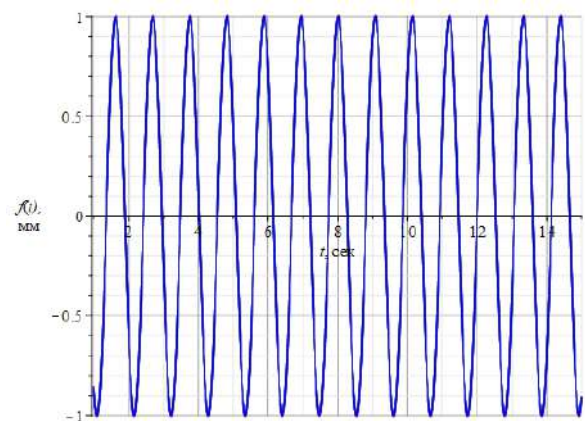


Рис. 3

График представляет собой продольные колебания, влияющие на рассмотренную нами техническую систему – цепное транспортирующее устройство валковой технологической машины. По графику видно, что при перемещении плоского материала с неравномерной поверхностью по транспортирующей цепи относительно оси  $x$  возникают малые колебания с амплитудой до 1 мм.

В соответствии с принципом Даламбера в правой части уравнения записана векторная сумма внешних сил, действующих на рабочие валы 6, 7. Помимо сил веса валов и сил натяжения цепей, на валы действуют силы давления, которые направлены вдоль оси  $OX$ . Поскольку мы сформулировали уравнение движения вдоль оси  $OY$ , то в уравнении были учтены и записаны только силы, направленные вдоль оси  $OY$ . Силы давления рабочих валов не участвуют в уравнении.

Для технического решения нами предлагается закрепление по бокам транспортной опорной плиты 4 опорных роликов 8, которые будут передвигаться по направляющим дорожкам 9, закрепленным на раме 13 валковой машины, и обеспечат устойчивое положение опорной плиты 4 во время обработки (рис. 4).

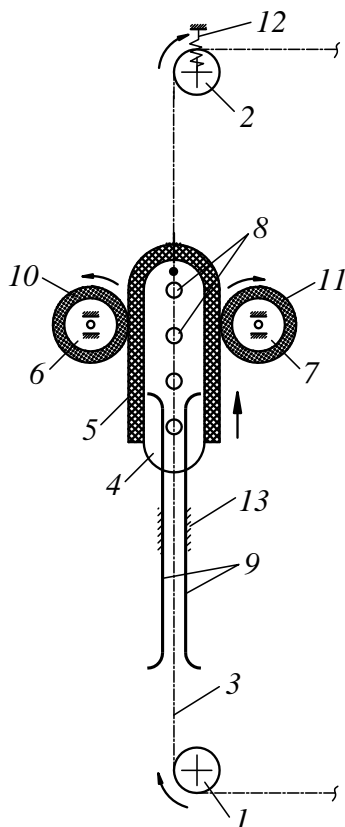


Рис. 4

В конструкции валковой машины для снижения удара рабочие валы 6, 7 могут быть покрыты упругим материалом 10, 11 (например, резиной, сукном), а ведущие звездочки 2 могут быть снабжены пружинами 12.

На основе изменений технических требований к цепному транспортирующему устройству можно будет задавать его кинематические и геометрические параметры.

## ВЫВОДЫ

1. Получено уравнение движения плоского материала с переменной массой. Значения коэффициентов  $a$ ,  $q$ ,  $\theta$  уравнения зависят от кинематических параметров транспортной цепи, опорной плиты и плоского материала, а также геометриче-

ских параметров рассмотренной технической системы.

2. Установлено, что для снижения амплитуды колебаний необходимо и достаточно снижать линейную скорость тяговой цепи транспортирующего устройства.

3. Предложено техническое решение, которое обеспечит устойчивое положение опорной плиты во время обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Койайдаров Б.А., Байешов Б.Т., Койайдаров А.А. Многофункциональное перегрузочное устройство для складских работ // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 3 (387). С. 127...131.
2. Лазуткина Н.А. Исследование продольной динамики цепного конвейера // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5.
3. Крюков В.А. Оптимизация динамических процессов в цепных транспортных конвейерах автоматических роторно-конвейерных линий // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. №6-2.
4. Ногаев К.А., Кыдырбаева С.Ж. Моделирование кинематических параметров движения тягового органа цепных конвейеров // Интернаука. 2020. № 19-2(148). С. 72...75.
5. Цыпкина В.В. и др. Разработка математической модели движения транспортера в линии по переработке кабельных отходов // Universum: технические науки: электрон. науч. журн. 2022. 4(97).
6. Койайдаров Б.А., Койайдаров А.А., Джакиев Д.К. Регулируемый механический привод для технологических машин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 3 (387). С. 132...135.
7. Левитский Н.И. Колебания в механизмах: учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 336 с.
8. Еришов С.В., Калинин Е.Н. Моделирование процесса отжима волокнистых материалов в валковой паре с динамическим режимом нагружения // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сб. материалов XXIII Международ. науч.-практ. форума «SMARTEX-2020». Иваново: ИВГПУ, 2020. С. 277...281. – DOI 10.47367/2413-6514\_2020\_1\_277.
9. Еришов С.В., Кожевников С.О., Никифорова Е.Н., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н. Анализ влияния переходных процессов на обезвоживание волокнистой структуры распределенным давлением в динамическом режиме нагружения // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 5 (389). С. 85...91.

## REFERENCES

1. Koyaidarov B.A., Bayeshov B.T., Koyaidarov A.A. Multifunctional reloading device for storage

operations // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2020. No. 3 (387). P. 127...131.

2. *Lazutkina N.A.* Study of the longitudinal dynamics of a chain conveyor // *Modern problems of science and education*. 2013. No. 5.

3. *Kryukov V.A.* Optimization of dynamic processes in chain transport conveyors of automatic rotary conveyor lines // *Izvestiya TulGU. Technical science*. 2011. No. 6-2.

4. *Nogaev K.A., Kydyrbaeva S.Zh.* Modeling of the kinematic parameters of the movement of the traction body of chain conveyors // *Internauka*. 2020. No. 19-2(148). P. 72...75.

5. *Tsyapkina V.V. et al.* Development of a mathematical model for the movement of a conveyor in a line for the processing of cable waste // *Universum: technical sciences: electron. Scientific magazine*. 2022. 4(97).

6. *Koyaidarov B.A., Koyaidarov A.A., and Dzhakiyaev D.K.* Adjustable mechanical drive for technological machines // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2020. No. 3 (387). P. 132...135.

7. *Levitsky N.I.* Oscillations in mechanisms: Teaching aid for technical universities. M.: Nauka. Phys.-Math. Lit., 1988. 336 p.

8. *Yershov S.V., Kalinin Ye.N.* Modeling the dewatering process of fibrous materials in rolls pare with pulse loading // *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemykiye tekhnologii i materialy (SMARTEX-2020)*. Ivanovo: IVGPU, 2020. S. 277...281. – DOI 10.47367/2413-6514\_2020\_1\_277.

9. *Yershov S.V., Kozhevnikov S.O., Nikiforova Ye.N., Kuznetsov V.B., Kalinin Ye.N.* Analysis of the influence of transition processes on the dewatering of a fibrous structure by distributed pressure in dynamic loading mode // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2020. № 5 (389). S. 85...91.

Рекомендована семинаром лаборатории «Теория механизмов и машин» Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан. Поступила 18.08.23.

УДК 004.942: 687.03

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_175

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
КОМПРЕССИОННЫХ СВОЙСТВ НЕОПРЕНА ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ****NUMERICAL SIMULATION AND IMAGE ANALYSIS  
OF COMPRESSION PROPERTIES OF HETEROGENEOUS NEOPRENE MATERIAL**

*И.Н. ТЮРИН<sup>1</sup>, З.У. ЗУФАРОВА<sup>2</sup>, С.Ш. ТАШПУЛАТОВ<sup>2,3</sup>, В.В. ГЕТМАНЦЕВА<sup>1</sup>,  
Е.Г. АНДРЕЕВА<sup>1</sup>, А.Г. КУЗЬМИН<sup>1</sup>, А.В. ФИРСОВ<sup>1</sup>*

*I.N. TYURIN<sup>1</sup>, Z.U. ZUFAROVA<sup>2</sup>, S. SH. TASHPULATOV<sup>2,3</sup>, V.V. GETMANTSEVA<sup>1</sup>,  
E.G. ANDREEVA<sup>1</sup>, A.G. KUZMIN<sup>1</sup>, A.V. FIRSOV<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),

<sup>2</sup>Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,

<sup>3</sup>Джизакский политехнический институт, Республика Узбекистан)

(<sup>1</sup>Kosygin University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Tashkent Institute of Textile and Light Industry,

<sup>3</sup>Jizzakh Polytechnic Institute Republic of Uzbekistan)

E-mail: tyurin-in@rguk.ru, ssht61@mail.ru

*Работа посвящена рассмотрению вопроса декомпрессии пакета материалов гидрокостюма посредством обеспечения гетерогенности некоторых свойств, в частности пористости пеноматериала в составе материалов типа «неопрен». Разработаны твердотельные модели образцов пакетов материала типа «неопрен». Проведенное вычислительное моделирование с применением статического структурного анализа показало устойчивые результаты, свидетельствующие о снижении деформаций на 15-25%, снижении компрессионного давления на 15-20%. Результаты вычислительного моделирования демонстрируют достижение основных положений гипотезы исследования, выдвигаемой в работе. Обеспечение гетерогенности распределения пор в структуре пеноматериала позволило снизить совокупные деформации материала в диапазоне 15-25% с учетом тенденции повышения значений деформаций (с медианных значений 0,79 мм до медианных значений, равных 0,91 мм), наблюдаемых точечно в местах расположения пор большего диаметра. По итогам исследования рекомендовано проведение экспериментов с использованием твердотельных цифровых моделей неопрена, воспроизводящих морфологию пор и их частоту распределения в составе пеноматериала, закон распределения, состав заполняемого газообразного*

*вещества внутри пор (на примере ксенона, аргона и пр.) с последующей оценкой теплоизоляционных свойств проектируемых материалов типа «неопрен» с гетерогенной структурой. Декомпрессия пакетов материалов гидрокостюма может оказать существенное влияние на повышение теплоизоляционных свойств гидрокостюмных систем в совокупности с применением инновационных экоматериалов для проектирования материалов типа «неопрен».*

*The work is devoted to the issue of decompression of a wetsuit material package by ensuring the heterogeneity of some properties, in particular, the porosity of the foam material in the composition of neoprene-type materials. Solid-state models of samples of neoprene-type material packages have been developed. The performed computational modeling using static structural analysis showed stable results, indicating a decrease in deformations by 10-15%, a decrease in compression pressure by 15-20%. The results of computational modeling demonstrate the achievement of the main provisions of the research hypothesis put forward in the work. Ensuring the heterogeneity of the distribution of pores in the structure of the foam material made it possible to reduce the total deformations of the material in the range of 15-25%, taking into account the phenomenon of increasing deformation values (from median values of 0.79 mm to median values of 0.91 mm), observed pointwise at the locations of pores of larger diameter. Based on the results of the study, it was revealed the need for experiments using solid-state digital neoprene models that reproduce the pore morphology and their distribution frequency in the composition of the foam material, the distribution law, the composition of the filled gaseous substance inside the pores (for example, xenon, argon, etc.), with subsequent evaluation thermal insulation properties of the designed materials such as "neoprene" with a heterogeneous structure. Decompression of wetsuit material packs can have a significant impact on improving thermal insulation properties of wetsuit in conjunction with the use of innovative materials for the design of neoprene materials.*

**Ключевые слова:** гидрокостюм мокрого типа, неопрен, поры, пеноматериалы, вычислительное моделирование, декомпрессия, компрессионное давление, гидростатическое давление, устойчивая мода.

**Keywords:** wetsuit, neoprene, pores, foams, computational modeling, decompression, compression pressure, hydrostatic pressure, sustainable fashion.

#### *Введение*

Обеспечение теплоизоляции играет ключевую роль в проектировании гидрокостюмных систем [1-3]. Высокие уровни погружения способны оказывать повышенное компрессионное воздействие на пакет материалов гидрокостюма мокрого типа с последующим снижением его теплоизоляционных свойств [4]. Нивелирование отрицательного воздействия компрессионного давления толщи воды предусмотрено за счет обеспечения воздушных прослоек пододежного пространства в гидрокостю-

мах сухого типа [5]; в гидрокостюмах мокрого типа данный вопрос решается главным образом за счет оптимизации параметров достигаемой дайвером глубины погружения и толщины пакета материалов [6-8]. Решение проблемы нам представляется в интеллектуализации процессов проектирования гидрокостюмных систем, что в свою очередь указывает на необходимость проектирования пеноматериалов новых структур [9-10]. Предложено рассмотреть задачу обеспечения декомпрессии пакетов гидрокостюмов посредством гетеро-



генности некоторых свойств, в частности пористости пеноматериала в составе материалов типа «неопрен».

Анализ ряда исследований, проведенных в области вычислительного моделирования пеноматериалов, в основном с помощью метода конечных элементов (МКЭ, FEA), свидетельствует о сложности моделирования реальных 3D-FEM структур пеноматериалов. В работе иранских и канадских исследователей из *Iran Polymer and Petrochemical Institute (Тегеран, Иран)*, *Laval University (Квебек, Канада)* и *National Research Council (Оттава, Канада)* с помощью МКЭ исследованы эластомерные пенопласты на основе натурального каучу-

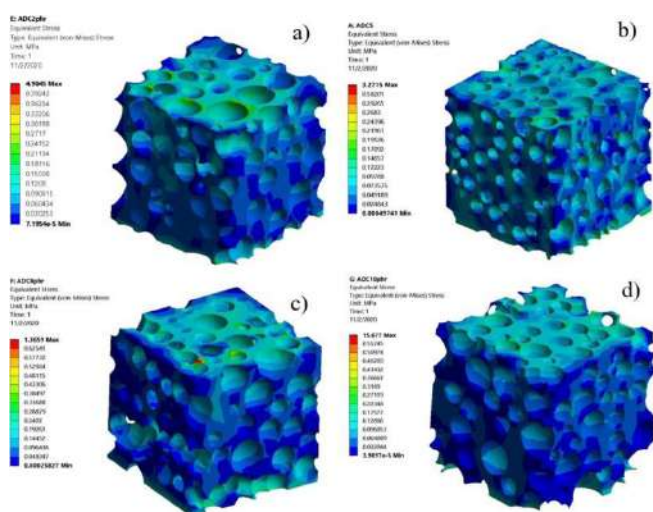


Рис. 1

Процессы поглощения энергии пеноматериалами исследованы в работах словенских ученых из *University of Maribor (Vesenjak et al. 2012)* также с помощью численных методов. Представленная исследователями работа является частью серии численных экспериментов, целью которых является исследование влияния геометрических параметров (в частности геометрии 3D-элементов Кельвина типа «зерно») на эффективные свойства пены (рис. 2). Работа проводится учеными в рамках направления

Существует еще ряд работ в области исследований пеноматериалов [13-15], но ни одна из них не рассматривает вопросы проектирования пеноматериалов гетерогенных структур, декомпрессии пеноматериалов в проектировании гидрокостюма с

ка при одноосном сжатии как на микро-, так и макроуровне [11]. Исследование позволило определить, как содержание пенообразователя влияет на морфологические и механические свойства пенорезины. Моделирование реальных 3D-структур показало, что более однородная морфология ячеек и меньшая частота структурных дефектов наблюдались в образцах пеноэластомера с более высоким содержанием пенообразователя. Кроме того, анализ МКЭ на микроуровне выявил существенное снижение максимальной концентрации напряжений и микродеформаций при более высоком содержании пенообразователя (рис. 1).

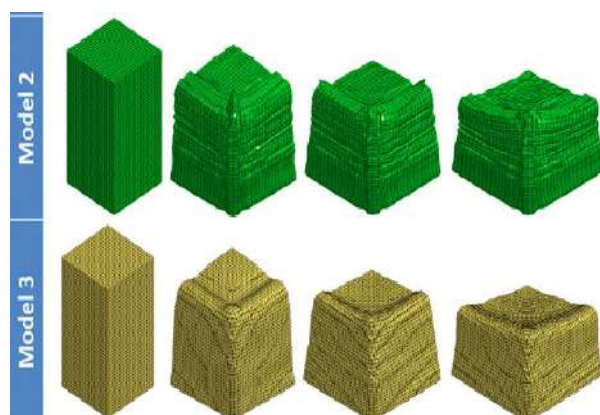


Рис. 2

создания новых метаматериалов для использования в проектировании амортизирующих панелей военного назначения (защита от взрывной ударной волны и осколков) и новых видов материалов с акустическими свойствами (сэндвич-панелей, элементов буферных конструкций). Полученные исследователями результаты достаточно полно описывают процессы деформации пеноматериалов гомогенных структур под внешними компрессионными воздействиями (на примере ударных нагрузок) [12]. последующей оценкой его теплоизоляционных свойств.

#### Материалы и методы

В нашем исследовании в качестве вариативной переменной выбраны геометрические параметры пор пеноматериала,

остальные (частота распределения в составе пеноматериала, закон распределения, особенности морфологии пор, состав заполняемого газообразного вещества внутри пор, выбор сырья и методов синтеза пеноматериала) выбраны постоянными с учетом конкретных значений параметров материалов. Значения выбраны по итогам проведенного обзорного анализа материалов – аналогов, имеющих на мировом рынке [16], а также самостоятельно проведенных испытаний физико-механических и

структурных свойств пакетов материалов типа «неопрен».

Вычислительное моделирование проведено в несколько этапов. На первом этапе собрана исходная информация об исследуемом объекте. В состав информации включены общие характеристики материалов типа «неопрен» (табл. 1), визуальные изображения пеноматериала, полученного с использованием СЭМ (сканирующего электронного микроскопа) (рис. 3).

Таблица 1

№ п/п	Группа характеристик	Уточненные характеристики	Количественные/качественные показатели
1	Сопротивление	Стойкость к истиранию Сопротивление разрыву Стойкость к растворителям Маслостойкость Устойчивость к старению под действием погоды / солнечного света	Отличная Хорошее Удовлетворительная Удовлетворительная Хорошая
2	Дюрومتر (твердость)	Твердость по Шору А	30-90 единиц
3	Общие характеристики	Растяжение Удлинение (макс.) Комплект сжатия Устойчивость/отскок Адгезия к металлам	500-3000 P.S.I 600% Хороший Отлично От хорошей до отличной
4	Диапазон температур	Использование при низких температурах Использование при высоких температурах	от -12° до 46 С° до 121 С°



Рис. 3

Исследование физико-механических характеристик текстильных материалов типа «неопрен» [17], проведенное на разрывной машине Instron серии 4411, позволило сформировать результаты в виде зависимости «нагрузка-растяжение», представленной в графическом виде на рис. 4. Результаты исследования физико-механических характеристик экспортированы в

систему для вычислительного моделирования.

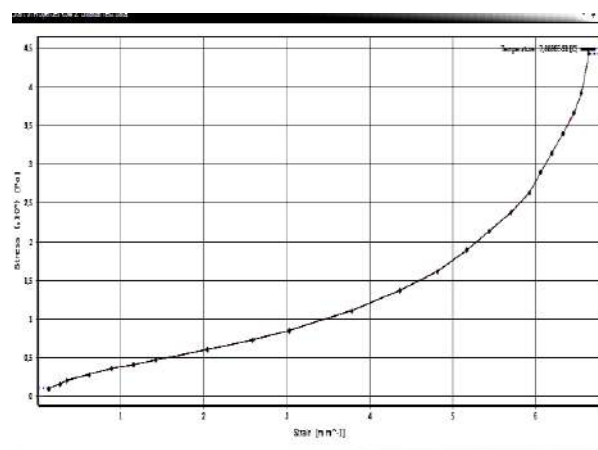


Рис. 4

Структурные характеристики материала типа «неопрен», а также начальные условия для вычислительного моделирования материала представлены в табл. 2. Уровень компрессии выбран исходя из анализов результатов исследований фран-

цузских ученых из *Military Biomedical Research Institute (Castagna O. et.al 2013)* (3400 Па). Граничное давление (interface pressure) представляет собой давление на сенсор каждой нижней конечности человека и равно сумме давления сжатия, создаваемого одеждой, и гидростатического давления, возникающего в результате глубины погружения сенсора [18].

Необходимые свойства пеноматериала (неопренового каучука) получены из библиотеки материалов программного пакета *ANSYS Workbench v14.0 STUDENT*. Кривые напряжения-деформации неопренового каучука, включая данные одноосных, двухосных испытаний и данные испытаний на сдвиг, показаны на рис. 5.

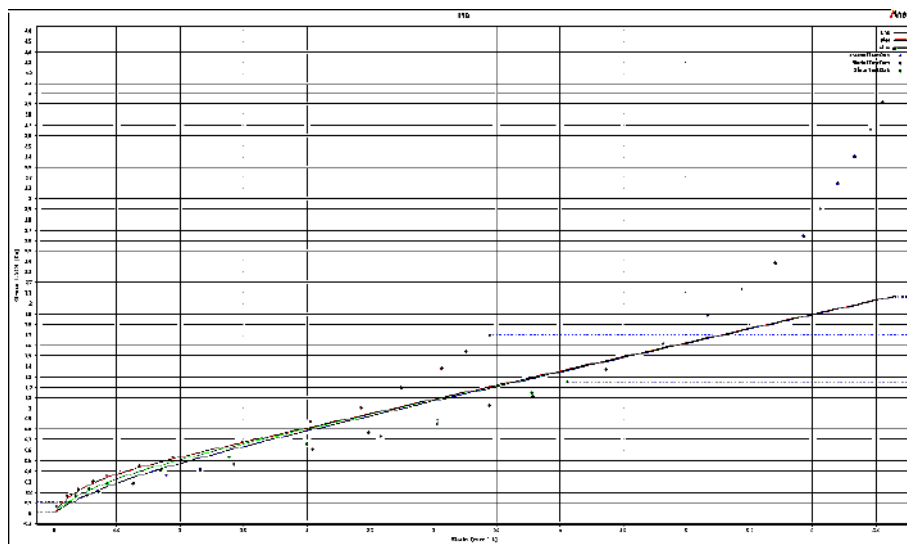


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что неопреновый каучук представляет собой нелинейный материал с очень низкой жесткостью. Плотность неопренового каучука не указана в библиотеке материалов пакета программного обеспечения *ANSYS Workbench v14.0 STUDENT*, поэтому ее значение взято из литературы как  $1250 \text{ кг/м}^3$  [19]. При проектировании предполагалось, что средняя часть пеноматериала соединяется как с верхней, так и с нижней частью пакета материалов на трикотажной основе.

Вычислительное моделирование в условиях вакуума проведено методом конечных элементов с использованием модуля *Static Structural* (статический структурный

Таблица 2

Показатель	Значение показателя
Геометрические параметры:	
Толщина верхнего слоя пакета	2 мм
Толщина среднего слоя пакета	8 мм
Толщина нижнего слоя пакета	3 мм
Диаметр пор	20/36/52 мкм
Поверхностная плотность	240 г/м <sup>2</sup>
Количество петельных рядов на 100 мм	203 шт.
Количество петельных столбиков на 100 мм	163 шт.
Толщина ткани	2 мм
Переплетение	Полотняное
Волокнистый состав	ПЭ 100%
Кривая растяжение-удлинение:	
Давление воды	305 кПа
Плотность воды	1000 кг/м <sup>3</sup>
Скорость течения воды	2 м/с
Температура воды	20 °С
Уровень компрессии	3400 Па

анализ) из пакета программного обеспечения *ANSYS Workbench v14.0 STUDENT*.

Первоначально твердотельная модель изображается с соответствующими размерами. Затем объясняется процедура модели конечных элементов и представляются результаты. Чертежи твердотельных моделей конструкции с открытой ячейкой представлены на рис. 6 и 7. На рис. 6 изображены чертежи геометрических моделей образцов материалов типа «неопрен» гомогенной структуры; на рис. 7 – гетерогенной структуры. При построении сетки использованы треугольные элементы SOLID285, представляющие собой 4-узловое тетраэдрическое структурное тело с узловыми

давлениями. Элемент имеет линейное перемещение и характеристики гидростатического давления, подходит для моделирования нерегулярных сеток и обладает пла-

стичностью, сверхэластичностью, ползучестью, жесткостью при напряжении, большим прогибом и большой деформируемостью.

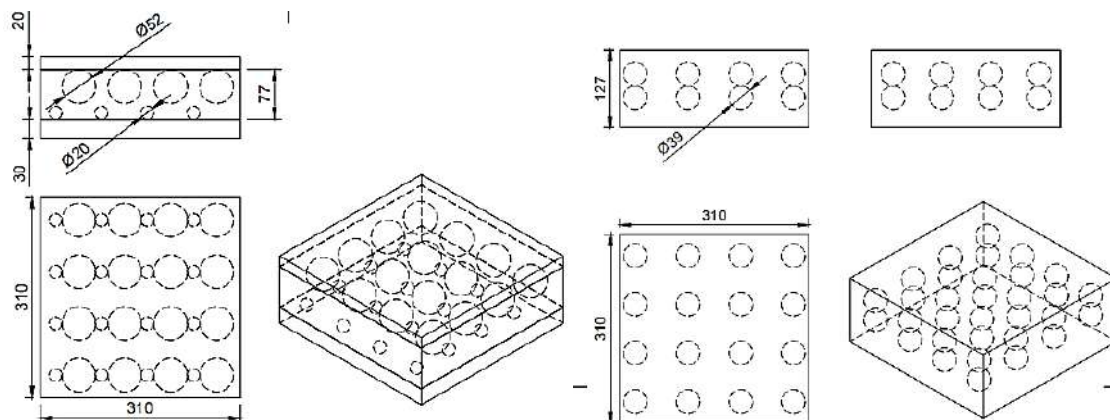


Рис. 6

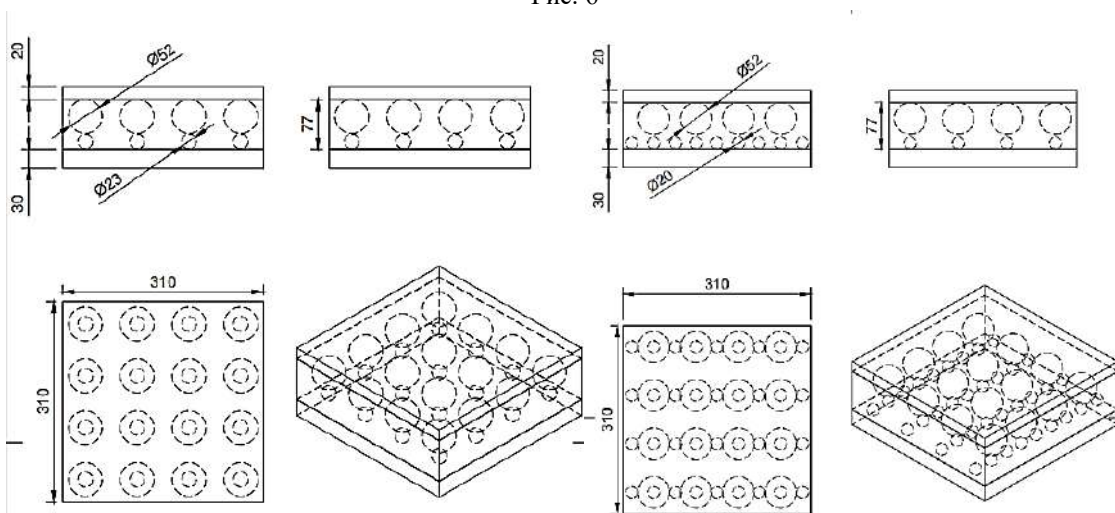


Рис. 7

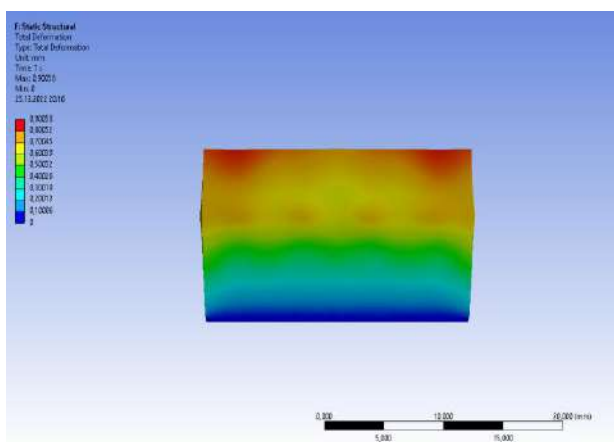


Рис. 8

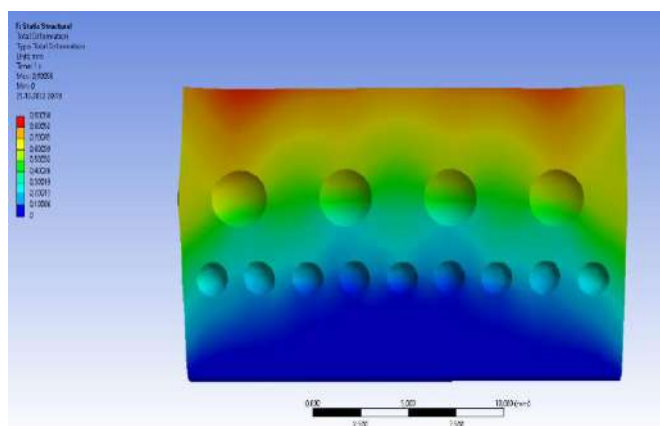


Рис. 9

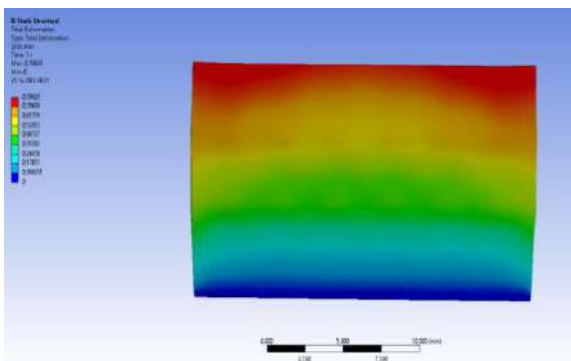


Рис. 10

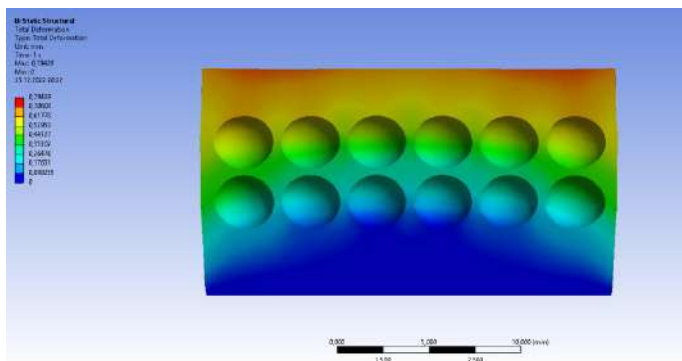


Рис. 11

### Результаты и их обсуждение

Основными результатами вычислительного моделирования являются карты распределения эквивалентных напряжений (по фон Мизесу), карты общих деформаций в исследуемых образцах материала. Примеры полученных результатов общих деформаций представлены на рис. 8-11 и демонстрируют достижение основных положений гипотезы исследования, выдвигаемой в работе. Обеспечение гетерогенности распределения пор в структуре пеноматериала позволило снизить совокупные деформации материала в диапазоне 15-25% с учетом тенденции повышения значений деформаций (с  $Me = 0,79$  мм до  $Me = 0,91$  мм), наблюдаемых точечно в местах расположения пор большего диаметра.

## ВЫВОДЫ

Декомпрессия пакетов материалов типа «неопрен» является комплексной задачей, требующей учета системы параметров, влияющих на достижение необходимых теплоизоляционных свойств гидрокостюма мокрого типа.

В качестве основных вопросов, решение которых позволит сделать окончательные выводы об эффективности проектирования материалов типа «неопрен», мы выделяем:

а) необходимость рассмотрения различных математических моделей, описывающих вязкоупругое поведение пеноматериала, для дифференциации точности моделирования физико-механических свойств материалов;

б) необходимость исследования объемных характеристик пор материалов гетерогенных и гомогенных структур для дифференциации влияния объема пор на объемный модуль упругости пеноматериала;

в) поиск оптимальных соотношений размеров пор и толщины пакетов материалов типа «неопрен».

Между тем наше исследование согласуется в общими тенденциями экологической устойчивости в производстве изделий легкой промышленности; в будущем позволит по-новому взглянуть на обеспечение теплоизоляции и декомпрессии в процессе проектирования инновационных гидрокостюмовых систем мокрого типа, и оно заслуживает дальнейшего обсуждения и изучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черунова И.В., Сирота Е.Н., Ташпулатов С.Ш. и др. Исследование влияния пористости на теплопроводность однослойных вспененных материалов типа "Неопрен" // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2021. № 3(393). С. 75...80. – DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_3\_75. – EDN FZGNPP.
2. Moran J.L. et al. Noble-gas-infused neoprene closed-cell foams achieving ultra-low thermal conductivity fabrics / RSC Advances, 2018. – DOI: 10.1039/C8RA04037K.
3. Тюрин И.Н., Гетманцева В.В., Андреева Е.Г. Анализ инновационных технологий терморегулирующих текстильных материалов // Химические волокна. 2018. № 1. С. 3-11. – EDN: NUKGEV
4. Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Tashpulatov S.Sh. et al. Numerical Simulation of the Pressure of a Compression Shell for Sports Purposes // Fibre Chemistry. 2023. 54, 333-336. – <https://doi.org/10.1007/s10692-023-10403-z>
5. Lenfeldova I., Hes L., Annayeva M. Thermal comfort of diving dry suit with the use of the warp-

knitted fabric. //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. - 141.012009. 10.1088/1757-899X/141/1/012009.

6. *Тюрин И.Н., Гетманцева В.В., Андреева Е.Г., Белгородский В.С.* О влиянии компрессионных изделий спортивного назначения на состояние человека // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6 (378). С. 131-140. EDN: OBUMZD

7. *Vrijdag X., Van Ooij P-J., van Hulst R.* Argon used as dry suit insulation gas for cold-water diving // *Extreme Physiology & Medicine*, 2013. - 2.10.1186/2046-7648-2-17.

8. *Тюрин И.Н., Яковлев А.М., Андреева Е.Г., Ташпулатов С.Ш., Белгородский В.С.* Численное моделирование компрессионного воздействия фильтрующей полумаски на мягкие ткани человека // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 6 (390). С. 179-183. EDN: ZLHJQF

9. *Tyurin I., Tashpulatov S., Belgorodsky V., Andreeva E.* Mathematical modeling of viscoelastic foam material for design of filtering respirators // *E3S Web Conf.* 371, 02055 (2023) – DOI: 10.1051/e3sconf/202337102055.

10. *Wu X., Kuzmichev V.* A design of wetsuit based on 3D body scanning and virtual technologies // *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2020. – DOI 10.1108/IJCST-02-2020-0021. – EDN GYVVHG.

11. *Heydari A., Esmizadeh E., Vahidifar A., Naderi G., Rodrigue D.* Real 3D Structure-Based Finite Element Simulation of Elastomer Foams: Effect of the Foaming Agent Content.// *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022, 61 (23), 7881-7890. – DOI:10.1021/acs.iecr.1c0448

12. *Vesjenjak M., Borovinšek M., Ren Z., Irie S., Itoh Sh.* Behavior of Metallic Foam under Shock Wave Loading // *Metals*. 2012, 2, 258 - 264. 10.3390/met2030258

13. *Bardy E., Mollendorf J., Pendergast D.* Thermal conductivity and compressive strain of foam neoprene insulation under hydrostatic pressure // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. 38. 3832. 10.1088/0022-3727/38/20/009.

14. *Pellicciari M., Sirotti S., Tarantino A.* A strain energy function for large deformations of compressible elastomers. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2023. 176. 105308. 10.1016/j.jmps.2023.105308.

15. *Rostami-Tapeh-Esmaeil E., Vahidifar A., Esmizadeh E., Rodrigue D.* Chemistry, Processing, Properties, and Applications of Rubber Foams. // *Polymers*. 2021. 13. 1565. 10.3390/polym13101565.

16. *Зуфарова З.У., Ташпулатов С.Ш., Черунова И.В., Явель Ч.* Анализ инновационных разработок в области вспененных материалов // *Вестник Алма-тинского технологического университета*. 2021. № 3. С. 53...60. – DOI 10.48184/2304-568X-2021-3-53-60. – EDN OAEPLM.

17. *Махмудова Г.И., Ташпулатов С.Ш., Нурматова О.И. и др.* Анализ физико-механических свойств плюшевого трикотажа на базе прессового переплетения // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 3(399). С. 97...101. – DOI 10.47367/0021-3497\_2022\_3\_97. – EDN RVUINA.

18. *Castagna O., Blatteau J-E., Vallée N., Schmid B, Regnard J.* The Underestimated Compression Effect of Neoprene Wetsuit on Divers Hydromineral Homeostasis. // *International journal of sports medicine*. 2013. 34. - 10.1055/s-0033-1345136.

19. [https://designerdata.nl/materials/plastics/rubbers/neoprene-rubber-\(chloroprene\)](https://designerdata.nl/materials/plastics/rubbers/neoprene-rubber-(chloroprene)) (дата обращения 20.05.2023).

## REFERENCES

1. *Cherunova I.V., Sirota E.N., Tashpulatov S.Sh.* Research of the influence of porosity on thermal conductivity of single-layer foamed materials of the "Neoprene" type // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. No. 3 (393). S. 75...80. – DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_3\_75. – EDN FZGNPP.

2. *Moran J.L. et al.* Noble-gas-infused neoprene closed-cell foams achieving ultra-low thermal conductivity fabrics / *RSC Advances*, 2018. – DOI: 10.1039/C8RA04037K.

3. *Tyurin, I.N., Getmantseva, V.V., Andreeva, E.G.* Analysis of Innovative Technologies of Thermoregulating Textile Materials // *Fiber Chemistry*, (2018) 50, 1–9. – <https://doi.org/10.1007/s10692-018-9918-y>

4. *Tyurin I.N., Getmantseva V.V., Tashpulatov S.Sh. et al.* Numerical Simulation of the Pressure of a Compression Shell for Sports Purposes // *Fiber Chem* (2023). 54, 333-336. – <https://doi.org/10.1007/s10692-023-10403-z>

5. *Lenfeldova, I. & Hes, L. & Annayeva, M.* Thermal comfort of diving dry suit with the use of the warp-knitted fabric // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. (2016). 141. 012009. 10.1088/1757-899X/141/1/012009.

6. *Tyurjn I.N., Getmantseva V.V., Andreeva E.G., Belgorodskiy V.S.* On the influence of the compression items sporting destination on the human condition // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2018, 378(6), pp. 131...140.

7. *Vrijdag, X. & Van Ooij, P-J. & van Hulst, R.* Argon used as dry suit insulation gas for cold-water diving // *Extreme Physiology & Medicine*. (2013). 2. 10.1186/2046-7648-2-17.

8. *Tyurin I.N., Yakovlev A.M., Andreeva E.G., Tashpulatov S.Sh., Belgorodsky V.S.* Numerical simulation of the compression influence of the filtering half mask on the soft human tissues // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2020, 390 (6), pp. 179...183.

9. *Tyurin I. Tashpulatov S., Belgorodsky V., Andreeva E.* Mathematical modeling of viscoelastic foam

material for design of filtering respirators // E3S Web Conf. 371, 02055 (2023) – DOI: 10.1051/e3sconf/202337102055

10. Wu X., Kuzmichev V. A design of wetsuit based on 3D body scanning and virtual technologies // International Journal of Clothing Science and Technology. 2020. – DOI 10.1108/IJCST-02-2020-0021. – EDN GYVVHG.

11. Heydari A., Esmizadeh E., Vahidifar A., Naderi G., Rodrigue D. Real 3D Structure-Based Finite Element Simulation of Elastomer Foams: Effect of the Foaming Agent Content // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2022 61(23), 7881-7890. – DOI:10.1021/acs.iecr.1c0448

12. Vesenjak, Matej & Borovinšek, Matej & Ren, Zoran & Irie, Seiichi & Itoh, Shigeru. Behavior of Metallic Foam under Shock Wave Loading // Metals. (2012). 2. 258-264. 10.3390/met2030258

13. Bardy, E. & Mollendorf, J. & Pendergast, D. Thermal conductivity and compressive strain of foam neoprene insulation under hydrostatic pressure // Journal of Physics D: Applied Physics. (2005). 38.3832.10.1088/0022-3727/38/20/009.

14. Pellicciari, M. & Sirotti, S. & Tarantino, A. A strain energy function for large deformations of compressible elastomers // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. (2023). 176.105308.10.1016/j.jmps.2023.105308.

15. Rostami-Tapeh-Esmaeil, E. & Vahidifar, A. & Esmizadeh, E. & Rodrigue, D. Chemistry, Processing,

Properties, and Applications of Rubber Foams // Polymers. (2021). - 13.1565.10.3390/polym13101565.

16. Zufarova Z.U., Tashpulatov S.Sh., Cherunova I.V., Yaven Ch. Analysis of innovative developments in the field of foamed materials // Bulletin of the Almaty Technological University. 2021. No. 3. P. 53...60. – DOI 10.48184/2304-568X-2021-3-53-60. – EDN OAEPLM.

17. Makhmudova G.I., Tashpulatov S.Sh., Nurmatova O.I. et al. Analysis of the physical and mechanical properties of plush knitwear based on press weave // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 3 (399). S. 97...101. – DOI 10.47367/0021-3497\_2022\_3\_97. – EDN RVUINA.

18. Castagna, O. & Blatteau, J-E. & Vallée, N. & Schmid, B & Regnard, J. The Underestimated Compression Effect of Neoprene Wetsuit on Divers Hydromineral Homeostasis // International journal of sports medicine. (2013). 34. - 10.1055/s-0033-1345136.

19. [https://designerdata.nl/materials/plastics/rubbers/neoprene-rubber-\(chloroprene\)](https://designerdata.nl/materials/plastics/rubbers/neoprene-rubber-(chloroprene)) (Accessed 05/20/2023).

Рекомендована кафедрой дизайна костюма Ташкентского института текстильной и легкой промышленности. Поступила 01.08.23.

УДК 677.08:691.3

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_184

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**THE POSSIBILITIES OF USING TEXTILE WASTE  
IN THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS**

*Ю.А. ЩЕПОЧКИНА*

*Yu.A. SHCHEROSHKINA*

(Ивановский государственный политехнический университет,  
Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет)

(Ivanovo State Polytechnical University,  
Verkhnevolzhsk State University of Agronomy and Biothechnlogy)

E-mail: julia2004ivanovo@yandex.ru

*Статья посвящена обзору научных разработок, касающихся использования текстильных отходов в производстве строительных материалов и изделий с применением различных типов связующих: полимеров, гипса, глины, цемента. Могут быть использованы как натуральные, так и синтетические текстильные отходы, в том числе лоскуты, обрезки тканей, нетканых материалов, волокна.*

*Отмечено, что практически все типы отходов текстильной промышленности возможно использовать в качестве сырья в производстве строительных материалов и изделий. Это особенно важно, поскольку в настоящее время в мире перерабатывается только 12-15 % отходов текстильных материалов, а постоянно увеличивающийся объем накапливаемых отходов представляет собой серьезную угрозу экологии. Особое внимание исследователей в последние годы было уделено использованию текстильных волокон в качестве армирующего материала, способного увеличить прочность строительных композитов. Немаловажным аспектом является утилизация лоскута, обрезков текстильных материалов, применение этих отходов для получения тепло- и звукоизоляционных материалов.*

*С учетом имеющейся огромной сырьевой базы в виде разнородных постоянно накапливающихся и требующих утилизации текстильных отходов необходима детальная проработка рациональных способов введения всех типов текстильных отходов в разнообразные по составу строительные композиты.*



*The article is devoted to the review of scientific developments concerning the use of textile waste in the production of building materials and products using various types of binders: polymers, gypsum, clay, cement. Both natural and synthetic textile waste, including flap, fabric trimmings, nonwovens, fibers can be used.*

*It is noted that almost all types of textile industry waste can be used as raw materials in the production of building materials and products. This is especially important because only 12-15% of textile waste is recycled in the world nowadays, and the constantly increasing volume of accumulated waste poses a serious threat to the environment. Special attention of researchers in recent years has been paid to the use of textile fibers as a reinforcing material that can increase the strength of building composites. An important aspect is the disposal of the flap, scraps of textile materials, the use of these wastes to obtain heat and sound insulation materials.*

*Taking into account the existing huge raw material base in the form of heterogeneous constantly accumulating and requiring the disposal of textile waste, a detailed study of rational ways of introducing all types of textile waste into various construction composites is necessary.*

**Ключевые слова:** вторичное сырье, текстильные отходы, переработка, утилизация, армирование, добавки, вяжущие, строительные материалы и изделия, экология.

**Keywords:** secondary raw materials, textile waste, recycling, recycling, reinforcement, additives, astringents, building materials and products, ecology.

Начиная с 80-х годов прошлого столетия темпы использования вторичного сырья в текстильной промышленности замедлились [1], что было связано с изменением ассортимента выпускаемых изделий, повышением требований к их качеству и, что немаловажно, увеличением содержания в них доли синтетических волокон.

К настоящему времени в мире перерабатывается всего лишь 12-15 % отходов текстильных материалов, а объемы неиспользованных отходов все более увеличиваются [2]. Возрастающая масса переработанных отходов представляет собой серьезную угрозу, прежде всего, с точки зрения экологии. Многочисленные отходы образуются в хлопкоперерабатывающей, шерстяной, льняной, конопляной, шелкоперерабатывающей отраслях, трикотажной и швейной промышленности, производстве химических волокон и нитей.

В зависимости от технологии переработки текстильные отходы делятся на следующие виды: волокнистые отходы; пуtankу и концы пряжи; лоскут и обрезки тканей; лоскут и обрезки трикотажного

полотна; лоскут и обрезки нетканых текстильных материалов; лоскут и обрезки комбинированных и многослойных материалов [1]. Так, подметь, пуtankка накапливаются в прядильном и ткацком производствах. Поставщиком обрезков тканей, представляющих собой куски сурового полотна различного размера с дефектами, является ткацкое производство. Обрезки образуются и при облагораживании полотна в отделочном производстве [1], а, например, в швейной промышленности на долю отходов приходится в среднем до четверти объема исходного сырья [2]. Интересно, что за последние четыре десятилетия в швейной промышленности доля основных отходов – межлекальных выпадов – возросла с 10-12 % [3] до 13-15 % [2]. Как своеобразный отход можно также рассматривать вторичное сырье, получаемое у населения и предприятий (изношенная одежда, тряпье, лоскут, обрезки нетканых материалов, упаковочные материалы, мешки и др.). Известно, что невостребованный текстиль составляет от 5 до 10 % массы твердых коммунальных отходов [4].

Экспертами отмечается, что большинство текстильных отходов мало- или неликвидны [2]. Однако с уверенностью можно утверждать, что практически все виды отходов текстильной промышленности можно использовать в качестве сырья в производстве строительных материалов и изделий.

Текстильные отходы, смешанные с кострой, могут быть использованы при изготовлении строительных панелей [1]. Твердые отходы – войлок, нетканые материалы дробят и смешивают с перемолотыми отходами пластмасс и полимерной пленкой. Полученные смеси с применением холодного и горячего прессования, точечного сваривания перерабатывают в изделия, которые предназначены к использованию для звуко- и теплоизоляции в строительстве, автомобилестроении, мебельной промышленности [1]. В качестве материала для получения строительных блоков возможно применение отходов пленки, текстильных волокон, лоскута, тряпья. Толщина блоков может быть 15-20 мм, плотность – 100-300 кг/м<sup>3</sup> [1]. Образующиеся при ворсовании и стрижке тканей пух стригальный и ворс – короткое волокно с примесями и кострой (до 30 %) – употребляют в производстве тепло- и звукоизоляционных плит [5, 6]. При изготовлении экологичных теплоизоляционных материалов на основе извести основным сырьем служат отходы льна и конопли [7].

Текстильные отходы полиамида, полиэфира, полиолефина после грануляции можно применить как сырье для производства пленки, нетканых материалов. Отходы стекловолокна или синтетических волокон находят применение как наполнители или армирующий материал для пластмассовых изделий. Полипропиленовые пленки и отходы полипропиленовых нетканых материалов могут быть использованы в изготовлении строительных панелей [8]. Полимерные материалы, армированные текстильными волокнами, показывают широкие возможности для их использования в строительстве.

Смесь взятых в равных количествах отходов шерстяных и полиэфирных волокон

служит сырьем для получения материала с хорошими изоляционными, акустическими свойствами. При этом в последующем такой материал по окончании срока его эксплуатации может быть быстро и экологично утилизирован [9]. Химические волокна можно использовать как добавки к различным разновидностям штукатурки [1]. Волокна, выполняя армирующую функцию, способствуют упрочнению штукатурного слоя, увеличивают его адгезию к оштукатуриваемой поверхности.

Известь третьего сорта, смешанную с мелким шерстяным ворсом, так называемую окшару, после выдержки в течение 5-6 мес. в отвалах (свежая содержит 2,5 % хлора, вредного для организма человека) употребляют взамен извести для приготовления строительных растворов [5, 6, 10].

Волокна ковровых отходов являются армирующим материалом в составе цементных композитов, способствуют повышению их прочности при изгибе [11]. Гранулированная смесь отходов ковровых покрытий может служить сырьем для получения звукоизоляционных материалов [12]. Малоценные текстильные отходы могут быть использованы в качестве выгорающей добавки в глинистое сырье для производства керамических изделий [1]. Утратившие потребительскую ценность отходы первичной переработки льна и шерсти предлагается использовать в качестве выгорающей добавки в производстве пористых заполнителей для легких бетонов, в частности керамзита [13]. Известно также введение волокнистых отходов первичной обработки шерсти (0,9-1,4 мас. %) в глинистое сырье с целью повышения прочности сырцовых гранул керамзита [14].

Отходы щелочного и бесщелочного стекловолокна нашли широкое применение в изготовлении гипсовых изделий и изделий на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (ГЦПВ). При введении стеклянного волокна (диаметром 10 мкм и длиной 12-15 мм) в состав смесей на основе гипса и ГЦПВ было выявлено, что прочность гипса, армированного бесщелочным волокном, выше, чем армиро-

ванного щелочным волокном. В среде твердеющего ГЦПВ, наоборот, стойкость щелочного стеклянного волокна выше стойкости бесщелочного. Поэтому для получения прочной системы «гипс – стеклянное волокно» рекомендуется применять волокно бесщелочного состава, а для системы «ГЦПВ – стеклянное волокно» – волокно щелочного состава или волокно бесщелочного состава с защитным покрытием. Следует учитывать, что величина адгезии твердеющих гипса и ГЦПВ к стеклянному волокну с защитным покрытием меньше, чем к непокрытому. Прочность при изгибе армированного гипса достигает максимальной величины при содержании стеклянного волокна в количестве 6 %, а затем падает. Прочность при изгибе ГЦПВ достигает максимальных значений при содержании стеклянного волокна бесщелочного и щелочного состава соответственно 8 и 7 % [15]. Звукопоглощающие гипсовые плиты, имеющие сквозную перфорацию, армируют дробленным стекложгутом. Такие изделия широко выпускаются промышленностью [16]. Для повышения прочности гипсовых плит возможно их армирование отрезками стеклянных волокон длиной 10-12 мм. В качестве армирующей добавки, улучшающей структуру и физико-механические свойства газогипса, известно применение (совместно со строительным гипсом и тонкомолотым карбонатом кальция) полимерных, базальтовых и стеклянных волокон. Введение волокон способствует повышению прочности газогипса, причем наибольший эффект достигается при использовании стеклянных волокон [17].

Текстильные волокна различной природы находят применение в производстве строительных изделий на основе цемента. Например, известно введение в состав цементных композитов разнообразных натуральных (лен, хлопок, джут, кокосовое волокно и др.) [18] и синтетических (полипропилен, полиакрилонитрил и др.) волокон [19-22]. При изготовлении легкого стенового материала применялось волокно льна в сочетании со вспученным перлитом [23]. Вместе с тем установлено, что введе-

ние волокон льна и хлопка в состав цементного композита приводит к нежелательному повышению водопоглощения изделий, причем льняное волокно способствует незначительному повышению прочности на сжатие, а хлопковое волокно – на изгиб [24].

Существует технология получения легкого кирпича из хлопчатобумажных отходов, взятых в количестве 1-5 %, отходов производства бумаги 85-89 масс. % и портландцемента [25]. Как преимущество такой технологии можно отметить большое количество вовлекаемых отходов, по существу, их утилизацию в полезный продукт. В качестве армирующего материала для теплоизоляционных материалов на основе цемента можно также использовать хлопковые волокна, шерстяные очесы.

Интересен способ производства отделочной плитки из древесной крошки, лицевой слой которой состоит из 70 % коротких восстановленных волокон и 30 % отходов волокон вискозы. Холст для лицевого слоя предложено получать аэродинамическим способом. Затем он должен подлежать обработке иглопробивным способом, пропитке фенолформальдегидной смолой, нарезке и прессованию вместе с панелями из древесной крошки. Панели предназначены для использования в строительстве для облицовки бетонных блоков, полов, при реконструкции и ремонте старых зданий [1].

Заметим, что применение натуральных волокон в качестве армирующего материала для строительных изделий имеет недостаток – низкую прочность волокон и их подверженность гниению и разложению во влажной среде.

Известно применение в качестве армирующих элементов для цементных композитов тканых сеток на основе углеродных волокон, увеличивающих несущую способность строительных изделий [26].

Представляют интерес работы по упрочнению цементных изделий и бетонов путем армирования их стеклянными и стальными волокнами, волокнами углерода, бора, монокристаллическими, керамическими, асбестовыми и другими волок-

нами. Применялось нейлоновое и полипропиленовое волокно длиной 16-38 мм в количествах соответственно 1-3 % и 0,2-2 % от объема цементного композита. Способ непрерывного производства панелей, армированных волокнистым материалом, предусматривал использование волокон длиной 20-100 мм в количестве 5-15 % от объема цементного композита [27].

Обратим внимание на отходы волокон лавсана, которые изготавливаются круглого сечения, имеют гладкую блестящую поверхность, характеризуются высокой упругостью. Лавсан не подвержен гниению во влажной среде, но его введение в состав цементного композита малоэффективно, поскольку это волокно взаимодействует с цементным композитом только механически, оно плохо обволакивается цементно-песчаной смесью и химически не взаимодействует с продуктами гидратации портландцемента. На поверхности раздела «волокно – цементный камень» не образуется промежуточной зоны, состав и свойства которой отличались бы от этих разнородных материалов. Как следствие, вклад волокон лавсана в упрочнение цементного композита невелик [28].

Использование стальных волокон при армировании цементных композитов эффективно [29], но требует учета их подверженности коррозии [30]. Исследования цементного композита (бетона), армированного стеклянными волокнами, показали некоторую склонность волокон к разрушению в щелочной среде [31]. В воде и водных растворах поверхностно-активных веществ прочность стеклянного волокна снижается до 50-60 %, полностью восстанавливаясь после высушивания. Механизм понижения прочности стеклянного волокна связан с адсорбционным воздействием среды, образованием трещин в слабых местах поверхностного слоя, приводящих к разрушению волокон. Вместе с тем отмечено, что применение полимерных, стеклянных, базальтовых волокон возможно в производстве автоклавных ячеистых бетонов [32].

Для армирования цементных композитов, подлежащих автоклавной обработке,

важно, чтобы волокно не теряло своих свойств после длительного воздействия водяного пара и температуры. С этой точки зрения могут быть перспективны полиамидные волокна. Температура плавления полиамидных волокон (за исключением рильсана) позволяет им выдерживать автоклавную обработку, проводимую в интервале температур 175-192 °С. Введение полиамидных волокон, в частности капрона, даже в незначительных количествах способно несколько повысить прочность автоклавного ячеистого бетона [33].

Для получения мелкозернистого бетона предлагается вводить в смесь до 5 % обрезков оптических волокон. Таким образом, можно получить декоративный эффект, названный «прозрачный бетон» [34]. Известно также введение в состав цементных композитов пучков синтетических волокон [35].

Большинство исследований показывают возможность применения отходов текстильных волокон в цементных композитах, гипсовых изделиях. К настоящему времени существует множество рекомендаций относительно количества вводимого волокна и его длины [27, 36-40], а также методов расчета критической длины волокон в цементном композите [27]. Количество вводимых в цементный композит волокон в большинстве случаев колеблется от 0,3 до 2 % по объему. Максимальное содержание волокон в гипсовых смесях, при котором достигается перемешивание без комкообразования, составляет 5 % от массы сухих компонентов [41].

Использование разнообразных по составу и свойствам текстильных отходов в производстве строительных материалов и изделий, безусловно, представляет практический интерес и является перспективным направлением. При этом достигается экономия сырьевых ресурсов, снижение себестоимости строительства, безопасная утилизация отходов, уменьшение их негативного влияния на окружающую среду. С учетом имеющейся огромной сырьевой базы в виде разнородных постоянно накапливающихся и требующих утилизации текстильных отходов необходима де-

тальная проработка рациональных способов введения всех типов текстильных отходов в разнообразные по составу строительные композиты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петканова Н.Н., Урумова Д.Г., Чернев В.П. Переработка текстильных отходов и вторичного сырья: пер. с болг. / под ред. А.М. Чельшева. М.: Легпромбытиздат, 1991. 240 с.
2. Каюмова Р.Ф., Невольни Ю.М. Пути использования текстильных отходов на примере межклеточных выпадов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 1. С. 108...113.
3. Рациональное использование отходов производства в швейной промышленности. Экспресс-информация. Серия: Легкая промышленность. Рига: ЛатНИИНТИ, 1981. 7 с.
4. Баранова А.Ф., Мамедов С.Н., Погодина И.В. Минимизация объема отходов, генерируемых текстильной промышленностью // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2019. № 5. С. 283...287.
5. Федосов С.В., Щепочкина Ю.А., Румянцев В.Е., Коновалова В.С. Вторичные материальные ресурсы для строительной индустрии. Иваново: ИВГПУ, 2017. 188 с.
6. Дворкин Л.И., Пашков И.А. Строительные материалы из отходов промышленности. Киев: Вища шк., 1989. 208 с.
7. Brzyski P. Właściwości termoizolacyjne materiału ściennego opartego na wapnie i paździerzach konopnych // Izolacja. 2019. No 2. S. 46...50.
8. Ailenei E.C., Ionesi S.D., Dulgheriu I., Loghin M.C., Isopescu D.N., Maxineasa S.G., Baciu I.R. New Waste-Based composite material for construction applications // Materials, 2021. Vol. 14. Is. 20. P. 6079.
9. Patnaik A., Mvubu M., Muniyasamy S., Botha A., Anandjiwala R.D. Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies // Energy and buildings. 2015. Vol. 92. P. 161...169.
10. Дворкин Л.И., Пашков И.А. Строительные материалы из промышленных отходов. Киев: Вища шк., 1980. 142 с.
11. Ucar M., Wang J. Utilization of recycled post-consumer carpet waste fibers as reinforcement in lightweight cementitious composites // International Journal of Clothing Science and Technology. 2011. Vol. 23. Is. 4. P. 242...248.
12. Rushforth I., Horoshenkov K.V., MirafTAB M., Swift M.J. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpetwaste // Applied Acoustics. 2005. Vol. 66. Is. 6. P. 731...749.
13. Щепочкина Ю.А. Утилизация отходов первичной переработки льна и шерсти // Охрана труда и окружающей среды на предприятиях текстильной и легкой промышленности: межвуз. сб. науч. тр. Иваново, 1998. С. 104...105.
14. А. с. 628129 СССР. Сырьевая смесь для производства керамзита. Заявл. 09.03.1977; опубл. 15.10.1978. Бюл. № 38.
15. Гордавишевский П.Ф., Перов П.В., Шингин С.И., Карначева О.В. Армирование гипсовых и гипсоцементнопуццолановых изделий стекловолокном // Строительные материалы. 1977. № 3. С. 24...25.
16. Белов В.В., Петропавловская В.Б., Храмов Н.В. Строительные материалы. Тверь: Тверской гос. техн. ун-т, 2014. 236 с.
17. Ильина Л.В., Завадская Л.В. Газогипсовые изделия, армированные стекловолокном // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 5. С. 52...54.
18. Румянцев В.Е., Коновалова В.С., Румянцев Е.В., Одицова О.И., Касьяненко Н.С. Использование отходов текстильной промышленности в производстве строительных композитов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности, 2021. № 6. С. 21...29.
19. Jarabo R., Fuente E., Savastano H., Negro C. Effect of sepiolite on mechanical and physical properties of fiber cement // ACI Materials journal. 2014. Vol. 111. Is.4. P. 355...362.
20. Смирнова О.М., Андреева Е.В. Свойства тяжелого бетона, дисперсно-армированного синтетическим микроволокном // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 17...20.
21. Skrikanth Koniki, Ravi Prasad. Badania wytrzymałości oraz zależności naprężenie-odkształcenie betonu o dużej wytrzymałości zbrojonego mieszaniam włókien polipropylenowych i poliestrowych // Cement. Wapno. Beton. 2018. No 1. S. 67...77.
22. Bodak P. Analiza wzmocnień typu NSM materiałami FRP w świetle badań eksperymentalnych // Przegląd budowlany. 2019. No 3. S. 22...28.
23. Fic S., Brzyski P. Badanie kompozytu opartego na lekkich wypełniaczach (len i perlit) do zastosowań w budownictwie jako materiał ścienny // Przegląd budowlany. 2015. No 2. S. 30...35.
24. Щепочкина Ю.А. Мелкозернистые бетоны, армированные волокнами хлопка и льна // Интеграция образования и науки: вызовы современного мира: сб. матер. II Междунар. науч.-практ. конф. Актобе, 2015. С. 287...290.
25. Rajput D., Bhagade S.S., Raut S.P., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. Reuse of cotton and recycle paper mill waste as building material // Construction and building materials. 2012. Vol. 34. P. 470...475.
26. Симаков О.А. Применение в качестве внешнего армирования железобетонных элементов тканых сеток из углеродных волокон // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2019. № 3. С. 57...61.
27. Дисперсно-армированный бетон и изделия из него. Тематическая подборка. Рига: ЛатНИИНТИ, 1979. 44 с.
28. Щепочкина Ю.А. Цементный композит с волокнами лавсана // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сб. матер. XXIV Междунар. науч.-

практ. форума “SMARTEX-2021”. Иваново: ИВГПУ, 2021. С. 158...160.

29. *Egem Teomete, Ozgun Ylким Kocyigit.* Zależność pomiędzy oporem elektrycznym i odkształceniem przy ścisnaniu kompozytów cementowych zbrojonych włóknami stalowymi // Cement. Wapno. Beton. 2015. No 4. S. 244...252.

30. *Щепочкина Ю.А.* Декоративные бетоны. Иваново: ИВГПУ, 2019. 120 с.

31. *Kasagani H., Rao C.B.K.* Wpływ dodatku szklanych włókien o jednakowej długości i mieszanych na właściwości betonu // Cement. Wapno. Beton. 2016. No 5. S. 361...372.

32. *Gębarowski P., Romanowski P.* Zbrojenie rozproszone w awtoklawizowanym betonie komórkowym // Materiały budowlane. 2018. No 3. S. 73...74.

33. *Щепочкина Ю.А.* Полиамидное волокно как армирующий материал для цементных композитов // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сб. матер. XXIII Междунар. науч.-практ. форума “SMARTEX-2020”. Иваново: ИВГПУ, 2020. С. 231...234.

34. *Дворкин Л.И., Дворкин О.Л.* Специальные бетоны. М.: Инфра-Инженерия, 2012. 368 с.

35. Пат. 2074153 РФ. Способ изготовления изделий на цементном вяжущем, пучки синтетических волокон, цементный продукт; заявл. 14.12.1988; опублик. 27.02.1997. Бюл. 6.

36. *Курбатов Л.Г., Романов В.П.* Некоторые вопросы проектирования и экономики конструкций, армированных стальными фибрами // Фибробетон и его применение в строительстве: сб. науч. тр. / под ред. Б.А. Крылова, К.М. Королева. М.: НИИЖБ, 1979. С. 12...23.

37. *Макаричев В.В.* О ячеистом бетоне, армированном волокнами // Фибробетон и его применение в строительстве: сб. науч. тр. / под ред. Б.А. Крылова, К.М. Королева. М.: НИИЖБ, 1979. С. 84...86.

38. *Sturm A.B., Visintin P., Farries K., Oehlers D.J.* New testing approach for extracting the shear friction material properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete // Materials in Civil Engineering. 2018. Vol. 30. 04018235-1...04018235-13.

39. *Гусев Б.В., Ин Иен-лян С., Кузнецова Т.В.* Цементы и бетоны – тенденции развития. М.: Научный мир, 2012. 136 с.

40. *Glinicki M.* Odporność na pękanie i trwałość kompozytów cementowych z włóknami szklanymi. XLIII konferencja naukowa «Problemy naukowo-badawcze budownictwa», Poznań – Krynica 1997. S. 17...24.

41. *Брюкнер Х., Дейлер Е., Фитч Г. и др.* Изготовление и применение гипсовых строительных материалов: пер. с нем. под ред. В.Б. Ратинова. М.: Стройиздат, 1981. 223 с.

## REFERENCES

1. *Petkanova N.N., Urutova D.G., Chernev V.P.* Processing of textile waste and secondary raw materi-

als: Trans. from bolg. / Edited by A.M. Chelyshev. M.: Legprombytizdat, 1991. 240 p.

2. *Kayumova R.F., Nevolani Yu.M.* Ways of using textile waste on the example of the remnants of the fabric between patterns // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023. No. 1. P. 108...113.

3. Rational use of production waste in the garment industry. Express information. Series: Light industry. Riga: LatNIINTI, 1981. – 7 p.

4. *Baranova A.F., Mammadov S.N., Pogodina I.V.* Minimize the amount of waste generated by the textile industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2019. No. 5. P. 283...287.

5. *Fedosov S.V., Shchepochkina Yu.A., Rumyantseva V.E., Konvalova V.S.* Secondary material resources for the construction industry. Ivanovo: IVSPU, 2017. 188 p.

6. *Dvorkin L.I., Pashkov I.A.* Building materials from industrial waste. Kiev: Vishcha shk., 1989. 208 p.

7. *Brzyski P.* Właściwości termoizolacyjne materiału ściennego opartego na wapnie i paździerzach konopnych // Izolacja. 2019. No. 2. S. 46...50.

8. *Ailenei E.C., Ionesi S.D., Dulgheriu I., Loghin M.C., Isopescu D.N., Maxineasa S.G., Baciu I.R.* New Waste-Based composite material for construction applications // Materials, 2021. Vol. 14. Is. 20. P. 6079.

9. *Patnaik A., Mvubu M., Muniyasamy S., Botha A., Anandjiwala R.D.* Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies // Energy and buildings. 2015. Vol. 92. P. 161...169.

10. *Dvorkin L.I., Pashkov I.A.* Building materials from industrial waste. Kiev: Vishcha shk., 1980. 142 p.

11. *Ucar M., Wang J.* Utilization of recycled post-consumer carpet waste fibers as reinforcement in lightweight cementitious composites // International Journal of Clothing Science and Technology. 2011. Vol. 23. Is. 4. P. 242...248.

12. *Rushforth I., Horoshenkov K.V., Mirafteb M., Swift M.J.* Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpetwaste // Applied Acoustics. 2005. Vol. 66. Is. 6. P. 731...749.

13. *Shchepochkina Yu.A.* Utilization of waste from primary processing of flax and wool // Labor and environmental protection at textile and light industry enterprises: mezhvuz. sb. scientific tr. Ivanovo, 1998. P. 104...105.

14. A. s. 628129 USSR. Raw mixture for the production of expanded clay. Application 09.03.1977; publ. 15.10.1978. Bul. 38.

15. *Gordavshevsky P.F., Perov P.V., Shingin S.I., Karnacheva O.V.* Reinforcement of gypsum and gypsum cement products with fiberglass // Construction materials. 1977. No. 3. P. 24...25.

16. *Belov V.V., Petropavlovskaya V.B., Khramtsov N.V.* Building materials. Tver: Tver State Technical University, 2014. 236 p.

17. *Ilyina L.V., Zavadskaya L.V.* Gas gypsum products reinforced with glass fiber // International

Journal of Applied and Fundamental Research. 2011. No. 5. P. 52...54.

18. *Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Rumyantsev E.V., Odintsova O.I., Kasyanenko N.S.* The use of textile industry waste in the production of building composites // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. No. 6. P. 21...29.

19. *Jarabo R., Fuente E., Savastano H., Negro C.* Effect of sepiolite on mechanical and physical properties of fiber cement // *ACI Materials journal*. 2014. Vol. 111. Is. 4. P. 355...362.

20. *Smirnova O.M., Andreeva E.V.* Properties of heavy concrete dispersed-reinforced with synthetic microfibre // *Building materials*. 2016. No 11. P. 17...20.

21. *Skrikanth Koniki, Ravi Prasad.* Badania wytrzymałości oraz zależności naprężenie-odkształcenie betonu o dużej wytrzymałości zbrojonego mieszania włókien polipropylenowych i poliestrowych // *Cement. Wapno. Beton*. 2018. No 1. S. 67...77.

22. *Bodak P.* Analiza wzmocnień typu NSM materiałami FRP w świetle badań eksperymentalnych // *Przegląd budowlany*. 2019. № 3. S. 22...28.

23. *Fic S., Brzyski P.* Badanie kompozytu oparte go na lekkich wypełniaczach (len i perlit) do zastosowań w budownictwie jako materiał ścienny // *Przegląd budowlany*. 2015. No 2. S. 30...35.

24. *Shchepochkina Yu.A.* Fine-grained concrete reinforced with cotton and flax fibers // *Integration of education and science: Challenges of the modern world. II International Scientific and Practical Conference*. Aktobe, 2015. P. 287...290.

25. *Rajput D., Bhagade S.S., Raut S.P., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A.* Reuse of cotton and recycle paper mill waste as building material // *Construction and building materials*. 2012. Vol. 34. P. 470...475.

26. *Simakov O.A.* The use of a woven mesh of carbon fibers as external reinforcement of concrete elements // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2019. No. 3. P. 57...61.

27. *Dispersed reinforced concrete and products from it. Thematic selection*. Riga: LatNIINTI, 1979. 44 p.

28. *Shchepochkina Yu.A.* Cement composite with lavsan fibers // *Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials. XXIV International Scientific and Practical. Forum "SMARTEX-2021"*. Ivanovo, 2021. P. 158...160.

29. *Egem Teomete, Ozgun Ylkim Kocyigit.* Zależność pomiędzy oporem elektrycznym i odkształceniem przy ścisaniu kompozytów cementowych zbrojonych włóknami stalowymi // *Cement. Wapno. Beton*. 2015. No 4. S. 244...252.

30. *Shchepochkina Yu.A.* Decorative concrete. Ivanovo: IVGPU, 2019. 120 p.

31. *Kasagani H., Rao C.B.K.* Wpływ dodatku szklanych włókien o jednakowej długości i mieszanych na właściwości betonu // *Cement. Wapno. Beton*. 2016. No 5. S. 361...372.

32. *Gębarowski P., Romanowski P.* Zbrojenie rozproszone w awtoklawizowanym betonie komórkowym // *Materiały budowlane*. 2018. No 3. S. 73...74.

33. *Shchepochkina Yu.A.* Polyamide fiber as a reinforcing material for cement composites // *Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials. XXIII International Scientific and Practical. Forum "SMARTEX-2020"*. Ivanovo, 2020. P. 231-234.

34. *Dvorkin L.I., Dvorkin O.L.* Special concretes. M.: Infra-Engineering, 2012. 368 p.

35. Pat. 2074153 of the Russian Federation. Method of manufacturing products on cement binder, bundles of synthetic fibers, cement product; application No. 14.12.1988; publ. 27.02.1997. Bul. 6.

36. *Kurbatov L.G., Romanov V.P.* Some issues of design and economics of structures reinforced with steel fibers // *Fibrobeton and its application in construction* / Edited by B.A. Krylov, K.M. Koroleva. M.: NIIGB, 1979. P. 12...23.

37. *Makarichev V.V.* About cellular concrete reinforced with fibers // *Fibrobeton and its application in construction* / Edited by B.A. Krylov, K.M. Korolev. M.: NIIGB, 1979. – P. 84-86.

38. *Sturm A.B., Visintin P., Farries K., Oehlers D.J.* New testing approach for extracting the shear friction material properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete // *Materials in Civil Engineering*, 2018. – vol. 30. 04018235-1...04018235-13.

39. *Gusev B.V., Ying Yen-liang S., Kuznetsova T.V.* Cements and concretes – development trends. M.: Scientific World, 2012. 136 p.

40. *Glinicki M.* Odporność na pęknięcie i trwałość kompozytów cementowych z włóknami szklanymi. XLIII konferencja naukowa "Problemy naukowo-badawcze budownictwa", Poznań – Krynica 1997. S. 17...24.

41. *Brukner H., Deiler E., Fitch G. etc.* Manufacture and application of gypsum building materials: Translated from German / Edited by V.B. Ratinov. M.: Stroyizdat, 1981. 223 p.

Рекомендована кафедрой естественных наук и технософферной безопасности ИВГПУ. Поступила 28.08.23.

УДК 677.027.511:7.048

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_192

**МОТИВ РОЗЫ В РУССКИХ ПЕЧАТНЫХ ТКАНЯХ.  
КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР**

**THE ROSE MOTIF IN RUSSIAN PRINTED FABRICS.  
BRIEF HISTORICAL OVERVIEW**

*E.B. МОРОЗОВА*

*E.V. MOROZOVA*

(Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))  
(Kosygin University, Moscow, Russia)

E-mail: morosowa8888@mail.ru

*Растительных мотивов, которые имели бы долгую жизнь в орнаменте, не много. Их отбор происходил в течение тысячелетий. Одним из таких мотивов является роза. Растение имеет глубокую символику. На Русь роза попадает в XVII веке. Сложная форма цветка потребовала определенных приемов изображения, которые постепенно формировались в русских печатных тканях. Со временем появились наиболее устойчивые схемы изображения, показывающие цветок с наиболее выгодного ракурса. Набор схем позволил не только передавать характерные черты растения, но и сделать изображение розы удобным для рисования и печати на тканях.*

*There are not many plant motifs that would have a long life in the ornament. Their selection took place over thousands of years. One of these motifs is a rose. The plant has a deep symbolism. The rose comes to Russia in the XVII century. The complex shape of the flower required certain image techniques, which were gradually formed in Russian printed fabrics. Over time, the most stable image schemes appeared, showing the flower from the most favorable angle. A set of schemes allowed not only to transfer the characteristic features of the plant, but also to make the image of a rose convenient for drawing and printing on fabrics.*

**Ключевые слова:** мотив розы, русские печатные ткани, трансформация, символика розы, приемы изображения, устоявшиеся схемы изображения розы.

**Keywords:** Rose motif, Russian printed fabrics, transformation, rose symbolism, image techniques, established rose image schemes.



Орнамент издавна находится в центре внимания исследователей самых разных областей знаний: от археологов и этнографов до историков и математиков. Каждый вид прикладного искусства имеет свои особенности в трактовке и расположении форм. Однако основное внимание исследователей сосредотачивалось на стилевых особенностях изображения мотивов в зависимости от эпохи. Так, известный этнограф С.В. Иванов, подтверждая эту мысль, подчеркивал, что при изучении орнамента исследователей прежде всего интересуют такие аспекты, как сюжет, идейное содержание, знаковая природа (указание на принадлежность роду, племени и т.д.), а сам характер орнамента, особенности формы представляются второстепенными, «мало или почти ничего» не дающими [1, с. 23]. Поскольку объектом исследования является практика художественного проектирования текстильного печатного рисунка XVII-XX вв., для исследования использовался метод сравнительного анализа и классификации.

Растительных мотивов, которые имели бы долгую жизнь в орнаменте, не много. Их отбор происходил в течение тысячелетий. Одним из таких мотивов является роза [2, с. 286-287].

Родиной цветка считают Иран и Закавказье, оттуда он распространяется по странам Древнего Востока, а затем попадает в Грецию и Рим [3, с.132-137]. В Западную и Северную Европу роза была завезена в эпоху крестовых походов XI-XII вв., а на Русь это растение попадает только во времена царствования Михаила Федоровича, в первой половине XVII в. [4, с. 162].

Почему именно этот цветок оказался столь любимым у многих народов, существует несколько версий. В работе Д. Стренг «Символика розы» приводятся высказывания Фрейда и др. о том, что преимущество этого цветка перед другими объясняется его круглой формой и особой конфигурацией лепестков, что в свою очередь рождает ассоциации с женским началом. Создает ощущение целостности и совершенства, воплощающегося в прекрасных формах цветка, и даже вызывает

ассоциацию с солнцем [5, с. 17]. По мнению самой исследовательницы, привлекательность цветка состоит в упорядоченности и ясности его строения вопреки нарастающей сложности и хаосу [5, 4, с. 5].

Овалоидная или шарообразная форма цветов розы, множество лепестков, довольно сложной конфигурации листьев, шипы – все это потребовало определенных приемов изображения. Уже на первых, дошедших до нас от античности изображениях этого цветка, относящихся к I в. до н.э. – I в. н.э. (фрески Помпеи), можно видеть стремление, если не к схематизации и доведению абриса формы до знака, то к определенной стилизации, к выявлению наиболее выгодного ракурса и меры обобщения, к передаче объема. Следует отметить, что в орнаментальных гирляндах розы передавались более обобщенно, чем, например, в сюжетных сценах.

В искусстве древнего Востока изображение розы трактуется в виде плоской узорчатой розетки (Передняя Азия). Позже, в XI-XVI вв., мотив розы можно видеть на иранских и турецких парчовых тканях в виде изящных бутонов с вытянутыми узкими чашелистиками (этот мотив особенно популярен в Турции) и в виде узорчатой розетки «анфас».

В европейском средневековом искусстве роза также встречается только в виде узорчатых розеток (готическая роза) (существует также мнение, что «готическая роза» есть не что иное, как плоское изображение лотоса (вид сверху)).

Интерес к этому цветку именно как орнаментальному мотиву возникает лишь в эпоху барокко, когда в основу его изображения были положены реалистические традиции античного искусства. Вновь после долгого забвения «насыщенные жизненными соками гирлянды» [6, с. 20] и букеты покрывают пышным орнаментом мебель, посуду, гобелены. Изображения цветов, как правило, больше натуральной величины, среди них преобладают махровые. В их передаче чувствуется экспрессия. Именно в это время мотив розы получает одну из трактовок, которая затем так часто будет встречаться в декоративно-

прикладном искусстве. Это круглой или несколько овальной формы пышный цветок, переданный в самом выгодном ракурсе – сверху и немного сбоку, так что центр розы смещен к верхнему краю, а несколько нижних лепестков чаще всего бывают отогнутыми.

В искусстве рококо в розе подчеркивается ее изящество. В это время ведущие позиции в производстве шелковых тканей занимает Франция. К работе над эскизами для них привлекаются известные художники. Рисунки этого времени отличаются тщательной проработкой, тонкой передачей света и тени, а изображение цветов становится максимально приближенным к природным прототипам, а подчас и излишне натуралистичным. Изображение розы в шелковых тканях оказало несомненное влияние и на набойку – аналогичный мотив стал популярен и там.

Искусство классицизма, по существу, варьирует уже найденные мотивы. Наиболее популярны в конце XVIII в. шелковые декоративные ткани по эскизам Филиппа де Лассалья в стиле Людовика XVI с изображением различных сцен в обрамлении крупных цветов – роз, шиповника.

Изображение многолепестковых цветов в русской набойке появляется во второй половине XVII в., когда в трактовке плоских узорчатых розеток возникает некоторая пространственность. Другую группу представляют рисунки, интерпретирующие китайские мотивы. Здесь цветы, напоминающие пионы или лотосы, имеют характерный ракурс – одновременно сбоку и несколько сверху. Линии, передающие строение, изгибаются таким образом, что создается впечатление объема. В конце XVII – начале XVIII в. более тесное общение со странами Запада приводит к проникновению в русское искусство уже готовых художественных образов и форм, сложившихся в системе западноевропейского искусства в течение длительного времени. Реформы Петра I в области одежды, заставившие носить платье старого образца, потребовали более легких, драпирующихся тканей. На смену тяжелым восточным и итальянским бархатам и аксамитам прихо-

дят французские шелковые ткани, появление и использование которых в России относится к началу XVIII в.

Под влиянием образцов западного текстиля в орнаменте русских тканей появляются такие мотивы, как реалистически трактованные букеты и гирлянды пышных цветов, в том числе и роз, изображения ваз, кружев, элементов архитектуры и т. д. Появляется светотеневая разработка этих мотивов.

С открытием первых русских мануфактур начинается интенсивный процесс заимствования и переосмысления новых мотивов и композиционных решений. Я.П. Гарелин отмечает, что, например, Соков, один из основателей первых мануфактур в Иванове, привез образцы рисунков «с шлиссельбургских, петербургских и московских иностранных фабрик» [7, с. 146]. Однако это свидетельствует не об отсутствии творческой мысли у самих предпринимателей, а о стремлении как можно скорее выйти на конкурентоспособный уровень.

Образцы русских тканей конца XVIII – начала XIX в. отличаются большим стилевым разнообразием. Здесь и композиции с крупными цветами и плодами в стиле барокко, и динамично изогнутые ленты в стиле рококо, орнаментальные полосы в стиле классицизма, травяные орнаменты, сохраняющие традиции русской набойки XVII в., восточные мотивы. Такое разнообразие стилевых решений нельзя объяснить только веянием моды или вкусами потребителей. Происходит поиск своего почерка в оформлении набивных тканей. Это время можно назвать новым этапом в развитии русской школы печатной ткани.

Специфика набивного рисунка и сложная конфигурация розы потребовали определенных приемов в изображении цветка. Доведенные до совершенства, эти приемы, по существу, представляют собой схематизированное изображение розы, ее знак: как правило, это цветок, переданный совершенно плоскостно с помощью линии и пятна и приближающийся по форме к кругу или 5-7-лепестковой симметричной розетке (рис. 1, а). Такое схематизирован-

ное изображение розы с ее реалистическими (рис.1, б) и обобщенными (рис. 2) формами встречается с самого начала появления мотива на русских набивных тканях.



а) б)  
Рис. 1

Таким образом, в феномене устойчивости мотива розы важную роль играют технические приемы, лежащие в основе его изображения. Один из них – это использование характерного ракурса: для реалистических изображений – трехчетвертного (вид сверху и несколько сбоку – рис. 1, б), для схематизированных – одновременное совмещение «анфасного» и «профильного» изображений (рис. 1, а).

Другим характерным приемом является использование наклона, т.е. возможное несовпадение осей симметрии внешнего контура и середины цветка (оси могут перекрещиваться под небольшим углом), так что в мотиве всегда присутствует движение (рис. 2).

Силуэт розы никогда не бывает геометрически правильным и симметричным, но в количестве и расположении внешних лепестков существует определенная закономерность.



а) б)  
Рис. 2

Рассмотрим наиболее типичные примеры:

- узорные сросшиеся лепестки группируются по два-три снизу, два по бокам (иногда боковые лепестки образуют пары) и по два-три лепестка сверху (рис. 3, а);
- нерасчлененная масса лепестков передана в виде круглой или несколько овальной розетки с волнистыми краями (рис. 3, б);
- бутон шарообразной формы с «оборочкой» из двух-трех лепестков (встречаются изображения и без нижних лепестков) (рис. 3, в).

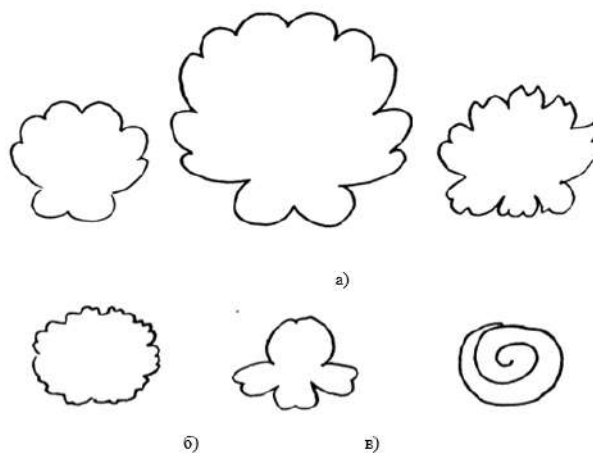


Рис. 3

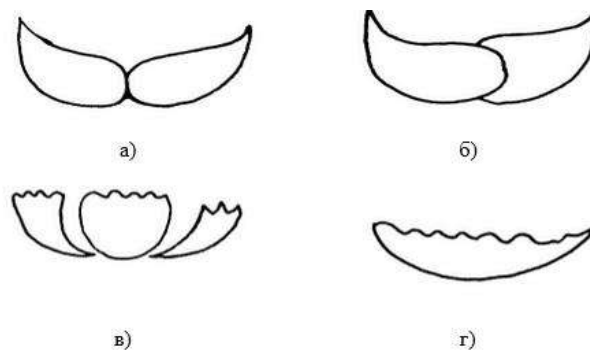


Рис. 4

Для обозначения внутреннего строения также существует ряд приемов. Так, лепестки, обнимающие основную массу цветка и образующие второй ряд, могут передаваться следующим образом:

- два лепестка располагаются симметрично, изгибаются вверх и создают ложе для верхних лепестков (рис. 4, а);

- два лепестка заходят один за другой (рис. 4, б);
- второй ряд состоит из трех отдельных узорчатых лепестков, один из которых находится в центре, а два более узких – по бокам (рис. 4, в);
- масса лепестков не расчленена и образует чашу с узорчатыми краями (рис. 4, г).

Наконец, середина цветка может быть изображена как широко раскрытой, с тычинками в середине (см. рис. 1, а, рис. 2, а), так и в виде массы туго скрученных лепестков (см. рис. 1, б).

Все эти приемы к началу XIX в. уже сложились, и устойчивость мотива розы во многом объясняется устойчивостью этих приемов, и на многих современных тканях мы находим розу такой же, как и четыре века назад.

## ВЫВОДЫ

Выявлены основные закономерности, определяющие устойчивость растительного мотива в орнаменте.

**Схематизация.** Для каждого устойчивого мотива вырабатывается одна или несколько его стилизованных схем. Мотив может изображаться с разной степенью стилизации, и эта степень определяется конкретными художественными задачами. Стилизованное, доведенное, по сути, до универсальной схемы изображение остается неизменным на протяжении веков.

**Простота и узнаваемость схемы.** Приемы, лежащие в ее основе, должны быть простыми для исполнения.

**Пластичность.** Формируемый в орнаменте в течение времени силуэт растения становится не только «символом» того или иного цветка, но и удобным в использовании орнаментальным мотивом традиционных тканей.

**Семантика** важна преимущественно на стадии становления мотива. Впоследствии она может измениться или совсем исчезнуть. Мотив розы первоначально обладал определенной символикой. И именно за-

ложенная в ней информация и заставила искать не только самые характерные черты данного растения, но и формы, отражающие суть вкладываемого в него содержания. Благодаря обобщенной форме данный мотив без труда находил отклик в искусстве разных народов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов С.В.* Народный орнамент как исторический источник // Советская этнография. 1958. №2. С. 3...25.
2. *Мифы народов мира.* Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1982. 716 с.
3. *Веселовский А.Н.* Из поэтики розы // Избранные статьи. Л.: Худ. лит., 1939. №4. С. 1...4.
4. *Олеарий А.* Описание путешествия в Московию и через Московию в Персию и обратно. СПб.: Из-во А.С. Суворина, 1906. Гл. XXXV. С. 158...165.
5. *Streng G.* Das Rosettenmotiv in der Kunst und Kulturgeschichte. Munchen, 1918. 80 s.
6. *Соболев Н.Н.* Очерки по истории украшения тканей. М.; Л.: Akademia, 1934. 433 с.
7. *Гарелин Я.П.* Город Иваново-Вознесенск или бывшее село Иваново и Вознесенский посад Владимирской губернии. В 2 ч. Шуя, 1885. 140 с.

## REFERENCES

1. *Ivanov S.V.* Folk ornament as a historical source // Soviet Ethnography. 1958. No. 2. Pp. 3...25.
2. *Myths of the peoples of the world.* Vol. 2. M.: Soviet Encyclopedia, 1982. 716 p.
3. *Veselovsky A.N.* From the poetics of the rose // Selected articles. L.: Hood. Lit., 1939. No. 4. Pp. 1...4.
4. *Olearius A.* Description of the journey to Muscovy and through Muscovy to Persia and back. St. Petersburg: A.S. Suvorin, 1906. Ch. XXXV. Pp.158...165.
5. *Streng G.* Das Rosettenmotiv in der Kunst und Kulturgeschichte. Munchen, 1918. 80 s.
6. *Sobolev N.N.* Essays on the history of fabric decoration. M.; L.: Akademia, 1934. 433 s.
7. *Garelin Ya.P.* The city of Ivanovo-Voznesensk or the former village of Ivanovo and the Voznesensky Posad of the Vladimir province: in 2 parts. Shuya, 1885, 140 s.

Рекомендована кафедрой декоративно-прикладного искусства и художественного текстиля РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)). Поступила 26.05.23.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНИКИ «НУНОФЕЛТИНГ»  
С ЦЕЛЮ СОЗДАНИЯ УНИКАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ  
В ЭТНОСТИЛЕ**

**THE INVESTIGATION OF THE "NUNOFELTING" FEATURES TECHNIQUE  
TO CREATE UNIQUE MODELS IN ETHNIC STYLE**

*А.К. КУДАБАЕВА<sup>1</sup>, А.О. ШЕНЦОВА<sup>1</sup>, С.А. МИРАЛИ<sup>1</sup>, А.М. КАЛИЕВ<sup>2</sup>*

*A.K. KUDABAYEVA<sup>1</sup>, A.O. SHENTSOVA<sup>1</sup>, S.A. MIRALI<sup>1</sup>, A.M. KALIYEV<sup>2</sup>*

*(<sup>1</sup>Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Республика Казахстан,  
<sup>2</sup>Дом моды «Асыл - дизайн», Республика Казахстан)*

*(<sup>1</sup>M.Kh. Dulaty Taraz Regional University, Republic of Kazakhstan,  
<sup>2</sup>Fashion House «Asyl - Design», Republic of Kazakhstan)*

*E-mail: nyrdaylet73@mail.ru, adressnastya@mail.ru  
Aidarkhan.ceo@gmail.com, Sanjar93@gmail.com*

*В статье представлен способ изготовления многослойного полотна из войлока в технике «нунофелтинг» в этностиле с раскладкой на принтованный шифон, изготавливаемый методом сублимационной печати. Рассмотрены техника изготовления, востребованность и ценность изделий из войлока, представлен анализ роли войлочных изделий в жизни кочевых народов Казахстана, рассмотрены вопросы использования нуновойлока для изготовления валяльно-войлочных изделий женского ассортимента, орнаментальных композиций для художественно-колористического оформления изделия, использования войлока дизайнерами при изготовлении современной одежды, а также серийного изготовления войлочных изделий. Авторы предлагают развивать творческо-проектную деятельность по применению войлока, так как декоративно-прикладное искусство помогает сохранять национальную идентичность. В представленных моделях коллекции женской одежды из войлока используются сочетания войлока с шифоном с национальными узорами и орнаментами, что позволяет рассматривать изделия из войлока как бренд Казахстана.*

*The article presents a manufacturing method of a multilayer felted fabric with the "nunofelting" technique in an ethno style with a layout on printed chiffon made by sublimation printing. The technique of manufacturing, the demand and value of felt products are considered, the analysis of the role of felt products in the life of the nomadic peoples of Kazakhstan is presented, the issues of the use of felt for the manufacture of felting products of women's assortment, ornamental compositions for artistic and coloristic design of the product, the use of felt by designers in the manufacture of modern clothing, as well as serial manufacture of felt products are considered. The authors propose to develop creative and project activities with the use of felt, as decorative and applied art helps to preserve national identity. Combinations of felt with chiffon are used with national patterns and ornaments in the presented models of women's felt clothing collection, allowing felt products to be considered as a brand of Kazakhstan.*

**Ключевые слова:** войлок, многослойное полотно, войлоковаление, техника нунофелтинг, принтованная ткань, изделие, качество.

**Keywords:** felt, multilayer fabric, felting, nunofelting technique, printed fabric, product, quality.

*Introduction.* The opportunity to represent Kazakhstani fashion outside the country has contributed to the fact that many fashion designers have changed their attitude to traditional clothing and the ways of its production. The appearance of new technologies for molding parts makes it possible to increase the clothing manufacturing production efficiency and reduce their technological process by eliminating some of its stages. The prospects of using felt for these purposes are due to the good consumer properties of wool materials, primarily high hygienic indicators - air permeability/porosity and moisture capacity, as well as operational - wear resistance/durability and resistance to pilling. The advantages of felt products are: the possibility of manufacturing form-resistant volumetric parts without seams; the formation of a package of materials with specified properties while reducing the thickness and quantity of applied materials used; reducing the material intensity and manufacturing complexity [1,2]. This determines the prerequisites for the creation of an innovative technology of making clothes from environmentally friendly materials. Yu.Yu. Firsova [3], L.S. Bektemirova [4], J.A. Sydykova [5] belong to the scientific research that was carried out in the field of felting technology, the development of methods for designing and manufacturing felt products, S.G. Batyreva, who studied the history and ethnoculturology of felt products from museum collections in Russia [6].

*Research methods.* The felt manufacturability is known, which is provided due to the felting capacity of wool fibers and the high molding ability of semi-processed products from them, there is experience in small-scale manufacturing of molded felt hats and shoes. However, the problem of mass production of voluminous felt clothing in the "nunofelting" technique has not been studied yet. There are no practical and theoretical approaches to the manufacture of parts and items of such cloth-

ing in accordance with the specified requirements. It is necessary to form the concept of the felt products design process in the "nunofelting" technique, combining the stages from the creation of a draft design, the manufacture of a felt semi-processed product to the manufacture and finishing of the product into a single continuous technological process.

Modern technologies and materials have helped to take a fresh look at felting and ways of using it. Nunofelting is one of the modern technologies for decorating felt products. The essence of this technology is the felting of wool to fabrics. So, one canvas is obtained from two completely different materials called nunofelting.

The object of the study is the technological process of obtaining a nuno-canvas made of felt with chiffon and making models from them women's suits, differing in a variety of shapes and types of prints.

The aim of the research work is to create a multi-layered canvas in the "nunofelting" technique by putting layers of wool fibers on the basis of printed chiffon fabric for the manufacture of unique costume models. The following tasks have been set to achieve this goal:

- analysis of existing methods of manufacturing felt products and ways to improve them to create a multi-layered canvas in the "nunofelting" technique, which contributes to the expansion of the artistic and decorative variety of the range of sewing products;
- study of the influence of technological parameters of the fabric manufacturing process on the properties of felt clothing parts;
- improvement of the "nunofelting" technique for creating a multi-layered fabric used for designing clothing details of a given volumetric shape made of felt and its texture;
- testing the results of the work.

The scientific novelty of the work consists in:

- the developed "nunofelting" technique for the of multilayer fabrics manufacture used for felt parts of clothing, taking into account changes in their properties and geometric parameters in the manufacturing process;

- creation of a multi-layered fabric by putting layers of wool fibers on the base, which is used as a printed chiffon fabric;

- in expanding the prospects for the development of textile design when creating unique models of clothing made of felt.

Experimental studies were conducted in the laboratory of the Fashion House "Asyl - design". The practical significance of the obtained results lies in the development of:

- technologies for manufacturing printed products of volumetric shape from multilayer felt cloths;

- expansion of the range of products made of felting materials, characterized by the originality of the artistic and compositional solution of printed chiffon.

*Results and discussion.* The felting technique has been a life-determining factor for many nomadic people for centuries. This is a kind of applied art that has an extensive base of techniques and methods of execution and a promising prospect for its development. The topicality of the research topic is also due to the fact that modern Kazakhstan is experiencing a period of national revival. The work is aimed at reviving traditional craftsmanship, searching for a method of obtaining a unique material, as well as improving the felting technique. The spread of felt craft on the territory of Kazakhstan is not accidental, because the Great Kazakh Steppe hosted caravans of the Great Silk Road in the oases of its cities and villages for many centuries. This has caused the nomads to be proud of their historical achievements, such as mobile, portable home made of felt (yurts), riding clothes, leather and felt products. The naturalness, environmental friendliness, lightness and practicality of felt, as well as the healthy properties of sheep wool are highly appreciated all over the world. The favourite material of nomadic people – felt, has become one of the most relevant and modern today [7,8].

In the well-known technologies of nunofelting, a template method is used for the

manufacture of various types of clothing, limiting the possibility of choosing a certain model. The method of obtaining a multilayer canvas, described by the author Shinkovskaya K.A., is widely known, according to traditional technology, the decor of the canvas is composed fragmentally, when its layout is fulfilled in advance, taking into account the shrinkage coefficient of 30% [9...11].

In the presented work, the production of multilayer fabrics based on a nunofelting fabric to create unique models consists in creating them by putting layers of wool fibers on a base as which a printed fabric is used.

Printed fabric is a fabric, the author's drawing of which is applied by sublimation printing [12], and the size of the fabric is selected in accordance with the selected model. Then the wool fibers are laid out in layers, the number of which depends on the selected assortment. Next, the roll, drying and wet-heat treatment is carried out on the resulting canvas. Such an introduction makes it possible to obtain a multi-layered fabric convenient for standard cutting methods, as well as to produce it at any time of the year, increasing its plastic properties, diversifying its texture, color scheme and artistic and compositional solution of the pattern. Carefully selected printed fabrics are used for the proposed method of manufacturing multilayer fabrics, depending on the design project. The best option is light fabrics with a "loose" structure (silk, chiffon, linen, viscose, cotton, etc.). Initially, chiffon is printed on sublimation equipment and the layout of the future product is laid in the fabric pattern, taking into account the shrinkage coefficient. The size of the used printed chiffon corresponds to a width of 1 m. 48 cm. and a length of 2 m. 50 cm, as shown in Photo 1.

The shrinkage coefficient of the presented method is 30%. This felting technique involves laying out wool, taking into account shrinkage and processing. The choice of the method and the quality of the layout depend on the tone and length of the wool fiber, its uniformity, the preparatory passed processes and the skill of the performer. Then the wool fibers are laid on printed chiffon and the process of wet felting is carried out. The intro-

duction of a regular longitudinal-transverse layout during "wet" felting made it possible to control the thickness of the fabric being manufactured and achieve a unique fineness without significant loss of strength. The presented technique of "nunofelting" can be enriched by the insertion of various printed materials, which contributes to the enrichment of the color palette and the variety of texture of canvases.



Photo 1

The peculiarity of the fabrics selection for the nunofelting technique is the use of a discharged cloth according to the structure, which provides fast and easy rolling. When viewed through the lumen, small holes are visible, for example, as on gauze or discharged silk.

Chiffon is a completely smooth and even material, so it is used in felting. In the experimental work, printed chiffon with the "crash" effect was used. The use of printed chiffon with a "loose" structure allows you to get a thin, smooth, homogeneous and bright fabric, which allows you to make the canvas dense and plastic [13].

Chiffon is printed on sublimation equipment and the layout of the future product is laid in the fabric drawing, taking into account the shrinkage coefficient. The composition of the drawing can be on any subject, in this case in an ethno-style. The size of the printed chiffon used corresponds to a width of 1 m 48 cm and a length of 2 m 50 cm. The shrinkage coefficient of the presented method is 30%. The shrinkage coefficient can vary between 30-50% depending on the material used (wool, chiffon).

Strands of wool is evenly spread out on the printed chiffon in 2-4 layers. 2-4 thin lay-

ers of wool are processed, laid out perpendicular to each other in order to get a homogeneous, light and dense fabric. The strands of the first layer are placed vertically, the second – horizontally, the third – vertically, the fourth – horizontally, etc. After the layout is completed, it is thoroughly moistened with warm (water temperature 40-45 ° C) soapy water, using a synthetic mesh and a covering cloth, which cover the layout from above.

After the compacted layout, the fabric is turned over to the front side (the side of the printed chiffon) and the chiffon is "rubbed" into the wool over the entire surface. In the process of work, chiffon and wool are firmly bonded due to the gradual introduction of strands of felt into the weaving of the fabric, where they cling on both sides of the canvas. The fibers must smooth out to penetrate the weave and then begin to absorb the fabric. When the chiffon "grabs" with the wool, soap is added, the product is turned to the other side and continued to roll. warm water is used (water temperature 40-45 ° C) at the initial processing stages. When hot water is used, the wool may fall off too quickly, without having time to absorb the fabric. Only when the fiber penetrates into the weave and the base of the chiffon, you can use hot water (water temperature 50-60 ° C) to speed up the stalling process.

After the chiffon "grabs" with the wool, the canvas begins finally to fall off: roll and toss. The finished canvas has the following appearance: chiffon firmly bonded with wool and "wrinkles" and folds appeared on it. The cloth is rinsed in warm (water temperature 30° C), and then in cold water and dried in a straightened form. Then they proceed to wet-heat treatment so that the surface of the canvas becomes even and smoother, after which the details of a certain product are cut. You can get up to four different models from size 44 to 54 from one ready multilayer canvas in "nunofelting" technique.

Multilayer fabrics obtained by the proposed method, respectively, and ready-made models are in great demand due to the original and unique texture of the fabric, high heat-protective and healing properties of natural wool, weight, as well as ethnic design [14].



The method of manufacturing multilayer canvases based on printed chiffon in the "nunofelting" technique expands the prospects for the development of textile design when creating unique clothing models. Knowledge of the using raw materials and the ability to embody artistic and technical techniques that form a constructive and ornamental plot solution make it possible to produce creations by felting, generating the phenomena of decorative and applied art, bearing a significant aesthetic load, enriching the subject environment surrounding of a person.

*Conclusion.* Thus, improving the quality of felted clothing requires taking into account the peculiarities of small-scale production of felting products, which makes it relevant to develop a scientifically based method of designing and manufacturing multilayer felt canvases with printed chiffon fabric, creating new images that reflect exclusively the author's understanding of shape, color and material.

The structure of the manufacturing process of multilayer felt cloths with printed chiffon fabric has been developed, including the acceptance of raw materials, the production of printed fabric, the preparation of the canvas, self-assembly, roll with pre-molding, final

roll, refinement of details, drying, finishing and their constituent elements.

A method has been developed for manufacturing a multilayer fabric with a 2-layer wool strand laid out on printed chiffon, which allows creating a thin nuno-cloth, while laying the number of layers of wool is carried out depending on the assortment being developed: in 2 layers - light, designed for a dress and blouse assortment and in 4 layers – dense for jackets and coats.

The proposed "nunofelting" technique was tested to obtain a multilayer canvas and manufacture of felt products using the example of models of women's jackets and coats. Currently, creative author's works with the use of felt are relevant in Kazakhstan, as decorative and applied art helps to preserve national identity. In collections of felt clothing, combinations of felt with other materials are used, creating unusual images, photo 2, shows models of the assortment of light clothing and photo 3 - the upper assortment group in "nunofelting" technique. The ability to combine modern trends, forms and materials with national patterns and ornaments gives rise to extremely interesting works. Felt products become the hallmark and brand of Kazakhstan.



Photo 2



Photo 3

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Зарецкая Г.П.* Разработка метода проектирования и способа изготовления формованных деталей одежды: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГАЛП, 1993. 120 с.
2. *Асанова Б.А.* Казахский художественный войлок как феномен кочевой культуры: автореф. дис. ... канд. искусствоведения. Алматы, 2009. 16 с.
3. *Фирсова Ю.Ю.* Метод художественного проектирования формоустойчивой одежды из валяльно-войлочных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 20 с.
4. *Бектемирова Л.С.* Разработка методов модификации деталей одежды из войлока на основе комбинаторных принципов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 23 с.
5. *Сыдыкова Ж.А.* Разработка метода проектирования и изготовления деталей одежды объемной формы из войлока: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 25 с.
6. *Батырева С.Г.* Войлок в традиционном быту калмыков, художественная обработка // Искусство Евразии. 2017. №3(6). С. 8...15.
7. *Понсар А.В.* Разработка новых методов художественного проектирования одежды и обуви из валяльно-войлочных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 16 с.
8. Производство войлочных изделий номадов Евразии как феномен мировой культуры / Б.П. Торебаев, М.Ж. Джакипбекова, А.Н. Кенжибаева, К.О. Ханазарова, С.У. Карибаев, Л.Т. Ибрагимова // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 5 (389). С. 122...127.
9. *Шинковская К.А.* Войлок. Все способы валяния. М.: АСТ-Пресс, 2019. 176 с.
10. Чудесный войлок. Идеи для валяния / пер. с нем. С.Н. Одинцовой. М.: Арт-Родник, 2014. 130 с.
11. *Смирнова Е.* Чудеса из войлока. Уроки мокрого валяния. СПб.: Питер, 2014. 32 с.
12. *Гарифуллина Г.А., Муртазина С.А.* Изготовление печатных рисунков на полимерных тканях методом сублимационной печати // Вестник Казан. технологического ун-та. Казань: КНИТУ, 2012. №3. С. 73...75.
13. *Бузов Б.А., Алыменкова Н.Д.* Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности (швейное производство): учебник для студ. вузов. М.: Академия, 2004. 448 с.
14. А. с. 33389 Республика Казахстан. Способ изготовления многослойных полотен тканей в технике нунофелтинг для создания уникальных моделей одежды / А.М. Калиев, А.О. Шенцова, от 10.07.2017.
- parts. Dis. on the application. learned. step. Candidate of Technical Sciences. M.: MGALP, 1993. 120 p.
2. *Asanova B.A.* Kazakh artistic felt as a phenomenon of nomadic culture. Autoref. diss. cand. art. - Almaty: 2009. 16 p.
3. *Firsova Yu.Yu.* Method of artistic design of form-resistant clothing made of felting and felt materials. Abstract of dissertation of the Candidate of Technical Sciences. M., 2015. 20 p.
4. *Bektemirova L.S.* Development of methods for modifying felt clothing parts based on combinatorial principles. Abstract of dissertation of the Candidate of Technical Sciences. M., 2013. 23 p.
5. *Sydykova Zh.A.* Development of a method for designing and manufacturing three-dimensional clothing parts from felt. Abstract of dissertation of the Candidate of Technical Sciences. M., 2011. 25 p.
6. *Batyreva S.G.* Felt in the traditional life of the Kalmyks, artistic processing // Art of Eurasia. 2017. No. 3(6). Pp. 8...15.
7. *Ponsar A.V.* Development of new methods of artistic design of clothing and footwear made of felting and felt materials. Autoref. diss. Candidate of Technical Sciences. M., 2009. 16 p.
8. Manufacture of felt products of eurasian nomads as a phenomenon of the world culture / B.P. Torebaev, M.Zh. Dzhakipbekova, A.N. Kenzhibaeva, K.O. Khanazarova, S.U. Karibayev, L.T. Ibragimova // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2020. No. 5 (389). Pp. 122...127.
9. *Shinkovskaya K.A.* Felt. All the ways of felting. M.: AST-Press, 2019. 176 p.
10. Schones aus Fliz: Flizideen Translated by Odintsovo S. Wonderful felt. Ideas for felting. M.: Art-Rodnik, 2014. 130 p.
11. *Smirnova E.* Miracles made of felt. Wet felting lessons. St. Petersburg: St. Petersburg, 2014. 32 p.
12. *Garifullina G.A., Murtazina S.A.* Production of printed drawings on polymer fabrics by sublimation printing // Bulletin of Kazan. technological university. Kazan: KNITU, 2012. No. 3. Pp. 73...75.
13. *Buzov B.A., Alymenkova N.D.* Materials science in the production of light industry products (sewing production): Textbook for students University. M.: Academy, 2004. 448 p.
14. Copyright certificate for invention No. 33389 dated 10.07.2017. Kaliev A.M., Shentsova A.O. A method for manufacturing multilayer fabrics in the nunofelting technique for: creating unique clothing models.

Рекомендована кафедрой дизайна и индустрии моды Таразского регионального университета им. М.Х. Дулати. Поступила 21.09.23.

## R E F E R E N C E S

1. *Zaretskaya G.P.* Development of a design method and a method of manufacturing molded clothing

## КОСТЮМЫ ДЛЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ ФОТОСЕССИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ЦИФРОВИЗАЦИИ

### COSTUMS FOR THEMATIC PHOTO SHOOTS WITH ELEMENTS OF DIGITALIZATION

Р.Ф. КАЮМОВА, Д.А. ЛОПАТИНА, А.А. ИВАНОВА

R.F. KAYUMOVA, D.A. LOPATINA, A.A. IVANOVA

(Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия)  
(Ufa State Petroleum Technological University)

E-mail: karuf1@yandex.ru, dashrammzz@gmail.com, anta.treate@mail.ru

*Продление жизненного цикла одежды направлено на решение экологических проблем, связанных с сокращением срока носки одежды. Одним из надежных и доступных способов продления жизненного цикла одежды является ее аренда. Аренда одежды – это экологически ответственный способ использования модной одежды, который позволяет минимизировать текстильные отходы [1, 2, 3]. Стабильно высокой популярностью при этом пользуется аренда тематических костюмов, что позволяет создавать уникальные и запоминающиеся фотографии, которые отражают определенную тему или концепцию.*

*В статье на основе проведенных авторами маркетинговых исследований определены наиболее востребованные в настоящее время направления тематических фотосессий. Представлен алгоритм процесса организации тематических «цифровых фотосессий», а также разработаны модели трансформируемых изделий по наиболее востребованным потребителями направлениям. Модели могут быть представлены и использованы как в цифровом виде, так и в материале.*

*Extending the life cycle of clothing is one of the best solutions to environmental problems associated with recycling. One of the reliable and affordable ways to extend the life cycle of clothing is to rent it. Renting clothes is an environmentally responsible way of using fashionable clothes, which minimizes textile waste [1,2,3]. At the same time, the rental of themed costumes enjoys consistently high popularity, which allows you to create unique and memorable photos that reflect a certain theme or concept.*

*In the article, based on the marketing research conducted by the authors, the most popular directions of thematic photo shoots are currently identified. The algorithm of the process of organizing thematic "digital photo sessions" is presented below, and models of transformable products have been developed in the areas most in demand by consumers. Models can be presented and used both digitally and in the material.*

**Ключевые слова:** тематические фотосессии, косплей, жизненный цикл одежды, цифровые двойники, 3D модели.

**Keywords:** thematic photo shoots, cosplay, clothing life cycle, digital doubles, 3D models.

Последние несколько лет набирают популярность тематические фотографии с использованием необычных костюмов и декораций. Это подтверждают результаты проведенных авторами за последние 5 лет маркетинговых исследований [4, 5]. Чаще всего под подобными фотосессиями понимают косплей, сущность которого заключается в перевоплощении в различные роли, а именно переодевании в костюмы и передаче характера, пластики тела и мимики персонажей компьютерных игр, кинематографа, литературы, комиксов, аниме и манги. Это увлечение требует изготовления костюмов, сложных конструктивно и технологически, а также элементов атрибутики выбранного персонажа [6].

Предположительно косплей мог зародиться в давние времена, когда у людей появлялась тяга к перевоплощениям в различные образы. На основе наблюдений, зафиксированных этнографами, сделан

вывод о том, что первая форма перевоплощения человека в иное существо, вероятно, была связана с охотничьей маскировкой, репетицией охоты и в полной мере сформировалась в первобытный период [7]. Практика символического перевоплощения человека в другое существо путем переодевания получила развитие во время тотемических зоофагических праздников («зоомистерий»), которые знаменовали собой окончание периода охоты. Во время танца первобытные люди символически перевоплощались в своих тотемных предков, надевая на себя звериные шкуры, головы животных, позже маски и другие атрибуты тотемного животного или растения. На рис. 1 показаны моменты переодевания на примерах: а) калифорнийского индейца-охотника; б) охотника в Нигерии; в) тотемических плясок индейцев Америки.



Рис. 1

В 1939 году на первом международном фестивале научной фантастики World Science Fiction Convention (Woldcon) писатель-фантаст Форрест Дж. Акерман появился в футуристическом костюме, похожем на своих вымышленных героев, что привело к массовым подражаниям, а в 60-е годы группы молодых людей создавали и примеряли на себя персонажей и костюмы из научно-фантастических книг и фильмов [8].

С каждым днем косплей и костюмированные фотосессии набирают все большую популярность. Зачастую люди покупают одежду специально для подобных меро-

приятий и надевают ее лишь раз, в дальнейшем купленные костюмы лежат в гардеробе без дела, тем самым обесценивая ресурсы, затраченные на их производство. Поэтому растет количество крупных фотостудий, предоставляющих тематические костюмы в аренду, в таких городах, как Санкт-Петербург и Москва.

Проведенный нами маркетинговый опрос подтвердил заинтересованность людей в подобных фотосессиях (рис. 2). При изучении рынка арендуемой одежды выявлено, что большинство предлагаемых костюмов имеют малый разброс в размерах, а большие размеры и вовсе отсутствуют.

Взяли бы вы одежду в каком-нибудь из представленных образов в аренду?  
119 ответов

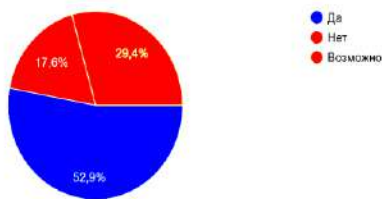


Рис. 2

Часто ли вы сталкиваетесь с проблемой подходящего размера одежды в аренду?  
114 ответов

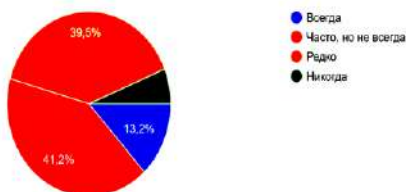


Рис. 3

Это также является причиной, по которой многие не берут одежду в аренду (рис. 3). Поэтому предложено создавать модели костюмов, трансформирующиеся в несколь-

ко размеров, например, один предмет одежды на фигуры с 40 по 44 размер. Такой подход позволяет уменьшить количество текстильных отходов и производственные затраты (вместо трех костюмов – один).

Еще одним способом уменьшения объема текстильных отходов и снижения углеродного следа является использование 3D моделирования [9]. В Уфимском государственном нефтяном техническом университете в условиях организованного кибер-ателье есть возможность получения цифрового двойника любого человека для проектирования костюма любой сложности. Полученные таким образом 3D модели можно использовать для создания цифровой «фотосессии»: с помощью такой технологии человека можно запечатлеть в любом образе на двойнике или готовой фотографии. Полученные 3D модели также можно использовать в игровой индустрии, киноиндустрии, рекламе, сувенирной продукции (печать индивидуальных статуэток).

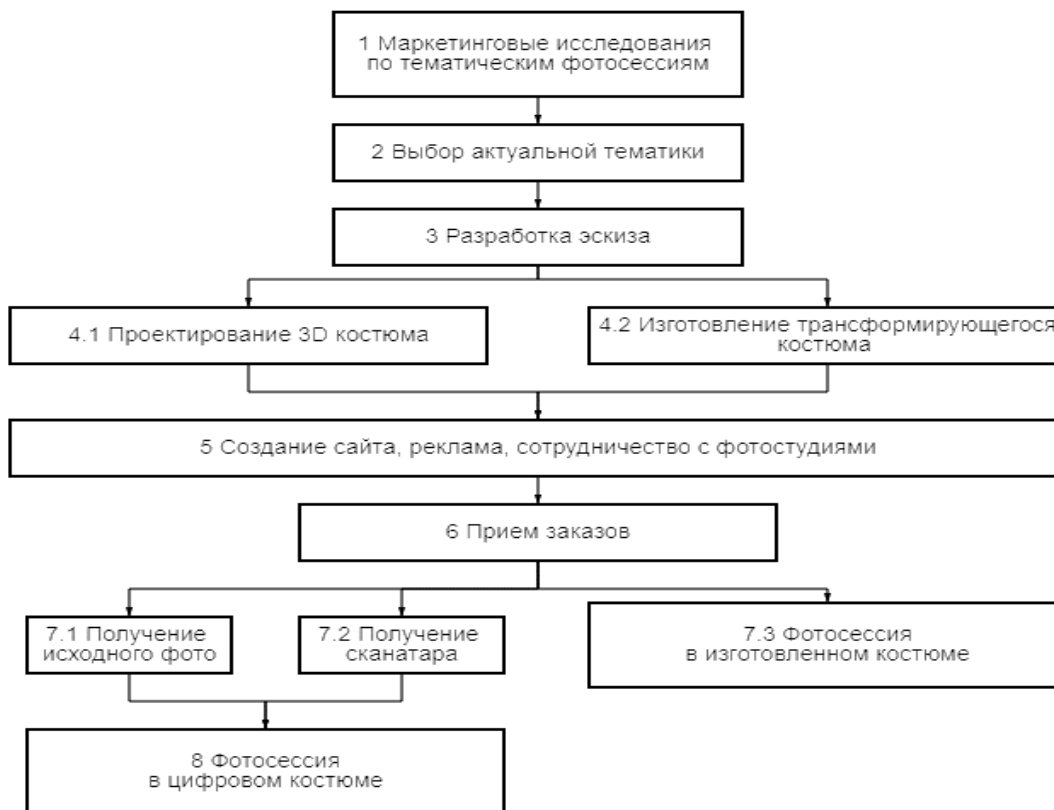


Рис. 4

Процесс организации тематической фотосессии в цифровом формате и непосредственно в фотоателье с использованием «живых» костюмов состоит из следующих этапов (рис. 4):

1. На первом этапе проводят исследования рынка на предмет проводимых в городе или республике фотосессий и одежды, сдаваемой в аренду, выявляются ведущие конкуренты, проводятся опросы потенциальных клиентов.

2. На основе полученных данных определяют наиболее актуальные и востребованные идеи для фотосессий и костюмов.

3. Разрабатывают эскизы коллекции моделей с учетом возможной трансформации на фигуру человека, выбирают наиболее интересные модели.

4.1. Выполняют проектирование 3D костюма. Создают 3D модели одежды по эскизам.

4.2. Выполняют конструирование, моделирование и пошив костюмов с элементами трансформации и в капсульном варианте.

5. Разрабатывают сайт, продумывают рекламу и варианты сотрудничества с фотостудиями, продвигают услугу и эскизы костюмов в социальных сетях. Заключают договоры с фотостудиями в городе, предоставляя в аренду тематические костюмы и декорации под образы, предлагая им новую услугу «Цифровая фотосессия». Фотостудии предоставляют фото клиента для дальнейшей ее обработки с 3D костюмом либо отправляют клиента для создания сканатара для проектирования диджитал фото.

6. При приеме заказов обсуждают с клиентом пожелания по костюму и декорациям, уточняют вид фотосессии (цифровая по фото или сканатару или в фотостудии).

7.1. Получают исходное фото. Для наложения 3D одежды на фото необходима фотография, которая соответствует определенным требованиям, например, должна быть плотно прилегающая одежда телесного оттенка. Созданием подобных снимков занимается фотостудия, с которой заключен договор о сотрудничестве. В по-

следующем на подобный снимок можно наложить любой из разработанных авторами цифровой наряд.

7.2. Получают сканатар человека. В случае, если человек хочет полностью перенести свой облик в 3D пространство, необходимо получить его цифровой двойник с помощью сканера (в лаборатории УГНТУ). В результате можно полностью отрегулировать костюм, окружение, положение человека и ракурс, что позволит получить интересные снимки, а клиенту сэкономить время на фотосессии: одно сканирование может заменить несколько походов в фотостудию. При этом разработанные и изготовленные модели могут участвовать в съемках постоянно.

7.3. Организуют фотосессию в готовых костюмах на фотостудии на фоне выбранных декораций. При этом используют капсулы из деталей одежды схожей тематики, что позволит персонализировать костюм для каждого клиента.

8. Проводят фотосессию в цифровом костюме. При этом 3D костюм может быть сведен с фото, предоставленного фотостудией. Также возможно создание снимков в 3D программе, например, в Clo3d с помощью сканатара человека и готовых цифровых костюмов.



Рис. 5

Основываясь на результатах маркетинговых исследований, авторы разработали

эскизы трансформирующейся тематической одежды для фотосессий по двум наиболее востребованным направлениям: семейным фотосессиям в одном стиле «Familylook» и одиночным сказочным образам. Они представлены в двух вариантах: трансформации внутри костюма и в виде капсульных образов.

На рис. 5 представлен семейный образ в лесной тематике с трансформацией внутри костюма. В женском костюме трансформации по ширине подлежат рукава, спинка и перед, раздвижка происходит при помощи эластичных шнуров на уровнях обхвата плеча, локтя и запястья, ширины спины, ширины груди. Также регулируется ширина по линии обхвата груди и линии талии. Баска пристегнута к блузке на тесьму-молнию. Рукава могут быть съемными. Юбку также возможно регулировать по длине, используя нижние юбки разного уровня.



Рис. 6

На рис. 6 представлены сказочные образы для фотосессии. Элементы представленных моделей можно в последующем использовать для создания новых индивидуальных костюмов, как показано на рисунке: вторая и третья модель представляют собой некий симбиоз первой и четвертой. Это демонстрирует капсульный подход к ассортименту разрабатываемых костюмов в аренду.

Кроме того, планируется активно использовать при изготовлении тематических костюмов экологичные ткани из растительного сырья (крапивы и конопли).

Разработка процесса организации нового вида услуг – «цифровой тематической фотосессии», основанной на сдаче одежды в аренду, позволит продлить жизненный цикл изделий, уменьшить объем текстильных отходов и снизить величину углеродного следа на планете.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Carbon Footprint in Textiles – CreateFashion. – <https://createfashionbrand.com/carbon-footprint/> (дата обращения: 14.09.2023).
2. Can fashion ever be sustainable? – <https://azvision.az/mobile/news.php?lang=en&id=121905> (дата обращения: 14.09.2023).
3. *Chris Remington*. Reducing the carbon footprint in textile manufacturing. *Ecotextile news*. – 2020. – <https://www.ecotextile.com/sponsored-content/reducing-the-carbon-footprint-in-textile-manufacturing.html> (дата обращения 16.08.2023)
4. *Каюмова Р.Ф.* Управление ассортиментом на малых предприятиях легкой промышленности Республики Башкортостан // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2018. № 1 (373). С. 10...14
5. *Лопатина Д.А., Иванова А.А.* Косплей как инструмент индустрии моды // *Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы («ПОИСК-2023»): сб. матер. межвуз. (с международным участием) молодежной науч.-техн. конф.* Иваново: ИВГПУ, 2023. С. 128.
6. Косплей – это... – <https://sinonim.org/t/косплей#орг> (дата обращения: 14.09.2023).
7. Феномен косплея: культурные прототипы и тренды. – <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen-kospleya-kulturnye-prototypy-i-trendy> (дата обращения: 14.09.2023).
8. История косплея. Косплей в Америке. – <https://dtf.ru/read/132892-istoriya-kospleya-kospley-v-amerike-chast-1> (дата обращения: 14.09.2023).
9. *Баранова А.Ф., Мамедов С.Н., Погодина И.В.* Минимизация объема отходов, генерируемых текстильной промышленностью // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 5 (383). С. 283...287.

#### REFERENCES

1. Carbon Footprint in Textiles – Create Fashion. – <https://createfashionbrand.com/carbon-footprint/> (access date: 09.09.2023).
2. Can fashion ever be sustainable? – <https://azvision.az/mobile/news.php?lang=en&id=121905> (accessed 14.09.2023).
3. *Chris Remington*. Reducing the carbon footprint in textile manufacturing. *Ecotextile news*. – 2020. – <https://www.ecotextile.com/sponsored->

content/reducing-the-carbon-footprint-in-textile-manufacturing.html (accessed 14.09.2023).

4. *Kayumova R.F.* Assortment management at small enterprises of light industry of the Republic of Bashkortostan // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2018. No. 1 (373). P. 10...14.

5. *Lopatina D.A., Ivanova A.A.* Cosplay as a tool of the fashion industry // Sat. mat. interuniversity (with international participation) youth scientific and technical conference "Young scientists for the development of the national technological initiative "SEARCH-2023". Ivanovo, 2023. P. 128.

6. Cosplay is... . – <https://sinonim.org/t/cosplay#opr> (accessed 14.09.2023).

7. The phenomenon of cosplay: cultural prototypes and trends. – <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomen->

[kospleya-kulturnye-prototypy-i-trendy](#) (accessed 14.08.2023).

8. History of cosplay. Cosplay in America. – <https://dtf.ru/read/132892-istoriya-kospleya-kospley-v-amerike-chast-1> (accessed 14.09.2023).

9. *Baranova A.F., Mamedov S.N., Pogodina I.V.* Minimization of the volume of waste generated by the textile industry // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2019. No. 5 (383). P. 283...287.

Рекомендована кафедрой технологии и конструирования одежды Уфимского государственного нефтяного технического университета. Поступила 04.10.23.

---



УДК 678; 541.12

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_209

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ  
ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА\***

**PREDICTION OF STRESS RELAXATION FIBROUS COMPOSITE MATERIAL  
BASED ON DYNAMIC ANALYSIS DATA**

*И.В. ОБВЕРТКИН, К.А. ПАСЕЧНИК, С.Ю. ВОРОНИНА*

*I.V. OBVERTKIN, K.A. PASECHNIK, S.YU. VORONINA*

(Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева)

(Reshetnev Siberian State University of Science and Technology)

E-mail: 79632609742@yandex.ru

*Данная работа представляет исследование релаксации напряжений полимерного волокнистого композиционного материала под нагрузкой в зависимости от времени, температуры и величины деформации. Испытания на релаксацию при различных температурах проводились на образцах композиционного материала с помощью динамического механического анализатора. Основные мастер-кривые построены по результатам испытаний на основе гипотезы о суперпозиции времени и температуры. Параметры представленной модели релаксации напряжений подобраны путем минимизации различий между предсказаниями модели и экспериментальными данными.*

*This work is a study of stress relaxation of a fibrous composite material as a function of time under load, temperature and strain magnitude. Relaxation tests at various temperatures on composite material samples using a dynamic mechanical*

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России коллективом научной лаборатории «Интеллектуальные материалы и структуры» по проекту «Разработка многофункциональных интеллектуальных материалов и структур на основе модифицированных полимерных композиционных материалов, способных функционировать в экстремальных условиях» (номер темы FEFE-2020-0015).

*analyzer were carried out. The main master curves are constructed from test results based on the hypothesis of a superposition of time and temperature. The parameters of the presented model were selected by minimizing the differences between the model predictions and experimental data.*

**Ключевые слова:** ползучесть, волокнистый композиционный материал, углеродные волокна.

**Keywords:** creep, fiber-reinforced composite material, carbon fiber.

Благодаря уникальным свойствам волокнистых композиционных материалов они получили широкое распространение в аэрокосмической области, в том числе при производстве упруго-трансформируемых конструкций [1]. Однако на данный момент актуальной является задача подбора оптимальных материалов, которые обладают необходимыми свойствами, в частности устойчивостью к накоплению деформаций ползучести в процессе хранения упруго-трансформируемых конструкций в трансформируемом (деформированном) положении. Для оценки применимости волокнистого композиционного материала в трансформируемых конструкциях проведены исследования ползучести полимерного композиционного материала при уровнях деформаций, возникающих при перевозке и хранении трансформируемых конструкций в транспортном положении. Хотя конструкция может не разрушиться при воздействии нагрузок в течение короткого периода времени, она может быть склонна к разрушению или увеличению деформации при воздействии нагрузок в течение длительного периода времени. Полимер, который является матрицей композиционного материала, характеризуется как вязкоупругий материал, то есть деформация материала будет функцией как от напряжения, так и от времени [4]. Деформация образца под нагрузкой в процессе хранения содержит в себе три компонента: упругую, высокоэластичную и вязкого течения [5]. Поскольку в условиях релаксации напряжений деформация постоянна, то в процессе эксплуатации происходит перераспределение компонента деформации в зависимости от времени и приложенной нагрузки. В связи

с тем, что срок службы этих материалов часто измеряется десятками лет, в большинстве случаев нецелесообразно проводить длительные испытания на ползучесть в течение всего расчетного срока службы материала.

В качестве исследуемых материалов в работе использовали полимерный волокнистый композиционный материал, состоящий из полимерной матрицы на основе полиимида «Диармид-А» (РХТУ им. Д.И. Менделеева, Россия) и однонаправленных углеродных волокон Т35 (ООО «АСПРО», Россия). Образцы изготовлены методом ручной формовки при температурах 180 и 250 °С с использованием сушильного шкафа.

Для оценки температуры стеклования исследуемых образцов использовался метод динамического механического анализа с помощью DMAQ800 (TA Instruments, США) в Красноярском региональном центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН. Далее образцы подверглись исследованиям на стойкость к релаксации напряжений при постоянной деформации 0,3 %. Циклы релаксации и восстановления проводились при изотермах от 35 до 155 °С с интервалами повышения 20 °С. Нагрузка действовала на образец в течение 3 ч с последующим восстановлением в течение 3 ч.

Проведены испытания на определение температуры стеклования полимерной матрицы волокнистого композиционного материала методом ДМА при различных частотах нагрузки согласно ГОСТ Р 57739-2017.

Для композиционного материала на основе полиимида с температурами отверждения 180 и 250 °С получены данные, представленные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Частота нагружения f, Гц	Ln (f)	Температура стеклования T <sub>g</sub> , К	1000/T <sub>g</sub>
1	0	482,34	2,073226
1	0	481,12	2,078484
2	0,692147	487,28	2,052208
2	0,692147	486,67	2,05478
5	1,609438	494,37	2,022776
5	1,609438	496,23	2,015195

Таблица 2

Частота нагружения f, Гц	Ln (f)	Температура стеклования T <sub>g</sub> , К	1000/T <sub>g</sub>
1	0	493,85	2,024906
1	0	492,39	2,03091
5	1,609438	506,14	1,975738
5	1,609438	503,23	1,987163

Для нахождения энергии активации построим график Аррениуса в координатах обратной температуры стеклования и натурального логарифма частоты нагружения, представленный на рис. 1.

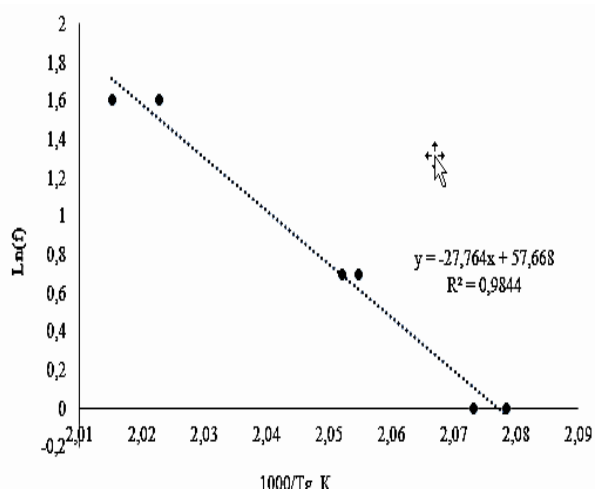


Рис. 1

Наклон кривой прямо пропорционален энергии активации стеклования (рис. 2).

Наклоны кривых зависимости логарифма частоты  $\ln(f)$  от обратной температуры  $(\frac{1}{T_g})$ , соответствуют энергии активации стеклования согласно выражению [1]:

$$\Delta H = -R \frac{d(\ln(f))}{d(\frac{1}{T_g})}, \quad (1)$$

где R – газовая постоянная.

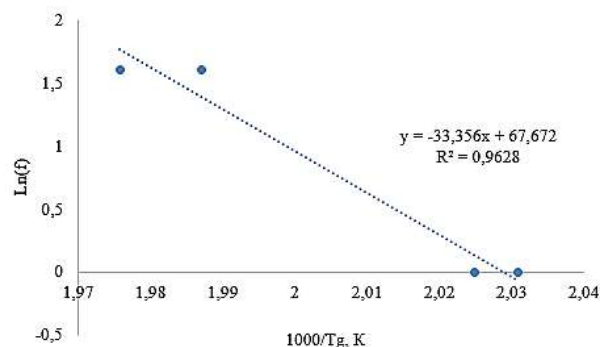


Рис. 2

Для полиимида, отвержденного при 180 °С, энергия активации  $\Delta H$  равна 230,8299 кДж/моль, а отвержденного при 250 °С – 277,3218 кДж/моль.

Используя допущения о постоянстве энергии активации в исследуемом температурном диапазоне, можно рассчитать коэффициент сдвига согласно уравнению [2]:

$$\log(a_T) = \frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \log e, \quad (2)$$

где  $T_{ref}$  и  $T$  – температуры эталонная и исследования соответственно.

После получения данных об энергии активации однонаправленный волокнистый композиционный материал был исследован на стойкость к релаксации напряжений при постоянной деформации, равной 0,3% (рис. 3).

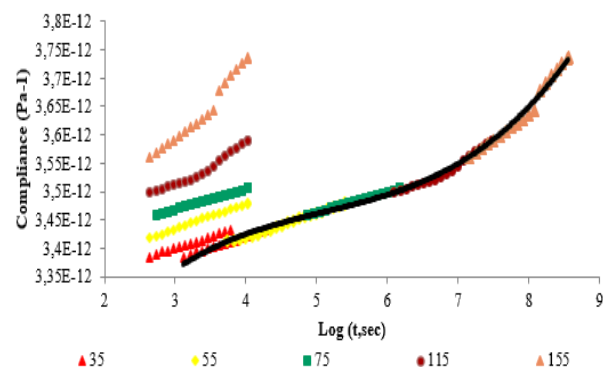


Рис. 3

Для построения мастер-кривой податливости в данной работе использовался ручной метод совмещения, поскольку коэффициент сдвига, предсказанный с помощью энергии активации, не позволяет совместить полученные данные.

После снятия нагрузки для каждого шага режима измерения было оценено восстановление деформации как отношение деформации, восстановленной после снятия нагрузки, к перемещению под действием постоянной силы в течение срока нагружения. На основании данных можно прогнозировать допустимый срок хранения изделия из композиционного материала под постоянной нагрузкой, задав допустимый предел остаточной деформации. Данные на рис. 3 представлены для температуры в 25 °С. Однако, используя метод температурно-временной суперпозиции, мы можем также спрогнозировать, насколько изменится срок сохранности изделия при изменении температуры.

На рис. 4 представлена зависимость величины остаточной деформации от времени экспозиций при постоянном уровне деформации после снятия нагрузки. На основании полученных данных можно определить допустимый срок хранения изделия в сложенном состоянии в условиях постоянной деформации, задав допустимый уровень остаточной деформации. Для наглядности зададим уровень допустимой остаточной деформации, равной 0,7 % от величины деформации материала в сложенном состоянии. Тогда можно сделать вывод, что расчетный срок хранения до достижения отказа составляет около 3,5 года при хранении при 25 °С, однако при хранении при 40 °С срок до наступления отказа сокращается до 8 месяцев.

Зачастую упруго-трансформируемые конструкции из волокнистого полимерного композиционного материала проектируются для аэрокосмической промышленности и эксплуатируются в диапазоне температур от -150 до +150 °С. В связи с этим возникает вопрос о времени достижения отказа конструкций при экстремальных температурах. При 150 °С время достижения выбранного порога остаточной деформации составляет 72 минуты, что необходимо учитывать при проведении испытаний и эксплуатации упруго-трансформированной конструкции.

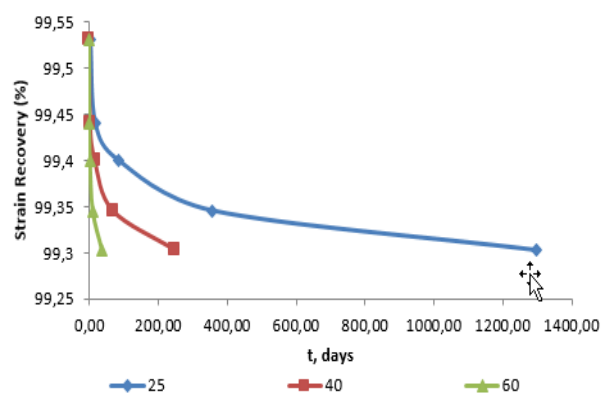


Рис. 4

Для валидации полученной мастер-кривой в диапазоне до ~4 лет выбран подход, при котором измеряют релаксацию напряжений во всем интересующем диапазоне при различных температурах (данные представлены в табл.3).

Таблица 3

Температура эксперимента, °С	Длительность эксперимента	Минимально оцениваемое время эксперимента
25	1666667 минут (3,2 года)	14 секунд
40	322484 минуты (7,5 месяца)	~1 минуты
60	45426 минут (1 месяц)	~9 минут
80	7990 минут (5,5 дня)	~50 минут
100	1693 минуты (1,2 дня)	~ 4 часов
120	420 минут	~16 часов
140	120 минут	~ 2 дня

Как видно из табл. 3, валидировать полученную мастер-кривую за разумное время возможно только с использованием данных, полученных при высоких температурах. В исследовании определены следующие температуры: 100, 120 и 140 °С.

Полученные данные о податливости перестроим в зависимость от количества времени выдержки в днях и сравним с мастер-кривой на рис. 5. Для данных, полученных при температуре 120 и 140 °С, также применен вертикальный сдвиг, чтобы нивели-

ровать вариативность свойств различных образцов.

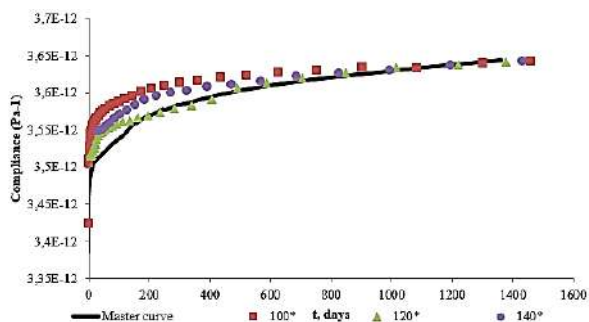


Рис. 5

Из полученных данных можно сделать вывод о достаточной достоверности полученной мастер-кривой релаксации напряжения.

Определим вязкоупругие характеристики волокнистого материала как функцию от времени при различных уровнях деформации и температуры. Для этого построим мастер-кривые для температур 25 и 100 °С в координатах напряжение–время (рис. 6 и 7).

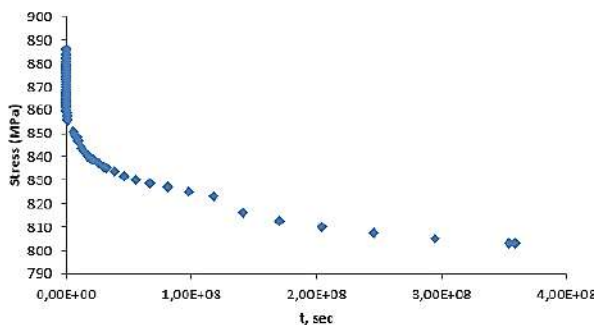


Рис. 6

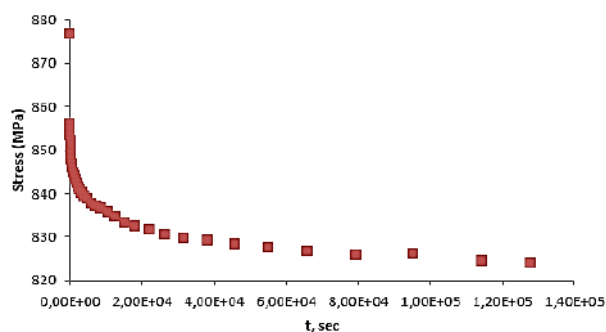


Рис. 7

Как следует из представленных графиков на рис. 6 и 7, зависимость напряжения  $\sigma$  от

времени  $t$  выдержки можно представить степенной функцией вида:

$$\sigma(t) = C_1 t^{C_2}. \quad (3)$$

Для учета влияния температуры введем компонент температуры  $T$  и получим зависимость вида:

$$\sigma(t) = C_1 * t^{C_2} * \exp\left(\frac{-C_3}{T}\right). \quad (4)$$

Опишем полученные экспериментальные данные моделью (4) и найдем ее параметры. Параметры модели представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

$C_1$	684,93
$C_2$	$-1,6667 * T * 10^{-5} - 5,8083 * 10^{-4}$
$C_3$	-93,13

На рис. 8 представлены кривые зависимости остаточной деформации в момент снятия нагрузки от температуры и времени выдержки под нагрузкой. Данную зависимость опишем моделью:

$$R(t) = C_1 * t^{C_2} * \exp\left(\frac{-C_3}{T}\right). \quad (5)$$

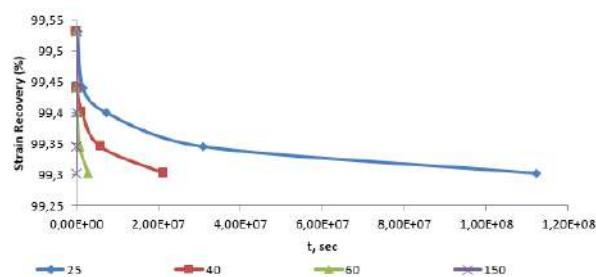


Рис. 8

Параметры модели (5) представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

$C_1$	90,59
$C_2$	$-3,4243 * T * 10^{-8} - 3,557983 * 10^{-4}$
$C_3$	-29,38

Степенной показатель времени в обеих моделях показывает явную зависимость от температуры (рис. 9).

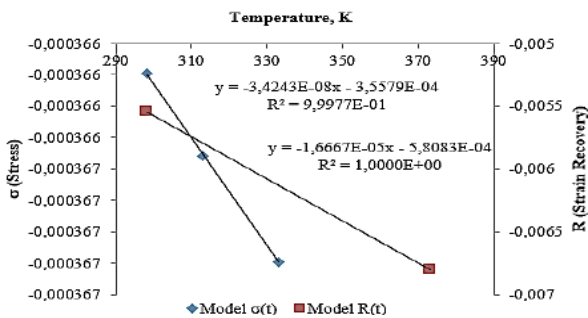


Рис. 9

Используя представленные модели, можно оценить величину напряжения и ве-

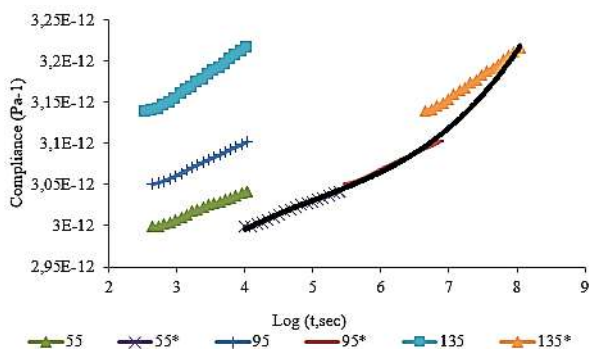


Рис. 10

На основании полученных данных построим зависимость напряжений от времени выдержки (рис. 11). Данные были подвергнуты вертикальному переносу для того, чтобы нивелировать разницу в жесткости/податливости различных образцов.

Опишем полученные экспериментальные данные моделью (5), найдя ее параметры (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

$C_1$	459,79
$C_2$	$-1,6667 \cdot T \cdot 10^{-5} - 5,8083 \cdot 10^{-4}$
$C_3$	-93,13

Также опишем зависимость остаточной деформации в момент снятия нагрузки от времени и температуры выдержки под нагрузкой.

Очевидно, что параметр  $C_1$  модели является функцией от приложенной деформации. В общем случае мы можем представить параметр  $C_1 \cdot \varepsilon$ , тогда модель будет иметь вид:

$$\sigma(t) = C_1 \cdot \varepsilon \cdot t^{C_2} \cdot \exp\left(\frac{-C_3}{T}\right). \quad (6)$$

личину накопленной деформации в момент снятия нагрузки в зависимости от времени и температуры выдержки при уровне постоянной деформации, равной 0,3%.

Для оценки релаксации напряжения и величины накопленной деформации на следующем этапе проведена серия испытаний при деформации, отличной от исследуемой ранее деформации. При деформации 0,2% получены данные о податливости релаксации (рис. 10).

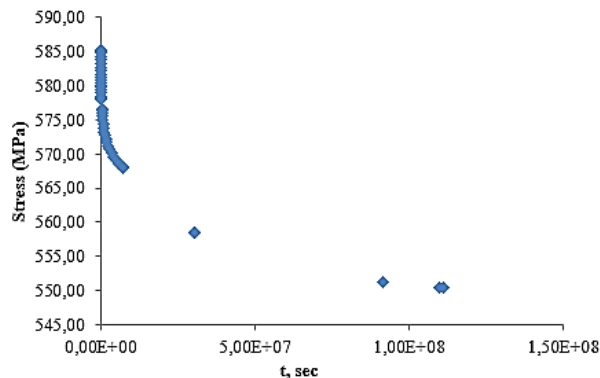


Рис. 11

Параметры модели представлены в табл. 9.

Т а б л и ц а 7

$C_1$	$2,29 \cdot 10^5$
$C_2$	$-1,6667 \cdot T \cdot 10^{-5} - 5,8083 \cdot 10^{-4}$
$C_3$	-93,13

Далее нами было проведено сравнение предсказания модели (6) с полученными экспериментальными данными при различных температурах и различной постоянной деформации. В качестве экспериментальных данных взяты мастер-кривые для следующих условий: температура 25 °С и постоянная деформация 0,3%; температура 25 °С и постоянная деформация 0,2%; температура 100 °С и постоянная деформация 0,3%. Для оценки сходимости модели с экспериментальными данными использовали коэффициент детерминации, который для исследуемых условий составил 0,95, 0,94, 0,97 соответственно.

## ВЫВОДЫ

Получены данные о вязкоупругом поведении полимерного волокнистого композиционного материала, которые были использованы для построения мастер-кривой зависимости податливости от времени. Мастер-кривая провалидирована серией длительных испытаний. В работе представлено модельное представление напряжения как функции от времени, температуры и приложенной постоянной деформации. Модель позволяет описывать релаксацию напряжений при различных температурах и величинах постоянной деформации в зависимости от времени под нагрузкой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Obvertkin I.V., Pasechnik K.A., Vlasov A.Y. The potential of using SWCNTs, MWCNTs and CNFs capable of increasing the composite material dimensional and technological stability as modifiers of a polymer matrix // PNRPU Mechanics Bulletin. 2021. №4. С. 98...110. doi: 10.15593/perm.mech/2021.4.10
2. Goertzen W.K., Kessler M.R. Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. Materials Science and Engineering: A. Volume 421, Issues 1–2, 2006, Pages 217–225. – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.063>.
3. Abhinav Omprakash Fulmali, B. Arnimesh Nayak, B.N.V.S. Ganesh Gupta K, Srinivasu Dasari, Rajesh Kumar Prusty, Bankim Chandra Ray. Effect of 1D carbon nano- tube and fiber reinforcement on the long-term creep performance of glass fiber/epoxy composite using the time-temperature superposition principle. Materials Today: Proceedings, Volume 47, Part 11, 2021, Pages 3263–3268. – <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.451>
4. Starkova O., Gagani A., Karl C., Rocha I., Burakovs J., Krauklis A. Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites–Durability Prediction Methods. Polymers. 2022. 14. 907. 10.3390/polym14050907.
5. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: учебное пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с.

6. Демидов А.В., Переборова Н.В., Макаров А.Г., Киселев С.В. Оптимизация математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2 (398). С. 285...291.

## REFERENCES

1. Obvertkin I.V., Pasechnik K.A., Vlasov A.Y. The potential of using SWCNTs, MWCNTs and CNFs capable of increasing the composite material dimensional and technological stability as modifiers of a polymer matrix // PNRPU Mechanics Bulletin. 2021. №4. С. 98...110. doi: 10.15593/perm.mech/2021.4.10
2. Goertzen W.K., Kessler M.R. Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. Materials Science and Engineering: A. Volume 421, Issues 1–2, 2006, Pages 217–225. – <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.063>.
3. Abhinav Omprakash Fulmali, B. Arnimesh Nayak, B.N.V.S. Ganesh Gupta K, Srinivasu Dasari, Rajesh Kumar Prusty, Bankim Chandra Ray. Effect of 1D carbon nano- tube and fiber reinforcement on the long-term creep performance of glass fiber/epoxy composite using the time-temperature superposition principle. Materials Today: Proceedings, Volume 47, Part 11, 2021, Pages 3263–3268, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.451>
4. Starkova O., Gagani A., Karl C., Rocha I., Burakovs J., Krauklis A. Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites–Durability Prediction Methods. Polymers. 2022. 14. 907. 10.3390/polym14050907.
5. Birger I. A., Mavlyutov R. R. Resistance of materials: A book. M.: Nauka. the main editorial office of the physical and mathematical literature., 1986. 560 p.
6. Demidov A.V., Pereborova N.V., Makarov A.G., Kiselev S.V. Optimization of mathematical modeling polymeric textile materials relaxation and recovery processes // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. № 2 (398). С. 285...291.

Рекомендована научной лабораторией «Интеллектуальные материалы и структуры» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева. Поступила 23.06.23.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГИБКИХ ПОЛИРОВАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### ANALYSIS OF THE EFFECT OF A CAPILLARY-POROUS STRUCTURE ON THE PERMEABILITY OF FLEXIBLE POLISHING MATERIALS

*О.В. КОЖЕВНИКОВА<sup>1</sup>, А.В. ДЕДОВ<sup>2</sup>, Е.С. БОКОВА<sup>1</sup>, Е.С. СТАТНИК<sup>3</sup>*

*O.V. KOZHEVNIKOVA<sup>1</sup>, A.V. DEDOV<sup>2</sup>, E.S. BOKOVA<sup>1</sup>, E.S. STATNIK<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),

<sup>2</sup>Московский политехнический университет,

<sup>3</sup>Сколковский институт науки и технологий)

(<sup>1</sup>The Kosygin State University of Russia,

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University,

<sup>3</sup>Skolkovo University of Science and Technology)

E-mail: dedovs55@rambler.ru

*Получены гибкие полировальные материалы на основе нетканых иглопробивных полотен, импрегнированных водной дисперсией полиуретана. Определено влияние капиллярно-пористых характеристик материалов на их проницаемость по воде. Предложена математическая модель для прогнозирования зависимости коэффициента проницаемости материала от степени его пропитки и коэффициента пористости. Доказано, что коэффициент проницаемости материалов зависит от изменения структуры пор и в меньшей степени от изменения их объема.*

*Flexible polishing materials based on non-woven needle-punching cloths impregnated with water dispersion of polyurethane were obtained. The influence of capillary-porous characteristics of materials on their water permeability is determined. A mathematical model for predicting the dependence of the permeability coefficient of a material on the degree of its impregnation and porosity coefficient is proposed. It has been proven that the permeability coefficient of materials depends on changes in the pore structure and, to a less extent, on changes in their volume.*

**Ключевые слова:** волокнисто-пористый полимерный композиционный материал, пористая структура, проницаемость, полиуретановые дисперсии.

**Keywords:** fibrous-porous polymer composite material, porous structure, permeability, polyurethane dispersions.

#### *Введение*

Волокнисто-пористые полимерные композиционные материалы (ВП ПКМ), полученные путем импрегнирования нетканых иглопробивных полотен из синтетических волокон водными дисперсиями полиуретанов [1-6], используются для полирования поверхности стекол, керамики, кристаллов и т.п. [7-11]. Одним из показателей свойств, нормируемых для этой группы материалов, является показатель фазовой проницаемо-

сти по отношению к жидкостям, которые используются в процессе обработки поверхностей [12, 13].

Массоперенос жидкостей в материалах зависит от их пористой структуры, которая в случае нетканых материалов может изменяться в результате процесса их дополнительной термообработки [14, 15].

В качестве волокнистых основ для создания гибких полировальных материалов преимущественно используют полотна из



полипропиленовых волокон линейной плотности 0,33 текс (диаметром 24-26 мкм), при иглопрокалывании которых получают материалы с высокой поверхностной плотностью [16, 17]. Одним из возможных способов снижения этого показателя и, как следствие, увеличения их пористости является использование полипропиленовых волокон повышенной линейной плотности.

Цель работы – анализ влияния капиллярно-пористой структуры гибких полировальных материалов на их фазовую проницаемость по воде.

#### *Объекты и методы исследования*

В качестве объектов исследования использовали полотно из полипропиленовых волокон линейной плотности 0,6 текс (диаметр 36-38 мкм) (ТУ 2272-007-5766624-93) производства ООО «МОНТЕМ», полученное механическим способом формирования холста. Плотность основного прокалывания составляла 180 см<sup>-2</sup>, поверхностная плотность полотна – 0,35 кг/м<sup>2</sup>, объемная плотность – 90 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент пористости – 0,92 (для сравнения коэффициент пористости полученного при равных режимах прокалывания полотна из волокон линейной плотности 0,33 равен 0,82-0,84).

Для пропитки использовали водную дисперсию полиуретана (ПЭУ) марки IMPRANIL DL 1380 (КНР), синтезированную на основе алифатического диизоцианата, сухой остаток – 57-61%, pH – 6-8, вязкость – 1000 мПа/с.

Размеры и массу образцов определяли по ГОСТ 15902.2-2003, максимальная относительная ошибка измерений поверхностной и объемной плотности полотен составила ±4 %. Толщину образцов полотен и материалов определяли толщиномером по ГОСТ 11358-70 с ценой деления 0,01 мм, измерения толщины проводили при давлении 10 кПа.

Водопроницаемость материалов определяли согласно ГОСТ Р 52608-2006 на образцах диаметром 5±0,5 см при постоянном напоре водопроводной воды 500 Па или высоте столба 50 мм. Скорость фильтрации воды в полотне устанавливали после 2-4 мин эксперимента, в течение которых она уменьшалась до постоянной величины. Скорость

фильтрации воды в композиционных материалах не зависела от времени испытаний.

В качестве параметра водопроницаемости нетканого полотна и композиционных материалов, полученных при варьировании степени пропитки, использовали коэффициент проницаемости [18]:

$$w = K \frac{\Delta P}{\eta d}, \quad (1)$$

где  $w$  – скорость фильтрации воды, м/с;  $K$  – коэффициент проницаемости полотна и композиционных материалов по воде, м<sup>2</sup>;  $\Delta P$  – напор воды, Па;  $d$  – толщина композиционных материалов, м;  $\eta$  – вязкость воды, Па·с, принятая при температуре воды 20±2 °С как 10<sup>-6</sup> Па·с. Относительная ошибка не более ±8 %.

#### *Экспериментальные результаты и их обсуждение*

Процесс импрегнирования нетканых полотен осуществляли методом пропитки при погружении образцов в емкость объемом 500 мл, заполненную дисперсией, с последующим отжимом материала между валами при давлении 4 кг/см<sup>2</sup>. Степень пропитки полотна варьировали разбавлением дисперсии дистиллированной водой в 2, 4, 6 и 8 раз. Сушку пропитанного полотна проводили в термошкафу при температуре 70 ±5 °С.

Степень пропитки ( $C_M$ , отн. ед.) рассчитывали из уравнения:

$$C_M = \frac{m_1 - m}{m}, \quad (2)$$

где  $m_1$  и  $m$  – масса образца после и до пропитки соответственно, кг.

Коэффициент пористости полотна определяли из уравнения (3), композиционных материалов – из уравнения (4):

$$\delta = 1 - \frac{P}{P_f}, \quad (3)$$

$$\delta = 1 - \frac{n_n n_n + m_{PY} / P_{PY}}{n}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – коэффициент пористости, отн. ед.;

$\rho$  – плотность полотна,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_f$  – плотность волокон,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $m_f$  и  $m_{PY}$  – масса полотна и полиуретана в образце композиционного материала,  $\text{кг}$ ;  $\rho_{PY}$  – плотность полиуретана,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $V$  – объем образцов полотна и композиционных материалов,  $\text{м}^3$ .

Для оценки структуры пористых материалов, как правило, используют коэффициент пористости или плотность, которые отражают соотношение между объемом пор и объемом твердой фазы [18]. Однако при равных значениях коэффициента пористости или плотности проницаемость материалов может существенно отличаться, что обусловлено зависимостью проницаемости не только от коэффициента пористости, но и от формы или извилистости порового пространства. Одним из показателей, наиболее удобных для оценки влияния пропитки и условий термообработки на пористую структуру полотен, является плотность композиционных материалов ( $\rho_c$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Авторами работ [16, 17] установлено, что изменение объема полотна при его термообработке может быть выражено отношением коэффициентов уравнений, описывающих зависимости плотности ( $\rho_c$ ) от степени пропитки ( $C_M$ ) (рис. 1).

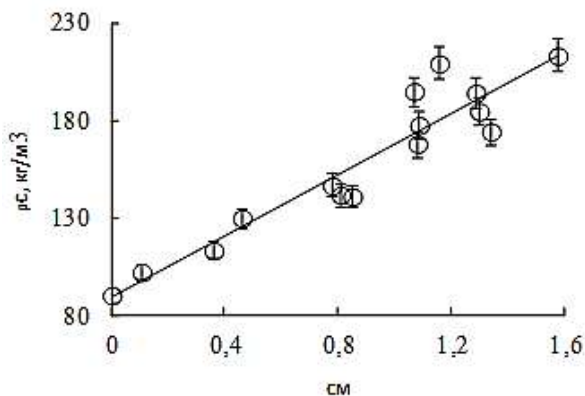


Рис. 1

При  $0 < C_M < 1,58$  зависимость  $\rho_c$  от  $C_M$  имеет линейный вид и описывается уравнением общего вида с коэффициентом корреляции 0,9:

$$\rho_c = \rho + k_p C_M, \quad (5)$$

где  $k_p$  – коэффициент размерности,  $\text{кг}/\text{м}^3$  [17].

Для анализа изменения объема полотен в процессе термообработки предложено следующее уравнение:

$$\frac{\rho_c}{\rho} - 1 = \frac{k_p}{\rho} C_M. \quad (6)$$

Безразмерное отношение коэффициентов  $k_p/\rho$  введено для оценки изменения объема полотен в процессе термообработки. В случае выполнения условия  $k_p/\rho = 1$  объем полотна является постоянной величиной, что свидетельствует о постоянном объеме полотна и зависимости плотности композиционных материалов только от содержания полиуретанового связующего, которое определяется степенью пропитки. Уменьшение объема материала соответствует условию  $k_p/\rho > 1$ , при этом увеличение плотности пропитанных материалов в большей степени зависит от содержания полимерного связующего; в случае, когда  $k_p/\rho < 1$ , плотность пропитанных материалов увеличивается незначительно при повышении содержания связующего.

Из уравнения (5), которое описывает зависимость  $\rho_c$  от  $C_M$  (рис. 1), получено, что  $k_p/\rho = 0,88$ , следовательно, в процессе термообработки объем полотна увеличивается в незначительной степени.

Зависимость коэффициента пористости  $\delta$  композиционных материалов от степени пропитки полотна представлена на рис. 2.

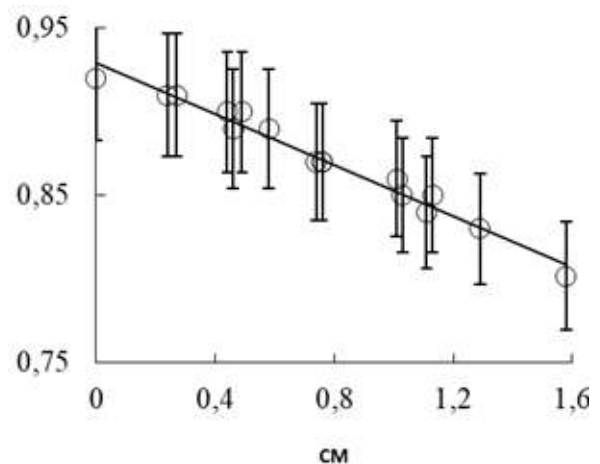


Рис. 2

Зависимость имеет линейный вид и описывается уравнением, аналогичным уравнению (5). Однако, как отмечалось выше, определение плотности композиционных материалов является более простым и точным методом по сравнению с расчетом коэффициента пористости.

Зависимость коэффициента проницаемости  $K$  от степени пропитки композиционных материалов представлена на рис. 3.

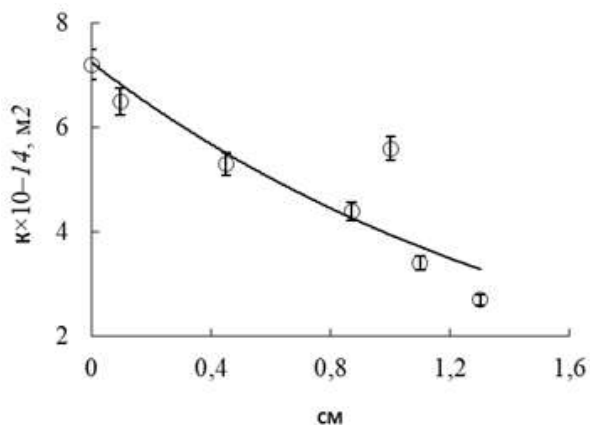


Рис. 3

Зависимость имеет экспоненциальный вид, что при постоянном объеме полотна в процессе термообработки указывает на неэквивалентное соотношение между проницаемостью по воде и изменением плотности (рис. 1) или коэффициента пористости (рис. 2) композиционных материалов.

В работе [18] предложено несколько моделей для прогнозирования проницаемости пористых материалов различной природы. Анализ предложенных моделей позволяет выявить отсутствие в них прямой связи между коэффициентом проницаемости и коэффициентом пористости, которая обеспечивается введением в уравнения поправочных коэффициентов, физический смысл которых трактуется произвольно в зависимости от выбранной модели пористости.

Наибольшее распространение получила капиллярная модель, где материалы рассматриваются как «пучок» капилляров одного или различного диаметра. Для прогнозирования скорости фильтрации жидкостей в пористых материалах используется закон Пуазейля, при применении которого пара-

метры геометрических размеров капилляров отражают коэффициент пористости [18].

Наиболее простое соотношение между коэффициентом проницаемости и коэффициентом пористости характерно для модели, согласно которой пористые материалы имеют прямые и параллельные капилляры, а их длина соответствует толщине пористого слоя, при этом жидкости по капиллярам перемещаются в одном направлении. Для этого случая уравнение расчета коэффициента проницаемости материала с известным коэффициентом пористости имеет вид [18]:

$$K = \frac{\delta d_k^2}{32}, \quad (7)$$

где  $d_k^2$  – коэффициент размерности, м<sup>2</sup>, который по сути является корректирующим коэффициентом, устанавливающим связь между коэффициентом проницаемости и коэффициентом пористости.

Известно [18], что физический смысл коэффициента  $d_k^2$  соответствует среднему условному диаметру пор, по которым происходит массоперенос жидкостей, что вытекает из анализа уравнения (7).

При  $d_k^2=1$  коэффициент проницаемости зависит только от коэффициента пористости, или от объема пор, доступного для массопереноса жидкостей. Из этого следует, что коэффициент  $d_k^2$  определяет зависимость коэффициента проницаемости по жидкости от соотношения между коэффициентом пористости (объемом пор) и структурой пор. Чем больше  $d_k^2$ , тем в меньшей степени коэффициент проницаемости зависит от коэффициента пористости, и наоборот. Кроме того, в случае, если  $\delta \rightarrow 1$ , что характерно при течении жидкости в свободном пространстве, выражение коэффициента размерности принимает вид  $d_k^2=32 \cdot K$ .

Недостатком уравнения (7) является необходимость экспериментального определения корректирующего коэффициента  $d_k^2$ . Поэтому в работе решена обратная задача, когда при известных значениях  $\delta$  и  $K$  был рассчитан  $d_k^2$  и установлена зависимость  $d_k^2$  от  $S_m$  (рис. 4).

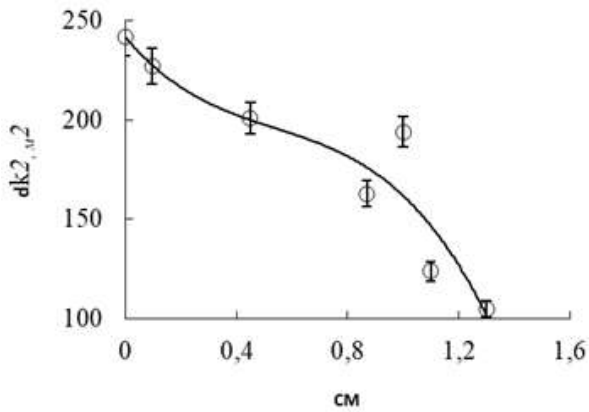


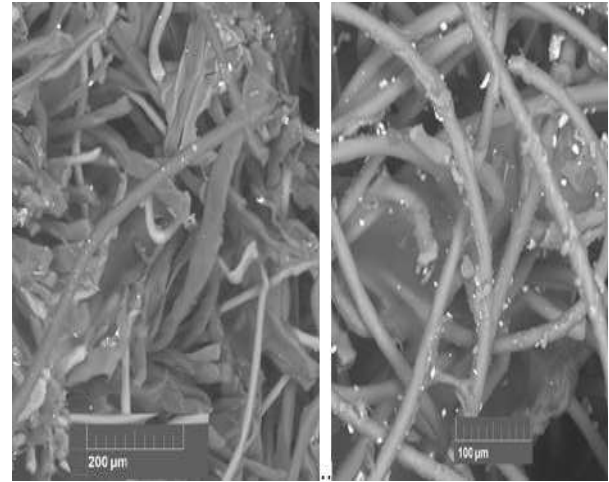
Рис. 4

Полученные данные объясняют зависимость коэффициента проницаемости нетканых материалов с равным коэффициентом пористости от расположения волокон, которые могут быть ориентированы параллельно или перпендикулярно поверхности полотна [14-17]. Чем больше волокон ориентировано перпендикулярно поверхности холста, тем меньше сопротивление движению жидкости и тем больше коэффициент проницаемости.

Незначительное уменьшение показателя  $dk^2$  при изменении степени пропитки от 0 до 0,8 свидетельствует о том, что коэффициент проницаемости композиционных материалов, как и для непропитанного нетканого полотна, зависит от изменения структуры пор и в меньшей степени от уменьшения их объема. Резкое уменьшение коэффициента  $dk^2$  при степени пропитки больше 0,8 можно объяснить преимущественным влиянием на коэффициент проницаемости снижения объема пор, при этом коэффициент проницаемости зависит от структуры пор в меньшей степени (рис. 4). Методом экстраполяции зависимости  $dk^2$  от  $S_M$  установлено, что при степени пропитки 1,55-1,60 коэффициент  $dk^2$  равен 1, и, как следует из анализа уравнения (7), коэффициент проницаемости композиционных материалов определяется только объемом пор, доступных для течения воды.

Из анализа микрофотографий поперечного среза композиционных материалов с различной степенью пропитки (рис. 5) видно, что изменение структуры пор является результатом образования агломератной

структуры полимерного связующего на поверхности волокон, вследствие чего возрастает сопротивление движению потока воды. В то же время даже при относительно большой степени пропитки между волокнами остается достаточно большое свободное пространство, что подтверждает незначительное влияние изменения объема пор на коэффициент проницаемости.



а)

б)

Рис. 5

При обработке уравнения, которое с коэффициентом корреляции 0,88 описывает зависимость  $dk^2$  от  $S_M$  (см. рис. 4), получена модель для прогнозирования коэффициента проницаемости композиционных материалов при варьировании степени пропитки и коэффициента пористости исходных нетканых полотен. Уравнение модели имеет вид:

$$K \cdot 10^{-14} = \delta \cdot (8,3 S_M^2 - 5 S_M^3 - 5,6 S_M + 7,6). \quad (8)$$

Численное решение уравнения (8) при степени пропитки от 0 до 1,6 и варьировании коэффициента пористости от 0,1 до 0,9, который может зависеть от коэффициента пористости исходного волокнистого холста и изменения его объема в процессе термообработки, в графическом виде представлено на рис. 6.

Из рисунка следует, что при степени пропитки менее 1,0 коэффициент проницаемости зависит только от степени пропитки. При степени пропитки больше 1,0 на коэффициент проницаемости оказывает

влияние как степень пропитки, так и коэффициент пористости при его величине более 0,6 (рис. 6).

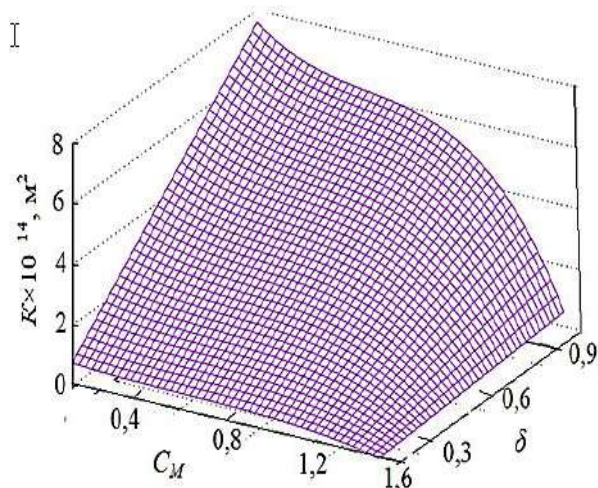


Рис. 6

## ВЫВОДЫ

В работе получены гибкие полировальные материалы на основе нетканых полотен из полипропиленовых волокон линейной плотности 0,6 текс, импрегнированные водной дисперсией полиуретана.

Показано, что в процессе термообработки нетканых композиционных материалов их объемная плотность остается практически постоянной.

Разработана модель для прогнозирования коэффициента проницаемости композиционных нетканых материалов при варьировании степени пропитки и коэффициента пористости.

Доказано, что коэффициент проницаемости материалов зависит от изменения структуры пор и в меньшей степени от изменения их объема.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Береснев В.Н., Крайник И.И., Баранец И.В., Агибалова Л.В. Влияние лейканола на агрегативную стабильность синтетических латексов // Журнал прикладной химии. 2018. Т.91. №7. С. 998...1006.
2. Береснев В.Н., Крайник И.И., Мишунин С.В., Агибалова Л.В. Свободные макрорадикалы в синтезе, хранении и переработке синтетических латексов и полимеров // Журнал прикладной химии. 2020. Т.93. №3. С. 392...405.

3. Wang L., Xu F., Li H., Liu Y., Liu Y. Preparation and stability of aqueous acrylic polyol dispersions for two-component waterborne polyurethane // J. Coatings Technol. Res. 2017. V.14. №1. P. 215...223.

4. Arshad N., Zia K.M., Hussain M.T., Zuber M., Arshad M.M. Synthesis of novel curcumin-based aqueous polyurethane dispersions for medical textile diligences with potential of antibacterial activities // Polym. Bulletin. 2022. V.79. №10. P. 7711...7727.

5. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Егорова М.А., Климова Н.С. Спектральный анализ вязкоупругой ползучести нетканого геотекстиля // Химические волокна. 2018. Т. 50. №5. С. 378...382.

6. Lee J. C., Park D.H., Choi J. R., Kim K.Y. Tensile Properties and Poisson's Ratio of Thermocompression-bonded PET Nonwoven Fabrics Prepared by Needle-punching // Fibers Polym. 2019. V.20. №9. P. 1969...1974.

7. Cheng K., Lee K., Ueng T., Mou K. Electrical and impact properties of the hybrid knitted inlaid fabric reinforced polypropylene composites // Compos Part A. Appl. Sci. Manuf. 2002. V.33. №9. P.1219...1226.

8. Abounaim M., Cherif C. Flat-knitted innovative three-dimensional spacer fabrics: a competitive solution for lightweight composite applications // Text. Res. J. 2012. V.82. №3. P. 288...298.

9. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: a review // Text. Res. J. 2012. V.82. №7. P. 725...743.

10. Rajesh M., Pitchaimani J. Dynamic mechanical and free vibration behavior of natural fiber braided fabric composite: comparison with conventional and knitted fabric composites // Polym. Compos. 2018. V.39. №7. P. 2479...2489.

11. Tejyan S., Singh T., Patnaik A., Fekete G., Gangil B. Physico-mechanical and erosive wear analysis of polyester fibre-based nonwoven fabric-reinforced polymer composites // J. Ind. Text. 2019. V.49. №4. P. 447...464.

12. Lichtner A., Roussel D., Röhrrens D., Jauffres D., Villanova J., Martin C.L., Bordia R.K. Anisotropic sintering behavior of freezecast ceramics by optical dilatometry and discrete-element simulations // Acta Mater. 2018. V.155. P. 343...349.

13. Rakshit R., Das A.K. A review on cutting of industrial ceramic materials // Precis Eng. 2019. V.59. №2. P. 90...109.

14. Назаров В.Г., Дедов А.В. Проницаемость композиционных волокнистых материалов // Материаловедение. 2021. №5. С. 31...35.

15. Назаров В.Г., Дедов А.В., Бокова Е.С. Сжимаемость композиционного материала с волокнистым наполнителем и наноразмерной полиуретановой матрицей для дорожного и гидротехнического строительства // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т.15. №1. С. 53...58.

16. Дедов А.В., Бабушкин С.В., Платонов А.В., Кондратов А.П., Назаров В.Г. Сорбционные свойства нетканых материалов // Химические волокна. 2001. Т.33. №5. С. 56...58.

17. Дедов А.В., Назаров В.Г. Обработанные игло-пробивные нетканые материалы повышенной прочности // Химические волокна. 2015. Т.47. №2. С. 121...125.

18. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей в пористых средах. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 254 с.

#### REFERENCES

1. Beresnev V.N., Krainik I.I., Baranets I.V., Agibalova L.V. The Influence of Leucanol on the Aggregative Stability of Synthetic Latexes // Russian J. Appl. Chem. 2018. V.91. №8. P. 1137...1144.

2. Beresnev V.N., Krainik I.I., Mishunin S.V., Agibalova L.V. Free Macroradicals in Synthesis, Storage, and Processing of Synthetic Latexes and Polymers // Russian J. Appl. Chem. 2020. V.93. №3. P. 406...419.

3. Wang L., Xu F., Li H., Liu Y., Liu Y. Preparation and stability of aqueous acrylic polyol dispersions for two-component waterborne polyurethane // J. Coatings Technol. Res. 2017. V.14. №1. P.215...223.

4. Arshad N., Zia K.M., Hussain M.T., Zuber M., Arshad M.M. Synthesis of novel curcumin-based aqueous polyurethane dispersions for medical textile dilligence with potential of antibacterial activities // Polym. Bulletin. 2022. V.79. №10. P.7711...7727.

5. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Egorova M.A., Klimova N.S. Spectral Analysis of Viscoelastic Creep of Nonwoven Geotextiles // Fibre Chem. 2018. V.50. №5. P. 378...382.

6. Lee J.C., Park D.H., Choi J.R., Kim K.Y. Tensile Properties and Poisson's Ratio of Thermocompression-bonded PET Nonwoven Fabrics Prepared by Needle-punching // Fibers Polym. 2019. V.20. №9. P. 1969...1974.

7. Cheng K., Lee K., Ueng T., Mou K. Electrical and impact properties of the hybrid knitted inlaid fabric reinforced polypropylene composites // Compos Part A. Appl. Sci. Manuf. 2002. V.33. №9. P. 1219...1226.

8. Abounaim M., Cherif C. Flat-knitted innovative three-dimensional spacer fabrics: a competitive solution for lightweight composite applications // Text. Res. J. 2012. V.82. №3. P. 288...298.

9. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: a review // Text. Res. J. 2012. V.82. №7. P. 725...743.

10. Rajesh M., Pitchaimani J. Dynamic mechanical and free vibration behavior of natural fiber braided fabric composite: comparison with conventional and knitted fabric composites // Polym. Compos. 2018. V.39. №7. P. 2479...2489.

11. Tejyan S., Singh T., Patnaik A., Fekete G., Gangil B. Physico-mechanical and erosive wear analysis of polyester fibre-based nonwoven fabric-reinforced polymer composites // J. Ind. Text. 2019. V.49. №4. P. 447...464.

12. Lichtner A., Roussel D., Röhrens D., Jauffres D., Villanova J., Martin C.L., Bordia R.K. Anisotropic sintering behavior of freeze-cast ceramics by optical dilatometry and discrete-element simulations // Acta Mater. 2018. V.155. P. 343...349.

13. Rakshit R., Das A.K. A review on cutting of industrial ceramic materials // Precis Eng. 2019. V.59. №2. P. 90...109.

14. Nazarov V.G., Dedov A.V. Permeability of composition fiber materials // Inorganic Materials: Applied Research. 2022. V.13. №1. P. 111...115.

15. Nazarov, V.G., Dedov, A.V., Bokova, E.S. Compressibility of the composite material with fiber fill and nanodimensional polyurethane matrix for road and hydro engineering construction // Nanotechnologies in Construction. 2023. V.15. №1. P. 53...58.

16. Dedov A.V., Babushkin S.V., Platonov A.V., Kondratov A.P., Nazarov V.G. Sorptive properties of nonwoven materials // Fibre Chem. 2001. V.33. №5. P. 56...58.

17. Dedov A.V., Nazarov V.G. Processed Nonwoven Needle-punched Materials with Increased Strength // Fibre Chem. 2015. V.47. №2. P. 121...125.

18. Sheidegger A.E. Физика течения жидкостей в пористых средах. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2008. 254 с.

Рекомендована кафедрой химии и технологии полимерных материалов и нанокompозитов РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 06.07.23.

## ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ИМПЛАНТОЛОГИИ И ПРОТЕЗИРОВАНИИ

### POLYMER COMPOSITE MATERIALS USED IN MAXILLOFACIAL IMPLANTOLOGY AND PROSTHETICS

*A.S. ВИНДИЖЕВА, А.А. ХАШИРОВ, З.Ф. ХАРАЕВА, И.В. ДОЛБИН, С.Ю. ХАШИРОВА*  
A.S. VINDIZHEVA, A.A. KHASHIROV, Z.F. KHARAEVA, I.V. DOLBIN, S.YU. KHASHIROVA

(Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова)

(Kh.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University)

E-mail: amina.vindizheva@mail.ru; khashaz@yandex.ru; irafe@yandex.ru;  
i\_dolbin@mail.ru; new\_kompozit@mail.ru

*Обобщены литературные сведения по известным полимерным материалам, модифицированным различными наполнителями. Приведены примеры их использования в имплантологии. Рассмотрены структуры модификаторов и их биологическая активность. Особое внимание уделено углеродным модификаторам и слоистым природным материалам. Обсуждены технологии получения композитов. Изучены двухкомпонентные и многокомпонентные композиционные материалы. Рассмотрено влияние модификаторов на механические свойства композитов, способы укладки волокон и способы обработки композитов. Рассмотрены способы улучшения адгезии между наполнителем и полимерной матрицей. Представлено влияние некоторых композитов на клетки живого организма.*

*Literature information on known polymer materials modified with various fillers is summarized. Examples of their use in implantology are given. The structures of modifiers and their biological activity are considered. Particular attention is paid to carbon modifiers and layered natural materials. Technologies for producing composites are discussed. Two-component and multi-component composite materials have been studied. The influence of modifiers on the mechanical properties of composites, methods of laying fibers and methods of processing composites is considered. Methods for improving adhesion between the filler and the polymer matrix are considered. The effect of some composites on the cells of a living organism is presented.*

**Ключевые слова:** имплантат, углеволокно, нановолокно, гидроксиапатит, полиэфирэфиркетон, полиметилметакрилат, полифениленсульфон, биологическая активность, механические свойства.

**Keywords:** implant, carbon fiber, nanofiber, hydroxyapatite, polyetheretherketone; polymethyl methacrylate, polyphenylene sulfone, biological activity, mechanical properties.

#### *Введение*

Традиционные имплантаты обычно состоят из титановых или кобальт-хромовых сплавов, которые обладают превосходной

механической прочностью и пластичностью. Однако хорошо известно, что имплантаты на основе металлов имеют некоторые явные недостатки, а именно: эффект

защиты от напряжений и коррозионную устойчивость. Первое приводит к резорбции кости и отказу имплантата из-за несоответствия модуля упругости металлических имплантатов и кости; последний вызывает воспаление из-за высвобождения ионов металлов, вызванного коррозией металла под действием жидкостей организма [1]. Имплантаты на основе полимерных материалов имеют много преимуществ – отличная биохимическая стабильность, механическая прочность, биосовместимость и способность пропускать радиацию, что не мало важно при проведении медицинских исследований. Модификация полимерных материалов приводит к расширению области использования имплантатов и наделяет их множеством дополнительных свойств без ущерба основным механическим [2]. Матрица композиционных материалов очень важна, но армирующие материалы, известные как наполнители, играют важную роль для конечных свойств биомедицинских композитов. В последние годы многие исследовательские группы доказали, что модификация полимерной матрицы наполнителем приведет к созданию биомедицинских композитов, которые повысят биологическую активность и механические свойства. В настоящей работе проведен литературный обзор по основным наполнителям, используемым для модификации полимеров, и представлены полимерные матрицы для наполнения.

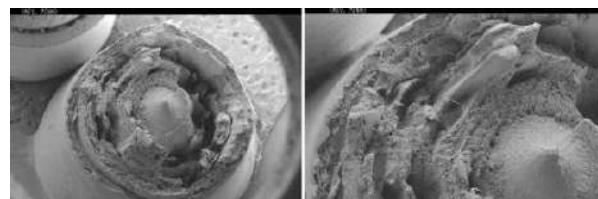
Бурно развиваются и совершенствуются технологии получения композитов на основе терморезактивных смол различной вязкости и химической активности [1]. В ряде обзоров рассматриваются технологии производства изделий из композиционных материалов на основе термопластичной матрицы [2], лазерные технологии [3], активно внедряются технологии аддитивного производства композитов [4].

#### *Результаты и обсуждение*

Одним из полимеров, активно используемым для изготовления имплантатов, является полиэтилен высокой плотности (ПЭВП). В работе [3] в качестве модификатора ПЭВП использовался гидроксиапатит (ГА). В ре-

зультате клинических исследований композит проявил себя как материал с хорошими показателями биосовместимости и механических свойств. Размер частиц наполнителя и его распределение в полимерной матрице повлиял на механические свойства материала. Меньший размер частиц приводит к получению более жестких композитов [4]. Частицы ГА повышают жесткость материала и улучшают свойства ползучести. Чем выше содержание ГА, тем больше границ раздела фаз между полимером и наполнителем, что при механической нагрузке приводит к разрушению имплантата на границе раздела. Попытки улучшить механические характеристики композитов ПЭВП/ГА с помощью силановых агентов и прививки акриловой кислотой предприняты в работах [5] и [6]. Использование силановых агентов предполагает увеличение адгезии ГА к полимерной матрице. Эффективность силановой обработки зависит от таких факторов, как площадь поверхности частиц, распределение частиц по размерам и химической активности ГА [7]. Альтернативный подход к улучшению механических характеристик композитов ПЭВП/ГА предложен в работах [8] и [9] с использованием литья под давлением с контролируемой сдвиговой ориентацией (SCORIM) [10]. Действие SCORIM основано на приложении макроскопического поля сдвиговых напряжений на границе раздела расплав/твердое тело полимера во время цикла формования. Этот метод формования оказался успешным подходом для придания анизотропного характера полиэтилену высокой плотности и соответствующим композитам, армированным ГА.

Рентгенограммы и калориметрические исследования ПЭВП, обработанного SCORIM, выявили признаки ориентации оси параллельно направлению потока и высокий уровень кристалличности (рис. 1).



а)

б)

Рис. 1



Неразлагаемые полимеры, такие, как полиэтилен и полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), находят применение в ортопедии, где необходима долговременная стабильность [11]. Соединения ПЭЭК представляют собой высокоэффективные инженерные полимеры и обеспечивают хорошую биосовместимость и переносимость тканями *in vivo*. В исследовании [12] изучаются преимущества включения частиц гидроксиапатита в полиэфирэфиркетон для возможного использования в качестве материалов-аналогов кости. Сфероидизированный пламенем гидроксиапатит (ГА) был включен в полукристаллический полимер полиэфирэфиркетон посредством серии процессов, включающих компаундирование в расплаве, гранулирование и литье под давлением (рис. 2).

Важным требованием при переработке дисперсно-наполненных полимерных ком-

позитов является однородность смеси.

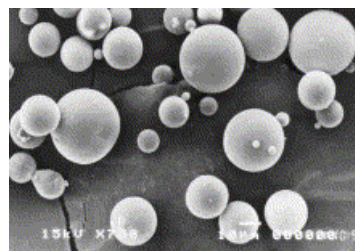


Рис. 2

Композит с хорошей дисперсией и распределением частиц в конечном итоге приведет к получению однородной морфологии композита, имеющей изотропные свойства [13]. СЭМ-изображения образцов, полученных из расплава (рис. 3), показывают, что частицы ГА были хорошо распределены и диспергированы в полимерной матрице.

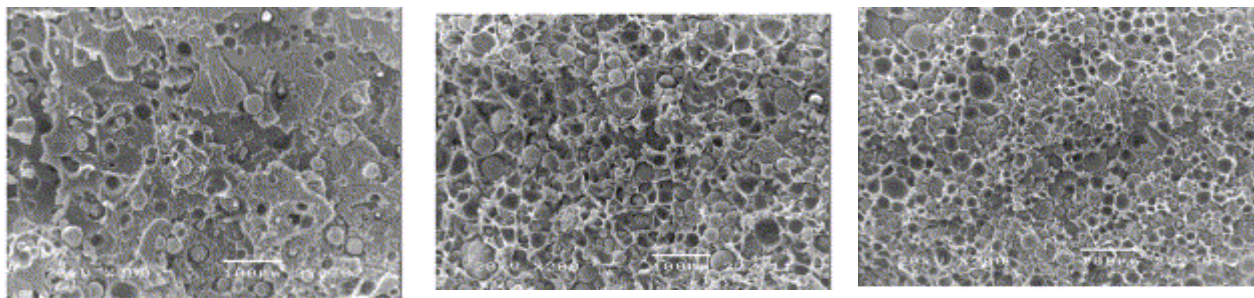


Рис. 3

Одними из наиболее часто используемых наполнителей-модификаторов являются углеродные волокна (УВ). Благодаря сочетанию прочности, легкости и рентгенопрозрачности материалы на основе УВ постепенно заменяют традиционные медицинские имплантаты на металлической основе [14].

Полимерные материалы, модифицированные УВ, нашли применение от ортопедических и зубных имплантатов до краниопластики, челюстно-лицевой пластики и каркасов для тканевой инженерии. Полимеры, модифицированные УВ, представляют собой рентгенопрозрачные материалы и благодаря этому предпочтительны в клинических исследованиях рентгеноскопии, рентгенографии или компьютерной томографии (КТ) [15].

В работе [16] описаны биосовместимые материалы для имплантатов. В качестве

имплантатов использовался композитный стержень диаметром 1,5 мм, изготовленный из армированной бисфенол-эпоксидной смолы и углеродных волокон. На рис. 4 представлена визуализация проведенного авторами исследования. Как утверждают авторы работы, полимерный материал проявил надежность в стимулировании роста тканей. Это достигается путем удаления избыточных электронов, образующихся при респираторном стрессе. Кислород является основным акцептором электронов и необходим для эффективного синтеза энергии, в противном случае образуются свободные радикалы и кислоты, которые могут нанести вред клеткам [17]. УВ способствует приобретению композиционным материалом биосовместимых свойств при удалении избыточных электронов посредством электрохимических градиентов в области с более

низкими отрицательными зарядами и более низкими концентрациями [18]. Кроме того, углеродное волокно обладает способностью остеоинтегрироваться с живой костью.

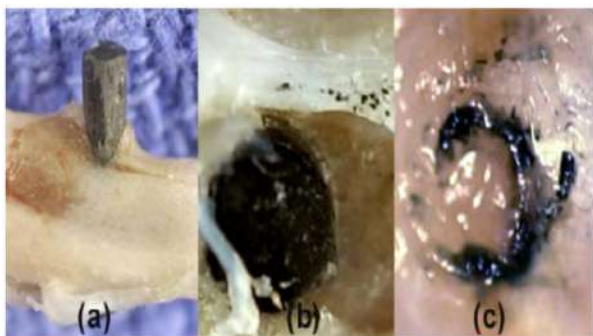


Рис. 4

Работа [19] посвящена механическим характеристикам промышленного полиметилметакрилата, армированного УВ. Проведенное исследование показало, что углеродное волокно увеличило прочность на разрыв и модуль упругости на 30% и 35,8 % соответственно [20]. Однако прочность и модуль упругости при сжатии увеличились всего на 10,7%. Сходным образом прочность на изгиб и сдвиг увеличилась на 29,5% и 18,5% соответственно. Однако прочность на диаметральное сжатие, которая является косвенным показателем прочности на растяжение, показала улучшение только на 6,2% [21]. Максимальное повышение температуры во время полимеризации также было значительно снижено за счет армирования волокнами. Полиэтилен высокой плотности, армированный углеродным волокном (ПЭВПУВ), предполагается к использованию в медицине для полной замены тазобедренного сустава [22]. Проведенное авторами исследование выявило улучшение механических свойств композита ПЭВПУВ по сравнению с полиэтиленом высокой плотности.

Одним из перспективных материалов, используемых в области медицины, является полисульфон, модифицированный армированными углеродными и полиарамидными волокнами [23]. Полисульфон сочетает в себе высокую прочность, биологическую инертность, долговечность при стерилизации и химическую устойчивость. Исследо-

вание реакции костной ткани на биоактивный композитный имплантат из смеси УВ/ПСУ представлено в работе [24]. Проведенные клинические исследования подтвердили, что волокна резорбировались в разной степени и были заменены кальцинированной тканью, в результате чего прочность межфазных связей была значительно выше, чем у всех контрольных полимеров после 6-недельной имплантации.

В качестве фиксирующих имплантатов в различных ортопедических и травматологических операциях широко используются материалы на основе полиметилметакрилата (ПММА) и его композиты [25]. В качестве модификаторов ПММА используют углеродные наполнители – углеродные нанотрубки (УНТ), графен, нанопластины, фуллерены или нанодомазы (рис. 5) [26, 27].

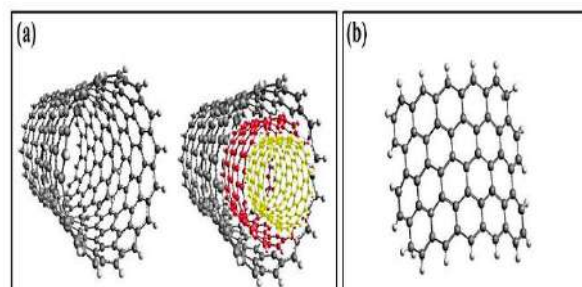


Рис. 5

Впервые разработки в области использования УНТ в качестве модификаторов ПММА были отражены в патенте на изобретение [29]. Использование модификатора поспособствовало улучшению механических характеристик конечного продукта. В [30] представлены разработки, касающиеся модификации ПММА графеном. В присутствии графена в полимерах может происходить передача напряжений от полимерной матрицы к наполнителю, а модуль упругости, прочность и ударная вязкость могут увеличиваться за счет химической связи с полимером [31, 32]. Как утверждают авторы работы [33], высокая функциональность наполнителя дала более прочную межфазную адгезию между ПММА и графеном. В работе [34] рассмотрен биологический потенциал взаимодействия УНТ и графена с биологическими системами (рис. 6).

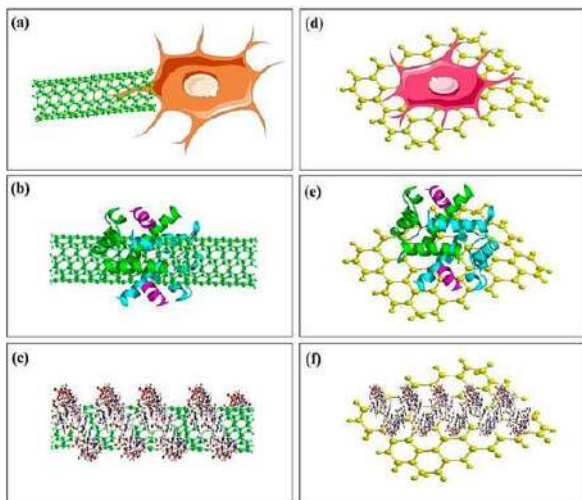


Рис. 6

Кроме того, проведены исследования клеточной реакции ПММА, модифицированного УНТ и графеном (табл. 1).

ПЭЭК и ПММА являются самыми распространенными материалами, используемыми в имплантации. В работе [40] описаны тройные композиты ПЭЭК/ПММА/УВ, изготовленные путем электропрядения ПЭЭК с последующим горячим прессованием смеси волокон и УВ, как показано на рис. 7. Волокна электропрядения ПЭЭК с высокой удельной поверхностью и пористостью способствовали образованию механического сцепления с УВ, а термопластичные волокна ПММА могли заполнить пробел, возникший в результате разделения фаз ПЭЭК и УВ при горячем прессовании.

Т а б л и ц а 1

Образец	Клеточный анализ	Тип ячейки	Ссылка
ПММА/УНТ	Остеобластические клетки MG-63 успешно прикреплялись и пролиферировали на поверхностях всех образцов.	Остеобластоподобные клетки MG-63	[35]
	Активность клеток-остеоцитов приводит к образованию ЕСМ.	Клеточная линия остеосаркомы человека MG-63	[36]
	Способствует адгезии клеток, индуцирует остеогенную дифференцировку, способствует остеointеграции.	Мезенхимальные стволовые клетки костномозгового происхождения (pСКМСК)	[37]
ПММА/графен	Стимулирует высокую жизнеспособность клеток, низкий уровень апоптоза и обширное распространение на поверхности дисков.	Фибробласты L929 и остеобласты Saos-2 человека	[38]
	Не вызывает цитотоксического ответа, тем самым демонстрируя адекватный уровень биосовместимости.	Линия клеток-предшественников остеобластов (МС3-Т3)	[39]

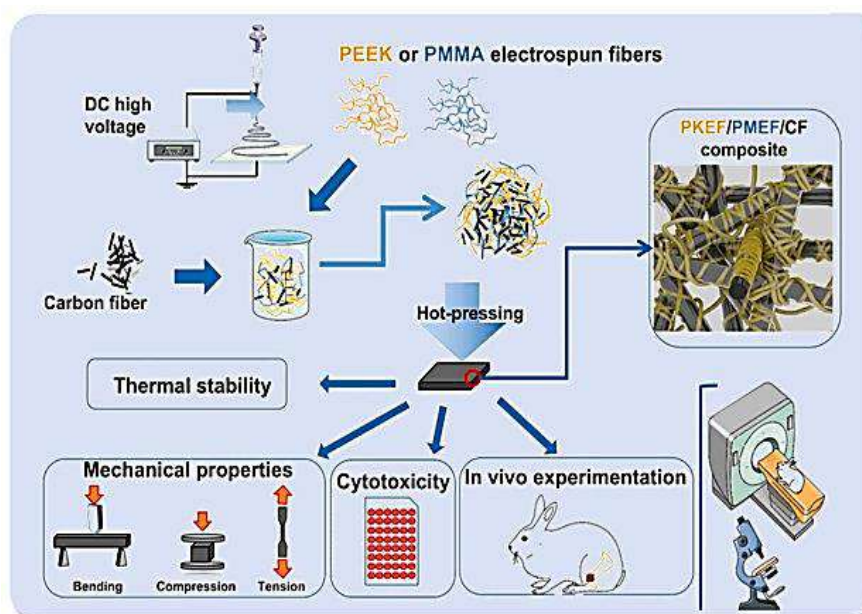


Рис. 7

## ВЫВОДЫ

В работе приведены данные о полимерах, активно используемых для изготовления имплантатов, проведен анализ наполнителей для их модификации. Рассмотрены морфологические структуры наполнителей. Установлено, что размер наполнителя и его распределение в полимерной матрице влияют на свойства конечного изделия. Описано влияние некоторых композитов на клетки живого организма.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Zaheer M.U., Mehboob H., Mehboob A., Chang S.-H.* Evaluation of the effect of bone plate modulus on early bone healing of tibial fracture // *Compos. B Eng.* 2022, 233. Article 109668.
2. *Yin W., Chen M., Ju B., Xu Y., Wang M., Geng D.* Recent Advances in Polyetheretherketone Orthopedic Biomaterials: Material Fabrication and Biofunction Establishment // *Smart. Mater. Med.* 2022, 3. P. 20...36.
3. *Bonfield W.* Polyethylene reinforced with hydroxyapatite as an analogue of material for bone tissue replacement // In: *Bioceramics: Material Characterization and In Vivo.* Annals of the New York Academy of Sciences. 1988, 253. P. 173...177.
4. *Chu K., Oshida, Y., Hancock E., Kovalik M., Barco T., Zunt S.* Hydroxyapatite/PMMA composites as bone cement // *Bio-Med. Mater. English.* 2004, 14. P. 87...105.
5. *Deb S., Wang M., Tanner K.E., Bonfield W.* Hydroxyapatite-polyethylene composites: effect of grafting and surface treatment of hydroxyapatite // *J. Mater. Sci. Mater. in Medicine.* 1996, 7. P. 191...197.
6. *Wang M., Deb S., Tanner K.E., Bonfield W.* Hydroxyapatite-polyethylene composites for bone tissue replacement: effects of silanation and polymer plasticity // *ECCM-7.* 1996. P. 455...460.
7. *Sousa R.A., Reis R.L., Cunha A.M., Bevis M.J.* Structure Development and Interfacial Interactions in HDPE/HA Composites Molded with Preferred Orientation // *J. Appl. Polym. Sci.* 2002, 86. P. 2866...2872.
8. *Souza R.A., Reis R.L., Cunha A.M., Bevis M.J.* Structure Development and Interfacial Interactions in HDPE/HA Composites Molded with Preferred Orientation // *J. Appl. Polym. Sci.* 2002, 86. P. 2866...2872.
9. *Reis R.L., Cunha A.M., Oliveira M.J., Campos A.R., Bevis M.J.* Relationship between processing and mechanical properties of injection molded HMWPE-hydroxyapatite composites // *Mat. Res. Innovat.* 2001, 4. P. 263...272.
10. <https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=GR/K08963/01>.
11. *Jasty M., Davies J.P., O'Connor D.O., Burke D.W., Harrigan T.P., Harris W.H.* Porosity of

various preparations of acrylic bone cements // *Clin. Orthop.* 1990, 259. P. 9...27.

12. *Albert K., Schledjewski R., Harbaugh M., Blesser S., Jamison R., Friedrich K.* Characterization of wear in composite material orthopaedic implants. Part II: The implant/bone interface // *Biomed. Mater. Eng.* 1994, 4 (3). P. 199...211.

13. *Jia W., Cui D., Liu Y., Ji S., Sun M., Cheng Z.* Electrospun and hot-pressed polyether-ether-ketone/poly(methyl methacrylate)/carbon fiber ternary composites for bone implant applications // *Mater. Des.* 2021, 209. Article 109893.

14. *Chua C.Y.X., Liu H.C., Di T.N., Susnjar A., Ho J., Scorrano G., Rhudy J., Sizovs A., Lolli G., Hernandez N., Nucci M.C., Cicalo R., Ferrari M., Grattoni A.* Carbon fiber reinforced polymers for implantable medical devices // *Biomaterials.* 2021, 271. Article 120719.

15. *Li C.S., Vannabouathong C., Sprague S., Bhandari M.* The use of carbon-fiber-reinforced (CFR) PEEK material in orthopedic implants: a systematic review, clinical medicine insights // *Arthritis and Musculoskeletal Disorders.* 2015, 8. P. 15...28.

16. *Petersen R.* Carbon fiber biocompatibility for implants // *Fibers.* 2016, 4 (1). P. 1234...1261.

17. *Chung D.D.L.* A review of electrical applications of carbon materials // *J. Mater. Sci.* 2004, 39. P. 2645...2661.

18. *Chawla K.K.* Carbon fibers // In *Composite Materials.* Springer: New York, NY, USA, 1998. P. 23...34.

19. *Sakha S., Pal S.* Mechanical performance of commercial carbon fiber reinforced polymethyl methacrylate // *J. Biomed. Mater. Res.* 1986, 20. P. 817...826.

20. *Jia W., Cui D., Liu Y., Ji S., Sun M., Cheng Z.* Electrospun and hot-pressed polyether-ether-ketone/poly(methyl methacrylate)/carbon fiber ternary composites for bone implant applications // *Mater. Des.* 2021, 209. Article 109893.

21. *Musa V.F., Kobayashi M., Shinzato S., Kamimura M., Neo M., Yoshihara S., Nakamura T.* Biological and mechanical properties of bioactive bone cements based on PMMA // *Biomaterials.* 2000, 21. P. 2137...2146.

22. *Rushton N., Ray T.* Intra-articular response to carbon fiber-reinforced high-density polyethylene and its components: an experimental study in mice // *Biomaterials.* 1984, 5. P. 352...356.

23. *Dickinson B.L.* Polysulfone UDEL for medical use // *J. Biomater. Appl.* 1989, 3 (4). P. 605...634.

24. *Marlongo M., Duchesne P., Garino G., Schepers E.* Bioactive fiberglass/polymer composites bond to bone tissue // *J. Biomed. Mater. Res.* 1998, 39. P. 161...170.

25. *Soleimani Eil Bakhtiari S., Bakhsheshi-Rad H.R., Karbasi S., Tavakoli M., Razzaghi M., Ismail A.F., Rama Krishna S., Berto F.* Polymethyl methacrylate bone cements containing carbon nanotubes and graphene oxide: a review of physical, mechanical and biological properties // *Polymers.* 2020, 12. P. 1469...1484.

26. *Jimenez E.P.* Bone Cements Reinforced with Carbon Based Nanomaterials. Universidad Pontificia Comillas: Comillas, Spain, 2017.

27. Cha C., Shin S.R., Annabi N., Dokmeci M.R., Khademhosseini A. Carbon-based nanomaterials: Multifunctional materials for biomedical engineering // *ACS Nano*. 2013, 7. P. 2891...2897.
28. Demoustier S., Minoux E., le Baillif M., Charles M., Ziaei A. Review of two microwave applications of carbon nanotubes: Nano-antennas and nano-switches // *Comptes. Rendus. Phys.* 2008, 9. P. 53...66.
29. Pienkowski D.A., Andrews R.J. Polymethylmethacrylate Augmented with Carbon Nanotubes. Patents US 6872403B2, 29 March 2003.
30. Paz E., Forriol F., del Real J., Dunne N. Graphene oxide versus graphene for optimisation of PMMA bone cement for orthopaedic applications // *Mater. Sci. Eng. C*. 2017, 77. P. 1003...1011.
31. Yang Z., Cao B., Zhu J., Shen J., Li J., Guo S., Wang Y. Rheological, thermal, and mechanical properties of phosphorus-containing wholly aromatic thermotropic liquid crystalline polymer-filled poly (butylene terephthalate) composites // *Polym. Compos.* 2012, 33. P. 1432...1436.
32. Depan D., Girase B., Shah J., Misra R. Structure–process–property relationship of the polar graphene oxide-mediated cellular response and stimulated growth of osteoblasts on hybrid chitosan network structure nanocomposite scaffolds // *Acta Biomater.* 2011, 7. P. 3432...3445.
33. Aiza Jaafar C.N., Zainol I. Sources of aqueous hydroxyapatite (HAp) as fillers in polymer composites for biomedical applications. Composites from aqueous media // *Mater. Sci. Eng. C*. 2023, 77. P. 83...98.
34. Munir K.S., Wen C., Li Y. Carbon nanotubes and graphene as nanoreinforcements in metallic biomaterials: A review // *Adv. Biosyst.* 2019, 3. Article 1800212.
35. Ormsby R., McNally T., O'Hare P., Burke G., Mitchell C., Dunne N. Fatigue and biocompatibility properties of a poly (methyl methacrylate) bone cement with multi-walled carbon nanotubes // *Acta Biomater.* 2012, 8. P. 1201...1212.
36. Soleymani Eil Bakhtiari S., Karbasi S., Tabrizi S.A.H., Ebrahimi-Kahrizsangi R., Salehi H. Evaluation of the effects of chitosan/multiwalled carbon nanotubes composite on physical, mechanical and biological properties of polymethyl methacrylate-based bone cements // *Mater. Technol.* 1989, 3(4). P. 605...634.
37. Wang C., Yu B., Fan Y., Ormsby R.W., McCarthy H.O., Dunne N., Li X. Incorporation of multi-walled carbon nanotubes to PMMA bone cement improves cytocompatibility and osseointegration // *Mater. Sci. Eng. C*. 2019, 103, Article 109823.
38. Gonçalves G., Portolés M.T., Ramírez-Santillán C., Vallet-Regí M., Serro A.P., Grácio J., Marques P.A. Evaluation of the in vitro biocompatibility of PMMA/high-load HA/carbon nanostructures bone cement formulations // *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 2013, 24. P. 2787...2796.
39. Paz E., Ballesteros Y., Abenojar J., del Real J., Dunne N. Graphene Oxide and Graphene Reinforced PMMA Bone Cements: Evaluation of Thermal Properties and Biocompatibility // *Materials*. 2019, 12. P. 3146...3168.
40. Cha K., Shin S.R., Annabi N., Dokmeci M.R., Khademhosseini A. Carbon nanomaterials: multifunctional materials for biomedical engineering // *ASUNano*. 2013. 7. P. 2891...2897.

Рекомендована оргкомитетом XIX Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения». Поступила 10.10.23.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРОЧНОЙ ПРОШИВКИ  
НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА  
С ГИБРИДНЫМ ТЕКСТИЛЬНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF SELECTIVE STITCHING  
ON STRENGTH PROPERTIES OF COMPOSITE WITH HYBRID TEXTILE FILLER**

*Г.П. ЗАРЕЦКАЯ<sup>1</sup>, Е.М. БАЗАЕВ<sup>1</sup>, Т.В. РУДНЕВА<sup>1</sup>, С.Д. ТОШМАТОВА<sup>1</sup>, А.П. БЕЛОГЛАЗОВ<sup>2</sup>*  
*G.P. ZARETSKAYA<sup>1</sup>, E.M. BAZAEV<sup>1</sup>, T.V. RUDNEVA<sup>1</sup>, S.D. TOSHMATOVA<sup>1</sup>, A.P. BELOGLAZOV<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)  
<sup>2</sup>ООО «Ниагара»

<sup>1</sup>Kosygin Russian State University (Technologies. Design. Art)  
<sup>2</sup>ООО “Niagara”

E-mail: zaretskaya-gp@rguk.ru; bazaevem@mail.ru; rudneva.tv@yandex.ru;  
suraya198415@gmail.com; apb53@inbox.ru

*Прошивка часто применяется для скрепления слоев и деталей преформ с целью фиксации элементов конструкции между собой перед этапом инфузионного формования. Несмотря на то, что при образовании стежка происходит деформация и повреждение волокон иглой, существует возможность увеличить за счет прошивки прочностные показатели при сдвиге, расслоении и растяжении, которые будут превышать потери прочности при проколе. При этом результаты многочисленных исследований в данной области не позволяют сделать однозначные выводы о влиянии прошивки на прочностные свойства композиционных изделий. Целью настоящей работы явилось изучение влияния выборочной прошивки слоистого ленточного композита на прочность при растяжении. В статье представлены результаты испытаний образцов из гибридной ленты, прошитых цепной строчкой. Полученные данные показали, что введение армирующей строчки увеличивает прочность при растяжении на 36,5-49,9%, а также предотвращает расслаивание композита при технологической обработке и приложении нагрузки.*

*Stitching is often used for bonding of preform layers and parts to secure the structural elements to each other before infusion moulding. In spite of the fibre deformation and damage by a needle during stitching, incensement of shear, delamination and tensile strength may exceed the strength losses due to the stitching when the preform is punctured and damaged by a needle. At the same time, the results of numerous studies in this area do not allow to draw unambiguous conclusions about the influence of piercing on the strength properties of composite products. The aim of the present work was to study the influence of selective piercing of a layered tape composite on tensile strength. The paper presents tensile testing results of hybrid tape samples with chain stitching. The obtained data showed that the reinforcing stitching increases the tensile strength by 36,5-49,9% and prevents delamination of the layered composite during technological processing and load application.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, гибридный текстильный наполнитель, выборочная прошивка, прочность при растяжении, расслоение.

**Keywords:** composite materials, hybrid textile filler, selective stitching, tensile strength, delamination.

Исследования прочностных свойств в плоскости неоднократно проводились для различных композитных материалов, армированных углеродными, стеклянными и кевларовыми волокнами, однако мнения о влиянии прошивки на сопротивление разрушению под воздействием разрывной нагрузки расходятся. В ряде работ [1-3] сообщается, что прошивка не оказывает существенного влияния на прочность при растяжении углеволокнистого композита. В некоторых исследованиях отмечается незначительное улучшение свойств при растяжении прошитых преформ [4]. В то же время в других исследованиях сообщается о разных величинах снижения прочностных свойств. Снижение разрывной прочности при прошивке связано с деформацией и разрушением волокон, а также образованием смоляных карманов в местах переплетений верхних и нижних нитей. Кроме того, смещение волокон приводит к значительной концентрации напряжений, поэтому разрушение прошитых образцов, как правило, начинается в области узлов прошивки [2, 5].

Технологические параметры прошивки оказывают влияние на механические характеристики преформы как в плоскости, так и вне плоскости. К наиболее важным технологическим характеристикам относят состав нити, линейную плотность нити, плотность стежка, распределение стежков, тип стежка [6].

Наиболее распространенными типами стежков, используемых для прошивки изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), являются (рис. 1): модифицированный челночный стежок (а), обычный челночный стежок (б) и цепной стежок (в). Обычный и модифицированный челночные стежки создают концентрацию напряжений из-за изгиба волокон и образования смоляных карманов и снижают свойства преформы в плоскости [6, 7]. Кроме того, при-

меняются другие типы стежков, например, тафтинговый, двойной челночный, выполняемый двумя иглами одновременно, по-тайной, не требующий доступа к обеим сторонам прошиваемого материала [2, 5, 8].

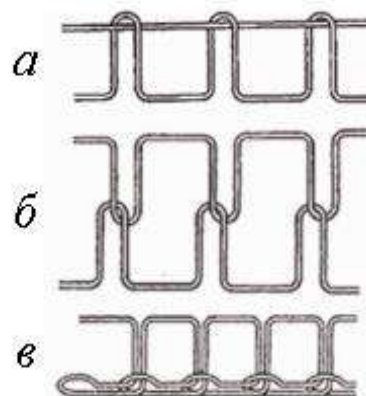


Рис. 1

Прошитые композиты, подвергшиеся ударам, не показали существенной разницы в отношении пиковой силы и поглощенной энергии по сравнению с непрошитыми [9, 11, 12].

Увеличение плотности стежков уменьшает площадь расслоения с 93% до 53% по сравнению с непрошитым аналогом [10]. Уменьшения площади расслоения можно достичь путем увеличения линейной плотности нити или других параметров стежка, таких, как жесткость нити и предварительное натяжение нити. Внеплоскостные свойства полимерного композита могут быть улучшены примерно на 30% без влияния на свойства в плоскости за счет использования для прошивки нескрученных нитей из углеродного волокна с малым количеством филаментов [9, 13].

Различные сочетания перечисленных параметров могут дать разные значения прочностных свойств прошитых преформ в плоскости. Как правило, прошивка приводит к снижению модуля Юнга и прочности

при растяжении до 10% [1, 2]. Ухудшение свойств в плоскости может быть не критичным для деталей, которые в основном подвергаются межслойным напряжениям. Однако для прошитых элементов конструкции с высокими напряжениями в плоскости необходимо учитывать, что прошивка приведет к снижению объемной жесткости и прочности на растяжение. Поэтому при проектировании эффективных 3D-армированных конструкций из ПКМ уделяется пристальное внимание параметрам прошивки [9, 13, 14].

Одним из способов введения прошивки в процесс изготовления конструкционных деталей является разработанная компаниями Boeing, NASA и BBC США технология сборки унифицированных стержневых конструкций на основе прошитого наполнителя, изготовленных методом пултрузионного формования (Pultruded Rod Stitched Efficient Unitized Structure или сокращенно PRSEUS). Выборочная прошивка используется в качестве средства соединения основных конструктивных элементов (обшивки, стрингера и рамы) и заменяет механические соединения посредством заклепок и застёжек [15, 16]. Расслоение является основной формой разрушения в соединениях «внахлест», применяемых в данной технологии сборки, а прошивка показала, что прочность такого соединения увеличивается примерно на 60-175%. Благодаря прошивке элементов конструкции в тех местах, где расслоение является наиболее критичным, снижение прочностных свойств в плоскости сводится к минимуму [16-18].

В последнее время в области производства конструкций из ПКМ наблюдается тенденция замены традиционных тканых армирующих элементов, требующих ручной укладки, ленточными слоистыми материалами. Благодаря псевдоплетеной структуре таких материалов повышается устойчивость к ударным воздействиям и в то же время сохраняется прочность и жесткость традиционных слоистых композитов с разнонаправленной ориентацией слоев. Данные о свойствах ленточных композиционных материалов малочисленны из-за трудностей проведения эксперимента [19].

При армировании многослойных объектов сложной пространственной формы с изменяющейся кривизной поверхности, имеющих соединенные между собой детали, возникает проблема обеспечения равномерной прочности и устойчивой надежности изделия. Решением проблемы может быть усиление участков изделия, наиболее подверженных разрушению, несколькими слоями лент с выборочной прошивкой. Целью настоящей работы явилось изучение влияния выборочной прошивки слоистого ленточного композита на прочность при растяжении.

#### *Материалы и методы*

При проведении данного исследования оценка возможности локального улучшения свойств ленточного композиционного материала проводилась на основе испытаний на прочность при растяжении. Образцы для испытаний изготавливались из гибридной ленты ЛТ-16-6-6-58 Ар-250 шириной 13 мм. Лента вырабатывалась из угольных и арамидных волокон на лентоткацком станке Mageba MN2-70 (Германия) в производственных условиях ООО «Ниагара» (рис. 2).



а)

б)

Рис. 2

Каждый образец состоял из четырех слоев лент толщиной 0,26 мм. Между слоями лент прокладывался термоклеевой материал для предотвращения смещения относительно друг друга в процессе прошивки и последующего формования. Структура образцов представлена на рис. 3.



Всего изготовлено три типа образцов, по пять каждого типа. С прошивкой на машине цепного стежка Inderle 880 изготавливались два типа образцов: с длиной строчки

5 см (К-Н) и 10 см (Д-Н) (рис. 4). При прошивке использовалась арамидная нить Gutermann К 403 (Германия). Для сравнения изготовлены образцы без прошивки (0-Н).

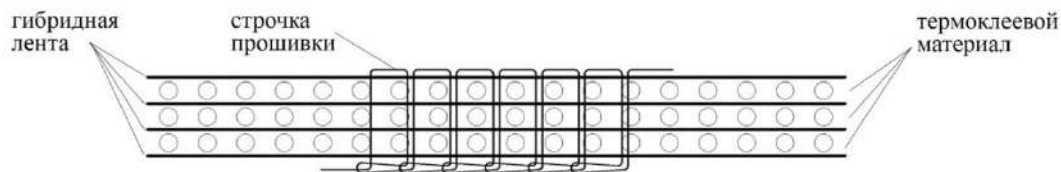


Рис. 3

После прошивки образцы пропитывались методом вакуумного формования (ин-

фузии) эпоксидным связующим и отвердителем Elantas-M.

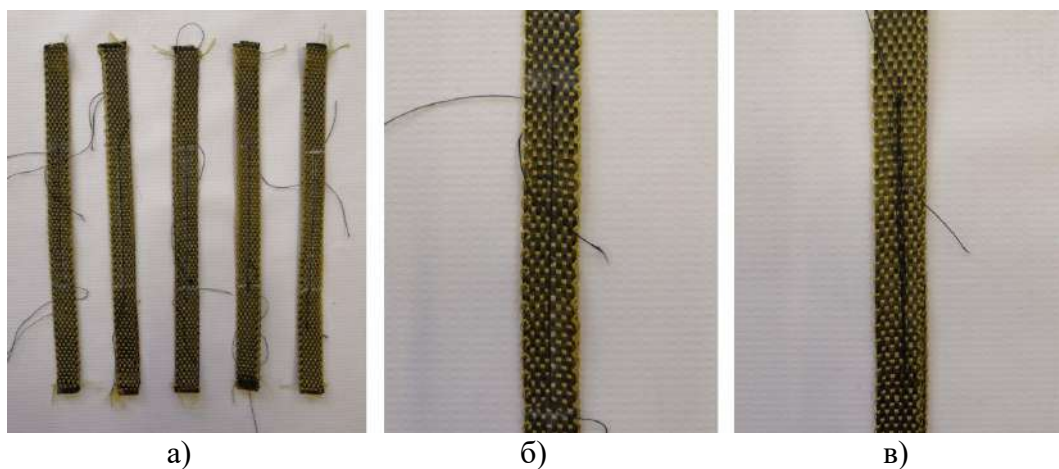


Рис. 4

Изготовление образцов и их испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ Р 56785-2015 [20].

*Результаты и обсуждение*

Результаты испытаний представлены в табл. 1. Их анализ показал, что прошивка увеличивает прочность образца при растяжении. В образцах с длиной строчки прошивки 10 см увеличение прочности в среднем составило 49,9%, а в образцах с длиной строчки 5 см – 36,5%.

Образцы после испытаний показаны на рис. 5.



Рис. 5

Т а б л и ц а 1

Тип образца	Разрывное усилие $P_{max}$ , кН	Тип образца	Разрывное усилие $P_{max}$ , кН	Тип образца	Разрывное усилие $P_{max}$ , кН
0-1	15,51	Д-1	23,81	К-1	22,00
0-2	15,81	Д-2	24,62	К-2	24,45
0-3	19,92	Д-3	22,09	К-3	18,11
0-4	12,37	Д-4	24,27	К-4	23,37
0-5	15,26	Д-5	23,44	К-5	19,74

Как видно на представленном рисунке, разрушение образцов с прошивкой происходило ближе к зажимам, в то время как в местах прошивки разрушения не наблюдалось. Кроме того, в прошитых образцах не происходило расслоения при воздействии разрывной нагрузки, в отличие от образцов без прошивки (рис. б).



Рис. 6

Анализ картины разрушений образцов позволяет сделать вывод о том, что за счет соединения слоев лент прошивкой в продольном направлении нагрузка распределялась одновременно на все слои, в отличие от непршитых образцов, где каждый слой лент работал по отдельности, в результате чего происходило расслоение при растягивающем усилии.

## ВЫВОДЫ

В результате исследований установлено, что выборочная прошивка слоистого ленточного композита цепной строчкой улучшает показатели прочности при растяжении и препятствует расслаиванию при технологической обработке и приложении нагрузки за счет введения сквозной армирующей строчки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates // Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 2000, 31. Pp. 1...27.
2. Mouritz A.P., Leong K.H., Herzberg I. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites // Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 1997, 28. Pp. 1979...991.
3. Zhao N., Rödel H., Herzberg C., Gao Shang-Lin, Krzywinski S. Stitched glass/PP composite. Part I: Tensile and impact properties // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40. Pp. 635...643.
4. Zheng Y., Xiaoquan C., Yasir B. Effect of Stitching on Plain and Open-hole Strength of CFRP Laminates // Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25. Pp. 473...484.

5. Saboktakin A. 3D Textile Preforms And Composites For Aircraft Structures: A Review // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2019, 6(1). – <https://commons.erau.edu/ijaaa/vol6/iss1/2/>
6. Dransfield K., Baillie C., Mai Y-W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching – a review // Composites Science and Technology, 1994, Vol. 50, No 3. Pp. 305...317.
7. Scarponi C., Perillo A.M., Cuttillo L., et al. Advanced TTT composite materials for aeronautical purposes: compression after impact (CAI) behaviour // Composites Part B: Engineering, 2007, Vol. 38, No 2. Pp. 258...264.
8. Sağlam G., Bedeloğlu A. Mechanical properties of thermoplastic filament stitched carbon fiber reinforced composites // Journal of Innovative Science and Engineering, 2022, 6(2). Pp. 248...258.
9. Drake D.A., Sullivan R.W., Lovejoy A.E., Clay S.B., Jegley D.C. Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials – A mechanistic review // Journal of Composite Materials. 2021, 55(23). Pp. 3307...3321.
10. Karahan M., Ulcay Y., Karahan N., Kus A. Influence of Stitching Parameters on Tensile Strength of Aramid/Vinyl Ester Composites // Materials Science, 2013, 19. Pp. 67...72.
11. Платонов А.А. Полимерные композиционные материалы на основе прошитого наполнителя с повышенной ударостойкостью // Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. – [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2014/2014\\_4\\_7\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2014/2014_4_7_1.pdf)
12. Lai J., Peng Z., Huang Z., Li M., Mo M., Liu B. Effect of Stitching, Stitch Density, Stacking Sequences on Low-Velocity Edge Impact and Compression after Edge Impact (CAEI) Behavior of Stitched CFRP Laminates // Materials, 2022, 15(24). – <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/24/8822>
13. Yudhanto A., Lubineau G., Ventura I.A., Watanabe N., Iwahori Y., Hoshi H. Damage characteristics in 3D stitched composites with various stitch parameters under in-plane tension // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 71. Pp. 17...31.
14. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites // Composites Part A: Applied Sciences and Engineering, 2010, 41. Pp. 709...728.
15. Velicki A., Jegley D. PRSEUS Structural Concept Development // AIAA 2014-0259, 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014. – <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140003950/downloads/20140003950.pdf>
16. Jegley D.C. Improving strength of postbuckled panels through stitching // Composite Structures, 2007, 80. Pp. 298...306.
17. Aymerich F., Onnis R., Priolo P. Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36. Pp. 603...614.

18. Han X.P., Li L., Zhu X.P., Yue Z.F. Experimental study on the stitching reinforcement of composite laminates with a circular hole // *Composites Science and Technology*, 2008, 68. Pp. 1649...1653.

19. Rad C.V., Thomas F.D., Seay B., Van Tooren M.J.L. Manufacturing and characterization of novel clutch non-conventional fiber-reinforced composite laminates // *Composite Structures*, 2019, Vol. 215. Pp. 454...470.

20. ГОСТ Р 56785-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.

## REFERENCES

1. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic approach to the properties of stitched laminates // *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 2000, 31. Pp. 1...27.

2. Mouritz A.P., Leong K.H., Herzberg I. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites // *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 1997, 28. Pp. 1979...991.

3. Zhao N., Rödel H., Herzberg C., Gao Shang-Lin, Krzywinski S. Stitched glass/PP composite. Part I: Tensile and impact properties // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40. Pp. 635...643.

4. Zheng Y., Xiaoquan C., Yasir B. Effect of Stitching on Plain and Open-hole Strength of CFRP Laminates // *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25. Pp. 473...484.

5. Saboktakin A. 3D Textile Preforms And Composites For Aircraft Structures: A Review // *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2019, 6(1). – <https://commons.erau.edu/ijaaa/vol6/iss1/2/>

6. Dransfield K., Baillie C., Mai Y-W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching – a review // *Composites Science and Technology*, 1994, Vol. 50, No 3. Pp. 305...317.

7. Scarponi C., Perillo A.M., Cuttillo L., et al. Advanced TTT composite materials for aeronautical purposes: compression after impact (CAI) behaviour // *Composites Part B: Engineering*, 2007, Vol. 38, No 2. Pp. 258...264.

8. Sağlam G., Bedeloğlu A. Mechanical properties of thermoplastic filament stitched carbon fiber reinforced composites // *Journal of Innovative Science and Engineering*, 2022, 6(2). Pp. 248...258.

9. Drake D.A., Sullivan R.W., Lovejoy A.E., Clay S.B., Jegley D.C. Influence of stitching on the out-of-plane behavior of composite materials – A mechanistic review // *Journal of Composite Materials*. 2021, 55(23). Pp. 3307...3321.

10. Karahan M., Ulcay Y., Karahan N., Kus A. Influence of Stitching Parameters on Tensile Strength of Aramid/Vinyl Ester Composites // *Materials Science*, 2013, 19. Pp. 67...72.

11. Platonov A.A. Polymer composite materials based on stitched filler with increased impact resistance // *Aviation materials and technologies*, 2014, 4. Retrieved from: [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2014/2014\\_4\\_7\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2014/2014_4_7_1.pdf)

12. Lai J., Peng Z., Huang Z., Li M., Mo M., Liu B. Effect of Stitching, Stitch Density, Stacking Sequences on Low-Velocity Edge Impact and Compression after Edge Impact (CAEI) Behavior of Stitched CFRP Laminates // *Materials*, 2022, 15(24). Retrieved from: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/24/8822>

13. Yudhanto A., Lubineau G., Ventura I.A., Watanabe N., Iwahori Y., Hoshi H. Damage characteristics in 3D stitched composites with various stitch parameters under in-plane tension // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 71. Pp. 17...31.

14. Mouritz A.P., Cox B.N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites // *Composites Part A: Applied Sciences and Engineering*, 2010, 41. Pp. 709...728.

15. Velicki A., Jegley D. PRSEUS Structural Concept Development // AIAA 2014-0259, 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014. Retrieved from: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140003950/downloads/20140003950.pdf>

16. Jegley D.C. Improving strength of postbuckled panels through stitching // *Composite Structures*, 2007, 80. Pp. 298...306.

17. Aymerich F., Onnis R., Priolo P. Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36. Pp. 603...614.

18. Han X.P., Li L., Zhu X.P., Yue Z.F. Experimental study on the stitching reinforcement of composite laminates with a circular hole // *Composites Science and Technology*, 2008, 68. Pp. 1649...1653.

19. Rad C. V., Thomas F. D., Seay B., Van Tooren M. J. L. Manufacturing and characterization of novel clutch non-conventional fiber-reinforced composite laminates // *Composite Structures*. 2019. Vol. 215. Pp. 454...470.

20. GOST R 56785-2015. Polymer composites. Tensile test method for flat samples. Moscow: Standartinform, 2016. 20 p.

Рекомендована кафедрой художественного моделирования, конструирования и технологии швейных изделий РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 11.10.23.

УДК 004.032.26; 687.1  
DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_236

**СРАВНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ И ПОЛНОСВЯЗНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**  
**COMPARISON OF CONVOLUTIONAL AND FULLY CONNECTED NEURAL  
NETWORKS IN RELATION TO IMAGE RECOGNITION TASKS**

*Е.Е. СМІРНОВ, В.В. КОСТЫЛЕВА, А.Р. МУРТАЗИНА, И.Б. РАЗИН*

*E.E. SMIRNOV, V.V. KOSTYLEVA, A.R. MURTAZINA, I.B. RAZIN*

**(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство))**

**(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))**

E-mail: evg7162@mail.ru

*В статье рассматривается основополагающая проблема выбора архитектуры нейронной сети для решения задачи распознавания образов на плоском изображении. Показано, что баланс между скоростью обучения, временем проверки и количеством ошибок определяет затраты на обучение, которые существенно возрастают при повышении точности предсказаний. Представлены результаты прогнозов, полученные в ходе экспериментов с использованием архитектур сверточной нейронной сети, для тестовых наборов изображений изделий легкой промышленности.*

*The article deals with the fundamental problem of choosing a neural network architecture for solving the problem of pattern recognition on a flat image. It is shown that the balance between the learning rate, verification time, and the count of errors determines the training costs, which increase significantly with increasing prediction accuracy. The results of forecasts obtained in the course of experiments using convolutional neural network architectures for test sets of light industry products images are presented.*

**Ключевые слова:** нейронная сеть, машинное обучение, обработка данных, распознавание изображений, классификация, изделия легкой промышленности, сверточные нейронные сети.

**Keywords:** neural network, machine learning, data processing, image recognition, classification, light industry products, convolutional neural networks.

## Введение

В статьях [1-4] нами рассмотрено применение полносвязной нейронной сети (ПНС) для распознавания видов одежды на примере набора данных *mnist\_fashion* [5]. В настоящей статье обсуждаются возможности альтернативного типа нейронных сетей – сверточных (СНС).

Идея сверточных сетей была основана на биологических исследованиях. В ходе изучения зрительной коры головного мозга кошки обнаружено, что существуют «простые клетки», которые особо активно реагируют на прямые линии под разными углами, и «сложные клетки», реагирующие на движение линий в одном направлении. Ян Ле Кун предложил использовать так называемые сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks – CNN) [6].

Смысл заключается в чередовании сверточных (C-layers), субдискретизирующих (S-layers) и выходных полносвязных слоев (F-layers) (рис. 1 – пример архитектуры сверточной нейронной сети).

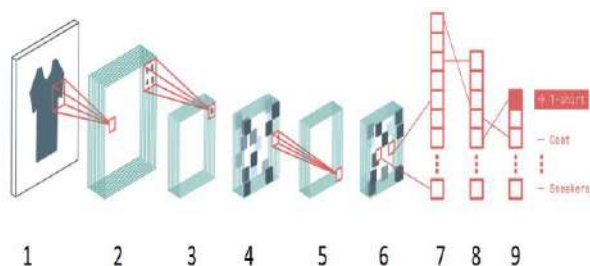


Рис. 1

Как видно на рис. 1, СНС имеет более сложную структуру, чем полносвязная сеть. В данном примере имеется 9 слоев: №1 – входной слой, на который подается изображение формата 28x28 с одним каналом; №2 и №5 – сверточные слои, которые позволяют выделять энные характерные признаки. Происходит это благодаря некоторым определенным маскам или сверткам [6, 7]. Чаще всего окно свертки принимают размером 3x3 со случайно инициализированными весами, после чего этой сверткой проходят по всему изображению с каким-то шагом, получая новую карту признаков.

На рис. 2 продемонстрирован пример с выделением признаков, подходящих под свертку. Очевидно, что матрица свертки с «1» в центральном столбце выделяет вертикальные линии, а с «1» в центральной строке – горизонтальные. Большое количество сверток позволяет вычлнить внушительный список значимых признаков. На первом этапе это, как правило, примитивные линии. На выходе сверточного слоя из одного изображения мы получаем некоторое количество новых.

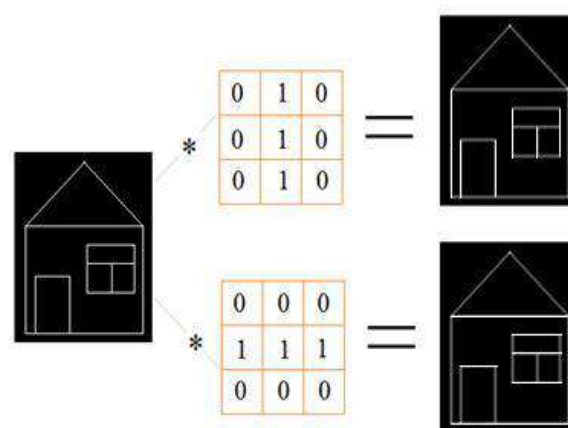


Рис. 2

В паре со сверточным часто идет слой субдискретизирующий, который служит снижению размера изображения с переносом необходимых признаков (на рис. 1 он отмечен под номером 3). Это позволяет получать более сложные значимые признаки, чем на предыдущем этапе. Субдискретизирующие слои делятся на максимизирующие, усредняющие, минимизирующие и выбираются исходя из поставленной задачи. Использование такого слоя при маске размером 2x2 уменьшает размер изображения в 4 раза.

Слой №№ 4, 6 называют слоями dropout [8, 9] или исключением. Они позволяют частично решать проблему переобучения и могут применяться как в СНС, так и ПНС. В рамках этой статьи мы на этом детально не останавливаемся. Слои №№ 7-9 – это классическая ПНС, описанная ранее.

Эксперимент состоял из трех этапов:

- 1) набор данных *mnist\_fashion* [5];

2) набор данных из цветных изображений размера 132x102 пикселя с малым количеством посторонних объектов [10];

3) набор данных из цветных изображений размером 32x32 пикселя с большим количеством посторонних объектов.

### Экспериментальные исследования

#### Этап 1

Архитектура сверточной нейронной сети представлена в виде табл. 1.

Таблица 1

Слой (функция активации)	Выходная размерность	Количество настраиваемых параметров
conv2d (ReLU)	(28, 28, 32)	320
субдискретизирующий	(14, 14, 32)	0
conv2d_1 (ReLU)	(14, 14, 64)	18496
max_pooling2d_1	(7, 7, 64)	0
flatten	(3136)	0
dense (ReLU)	(128)	401536
dropout	(128)	0
dense_1 (ReLU)	(64)	8256
dropout_1	(64)	0
dense_2 (softmax)	(10)	650

В качестве сверточной части сети взяты две пары сверточных (conv2d) и субдискретизирующих (max\_pooling2d) сетей [11], после чего, вытягивая с последнего слоя сверточной части весь набор карт признаков, на первом слое (dense) полносвязной части нейронной сети получили  $7*7*64 =$

3136 нейронов. Между скрытыми полносвязными слоями добавили слой dropout. В качестве функции активации везде взята ReLu. У выходного слоя по-прежнему SoftMax.

Количество настраиваемых параметров текущей архитектуры СНН (cnn\_standart) составляет 429258 и отличается более чем в 4.2 раза в сравнении с ПНС (fashion\_flatten\_relu – 101770). Это говорит о больших временных затратах на обучение. В нашем случае они выросли приблизительно в 6.9 раза при увеличении количества параметров в 4.2. Это происходит из-за серьезной многократной обработки изображений [12]. Точность обучения данной архитектуры СНС составила приблизительно 91% (рис. 3, А), в то время как точность полносвязных – около 88% (рис. 3, Б).

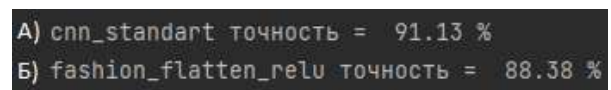


Рис. 3

Таким образом, на этом простом наборе данных за счет сверточной структуры сократилось количество ошибок примерно на 25%. На рис. 4 приведен фрагмент предсказания, где рамками выделены различия в предсказаниях: красные – ошибка, зеленые – верное.

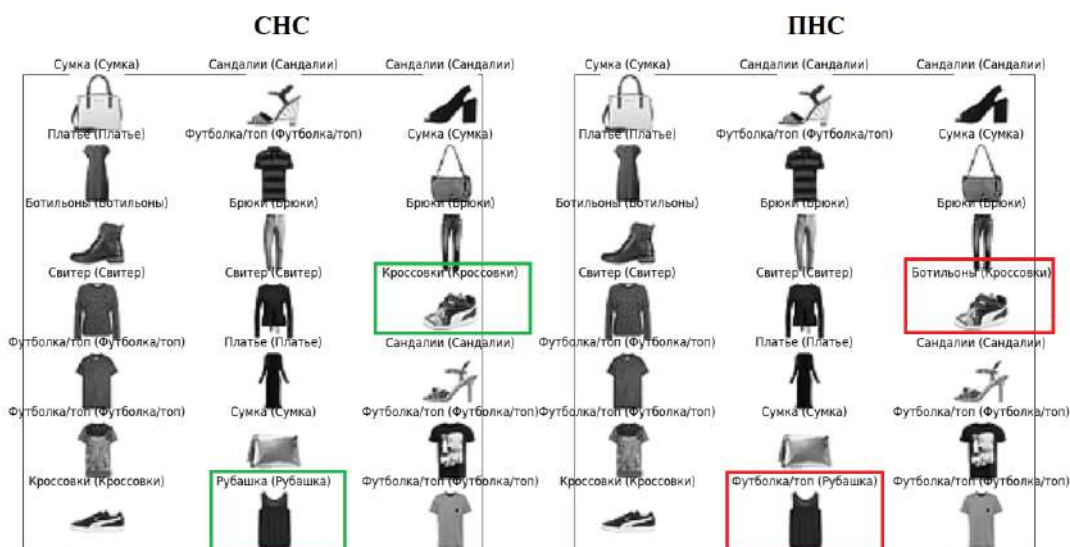


Рис. 4

Снижение количества ошибок довольно значительно, но и временные затраты на обучение в 7 раз выше. Может сложиться впечатление, что использование СНС не имеет особого смысла. Чтобы проверить, так это или нет, проведем еще один эксперимент.

### Этап 2

На этом этапе воспользуемся большим набором данных об обуви, состоящим из 50 000 изображений каталога, собранных с zappos.com [13, 14]. Изображения разделены на 4 основные категории: туфли, сандалии, тапочки и сапоги (shoes, sandals, slippers, boots). Для удобства анализа [15] обувь центрирована на белом фоне и изображена в той же ориентации. Изображения представлены в формате 132x102 пикселя с тремя цветовыми каналами. Фрагмент набора показан на рис. 5.

Структуры сетей взяты из предыдущего этапа с изменением только входного и выходного слоев. Их необходимо скорректировать под характеристики выборки. В ней присутствует четыре класса, значит, на выходе будет четыре нейрона. Входной слой

для полносвязной сети скорректируется на  $132 \times 102 \times 3 = 40\,392$  нейрона.



Рис. 5

Скорость одной эпохи обучения в этом случае существенно изменилась – в 8,92 раза. Относительно предыдущего этапа время на обучение сверточной сети увеличилось в 12,5 раза, а полносвязной – в 9,5 раза. Зависимость времени на обучение от размерности входных данных близка к линейной.

На рис. 6 представлены результаты прогона тестового набора через нейронные сети. Рамками выделены расхождения в предсказаниях: красная – ошибка; зеленая – верное предсказание. Из рисунка видно, что полносвязная сеть ошибается чаще.



Рис. 6

Полные данные о точности предсказания сетей по всей тестовой выборке составили: для полносвязной – 87%, сверточной – 94%.

В этом случае количество ошибок при использовании сверточной сети сокращается

на 49%, что явно просматривается на графике точности обучающей и валидационной выборок обеих сетей (рис. 7 – графики обучения нейронных сетей)

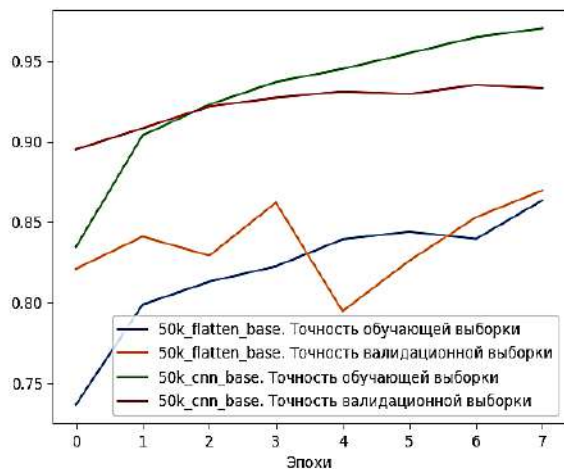


Рис. 7

### Этап 3

На этом этапе протестировано выделение целевых объектов среди посторонних. Возьмем похожий по параметрам набор cifar10. Его отличия от mnist\_fashion: три цветовых канала вместо одного; на изображении кроме основного объекта присутствуют второстепенные. В этот набор также включены 60 000 изображений формата 32x32 с тремя цветовыми каналами, разбитых в пропорциях 50 000/10 000 на 10 классов. Тогда нам необходимо всего лишь скорректировать входные слои под новую размерность изображений, а все остальные настройки сетей можно оставить прежними. Таким образом эксперимент будет максимально точно показывать разницу между обработками цветных изображений с дополнительными деталями и черно-белых без таковых.

В результате точность полносвязной сети составила всего 43.59%, а сверточной – 74.18% (рис. 8).

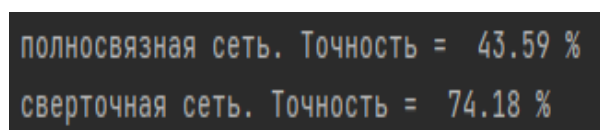


Рис. 8

Этот разрыв отчетливо виден на графиках точности (рис. 9).

На этом примере разница между рассмотренными типами сетей стала заметнее (количество ошибок ниже почти в 2.2 раза).

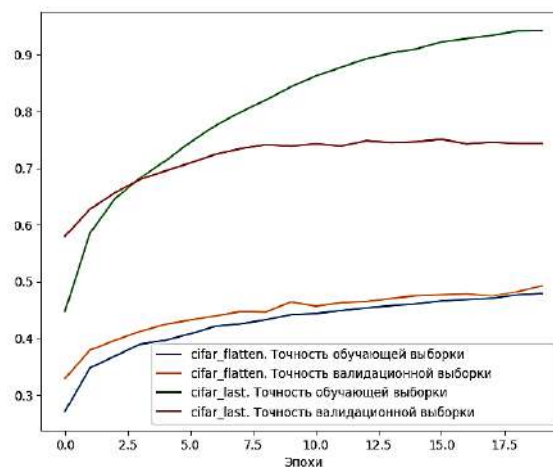


Рис. 9

Это обусловлено как раз способностями сверточных сетей обобщать фрагменты изображений, чего в свою очередь лишены полносвязные: при вытягивании изображения в линейную цепочку байт мы теряем топологию изображения [16], и, чем большего размера само изображение и количество деталей на нем, тем заметнее этот эффект.

В аналогичных работах точность распознавания сверточной сети составляет от 61% до 82% (в зависимости от области применения: медицина, промышленность, карты местности и др.) [17-19]. Подобные результаты обусловлены сложностью распознавания объектов, качеством изображений, объемом выборки и архитектурой сети.

## ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов показывают, что применение сверточной архитектуры нейронной сети в задачах распознавания изображений позволяет получить существенное сокращение ошибочных предсказаний в сравнении с полносвязной. При этом, чем больше размер собственно изображения и количество деталей на нем, тем значительнее будет проявляться этот эф-



факт. Но за более высокую точность приходится платить существенным ростом потребности в вычислительных мощностях и времени. Вопросам поиска приемлемых компромиссных решений будут посвящены последующие исследования. Полученные результаты служат развитию, например, научной теории автоматизированного проектирования вкладных ортопедических приспособлений обуви. С использованием нейронной сети сверточной архитектуры для определения состояния стоп, их размеров, особенностей и зон наибольшего давления нами исследуются подометрические снимки стоп. Это имеет существенное практическое и социальное значение, так как здоровьесберегающий эффект конструкции стельки в устранении перегрузок нижних конечностей, обеспечении их правильного анатомического положения и пресечении прогрессирования деформаций тем более действенен, чем точнее ее ложемент соответствует индивидуальному рельефу плантарной поверхности стопы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Смирнов Е.Е., Костылева В.В., Разин И.Б., Муртазина А.Р.* Распознавание вида одежды и обуви по изображению // *Костумология*. 2023. Т. 8. № 1. – <https://kostumologiya.ru/PDF/03TLKL123.pdf>.
2. *Смирнов Е.Е., Костылева В.В., Разин И.Б., Миронов В.П.* Искусственные нейронные сети в решении задач классификации обуви // *Костумология*. 2021. Т. 6. № 4. – <https://kostumologiya.ru/PDF/15TLKL421.pdf>
3. *Белгородский В.С., Гусева М.А., Андреева Е.Г., Рогожина Ю.В.* Искусственный интеллект в оценке качества готовой швейной продукции // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 2 (398). С. 168...177. – DOI 10.47367/0021-3497\_2022\_2\_168
4. *Романовский Р.С., Петросова И.А., Андреева Е.Г., Шитлова Е.А.* Разработка новых моделей мужской одежды с учетом рекомендаций искусственного интеллекта // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021. No 4 (394). С. 145...152. – DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_4\_145
5. Fashion MNIST dataset, an alternative to MNIST. – [https://keras.io/api/datasets/fashion\\_mnist/](https://keras.io/api/datasets/fashion_mnist/) (Дата обращения 15.01.23).
6. *Cun Y.L., Denker J. S., Solla S., Howard R.E., Jackel L.D.* Optimal Brain Damage, in Touretzky, David (Eds), *Advances in Neural Information Processing Systems 2 (NIPS\*89)*, Morgan Kaufman, Denver, CO, 1990.

7. *Cun Y.L., Bengio Y.* Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series, in Arbib, M. A. (Eds), *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, MIT Press, 1995.

8. *Cun Y.L., Bottou L., Orr G., Muller K.* Efficient Back Prop, in Orr, G. and Muller K. (Eds), *Neural Networks: Tricks of the trade*, Springer, 1998.

9. *Aurelio R.M., Poulitney Ch., Chopra S., Cun Y.L.* Efficient Learning of Sparse Representations with an Energy-Based Model, in J. Platt et al. (Eds), *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2006)*, MIT Press, 2006.

10. UTZappos50K – <https://vision.cs.utexas.edu/projects/finegrained/utzap50k/> (Дата обращения: 20.02.2023).

11. *Samarasinghe S.* *Neural Networks for Applied Sciences and Engineering. From Fundamentals to Complex Pattern Recognition* // Auerbach Publications, 2007. 570 p.

12. *Simon H.* *Neural Networks: A Comprehensive Foundation Second Edition*. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.

13. Shoes, Sneakers, Boots, & Clothing + FREE SHIPPING. – <https://www.zappos.com/> (дата обращения 20.02.2023).

14. *Yu A., Grauman K.* Fine-Grained Visual Comparisons with Local Learning. In CVPR, 2014.

15. *Yu A., Grauman K.* Semantic Jitter: Dense Supervision for Visual Comparisons via Synthetic Images. In ICCV, 2017

16. *Brink H., Richards J.W., Fetherolf M.* *Real-World Machine Learning* // Shelter Island: Manning, 2017.

17. *Van Nguyen S., Tran H.M. & Le T.S.* Application of Geometric Modeling in Visualizing the Medical Image Dataset. SN COMPUT. SCI. 2020, 1, 254. - <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00266-0>

18. *Ruiz R.B., Velásquez J.D.* Artificial Intelligence for the Future of Medicine. In: Lim, C.P., Vaidya, A., Chen, YW., Jain, V., Jain, L.C. (eds) *Artificial Intelligence and Machine Learning for Healthcare*. Intelligent Systems Reference Library, 2023. vol. 229. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-11170-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11170-9_1)

19. *Guang Jia, Xunan Huang, Sen Tao etc.* Artificial intelligence-based medical image segmentation for 3D printing and naked eye 3D visualization, *Intelligent Medicine*, Volume 2, Issue 1, 2022, Pages 48-53. – <https://doi.org/10.1016/j.imed.2021.04.001>.

#### REFERENCES

1. *Smirnov E.E., Kostyleva V.V., Razin I.B., Murtaзина A.A.R.* Recognition of the type of clothing and shoes by image. *Journal of Clothing Science*. 2023, 8(1) – <https://kostumologiya.ru/PDF/03TLKL123.pdf>.

2. *Smirnov E.E., Kostyleva V.V., Razin I.B., Mironov V.P.* Artificial neural networks in solving problems of shoe classification. *Journal of Clothing Science*, 4(6). – <https://kostumologiya.ru/PDF/15TLKL421.pdf>

3. Fashion MNIST dataset, an alternative to MNIST. – [https://keras.io/api/datasets/fashion\\_mnist/](https://keras.io/api/datasets/fashion_mnist/) (date of the application 15.01.23).

4. *Belgorodsky V.S., Guseva M.A., Andreeva E.G., Rogozhina Yu.V.* Artificial intelligence in quality assessment of finished sewing products // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. № 2 (398). P. 168...177. – DOI 10.47367/0021-3497\_2022\_2\_168
5. *Romanovsky R.S., Petrosova I.A., Andreeva E.G., Shipilova E.A.* Development of new models men's clothing taking into account the recommendations of artificial intelligence // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021, No 4 (394). P. 145...152. – DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_4\_145
6. *Cun Y.L., Denker J. S., Solla S., Howard R.E., Jackel L.D.* Optimal Brain Damage, in Touretzky, David (Eds), *Advances in Neural Information Processing Systems 2 (NIPS\*89)*, Morgan Kaufman, Denver, CO, 1990
7. *Cun Y.L., Bengio Y.* Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series, in Arbib, M. A. (Eds), *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, MIT Press, 1995.
8. *Cun Y.L., Bottou L., Orr G., Muller K.* Muller: Efficient BackProp, in Orr, G. and Muller K. (Eds), *Neural Networks: Tricks of the trade*, Springer, 1998.
9. *Aurelio R.M., Poultney Ch., Chopra S., Cun Y.L.* Efficient Learning of Sparse Representations with an Energy-Based Model, in J. Platt et al. (Eds), *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2006)*, MIT Press, 2006.
10. UTZappos50K – <https://vision.cs.utexas.edu/projects/finegrained/utzap50k/> (Дата обращения: 20.02.2023).
11. *Samarasinghe S.* Neural Networks for Applied Sciences and Engineering. From Fundamentals to Complex Pattern Recognition // *Auerbach Publications*, 2007. 570 с.
12. *Simon H.* Neural Networks: A Comprehensive Foundation Second Edition. M.: Williams, 2006. 1104 p.
13. Shoes, Sneakers, Boots, & Clothing + FREE SHIPPING. – <https://www.zappos.com/> (date of the application 20.02.2023).
14. *Yu A., Grauman K.* Fine-Grained Visual Comparisons with Local Learning. In CVPR, 2014.
15. *Yu A., Grauman K.* Semantic Jitter: Dense Supervision for Visual Comparisons via Synthetic Images. In ICCV, 2017.
16. *Brink H., Richards J.W., Fetherolf M.* Real-World Machine Learning // *Shelter Island: Manning*, 2017.
17. *Van Nguyen S., Tran H.M. & Le T.S.* Application of Geometric Modeling in Visualizing the Medical Image Dataset. *SN COMPUT. SCI.* 1, 254 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00266-0>
18. *Ruiz R.B., Velásquez J.D.* Artificial Intelligence for the Future of Medicine. In: Lim, C.P., Vaidya, A., Chen, YW., Jain, V., Jain, L.C. (eds) *Artificial Intelligence and Machine Learning for Healthcare*. Intelligent Systems Reference Library, 2023. vol 229. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-11170-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11170-9_1)
19. *Guang Jia, Xunan Huang, Sen Tao etc.* Artificial intelligence-based medical image segmentation for 3D printing and naked eye 3D visualization, *Intelligent Medicine*, Volume 2, Issue 1, 2022, Pages 48-53. – <https://doi.org/10.1016/j.imed.2021.04.001>.

Рекомендована кафедрой художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи РГУ имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство). Поступила 06.06.23.

УДК 011.26

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_5\_243

**ИСТОРИЯ ЖУРНАЛОВ МОД В РОССИИ. УСПЕХ ЖУРНАЛА «АТЕЛЬЕ»  
(К 100-ЛЕТИЮ ВЫПУСКА ЖУРНАЛА «АТЕЛЬЕ»)**

**HISTORY OF FASHION MAGAZINES IN RUSSIA.  
THE SUCCESS OF “ATELIER” MAGAZINE  
(TO THE 100TH ANNIVERSARY OF THE ISSUE OF “ATELIER” MAGAZINE.**

*Т.М. ЩЕГЛОВА<sup>1</sup>, Т.М. НОЗДРАЧЕВА<sup>2</sup>, О.Н. ДИЕВА<sup>2</sup>*

*T.M. SHCHEGLOVA<sup>1</sup>, T.M. NOZDRACEVA<sup>2</sup>, O.N. DIEVA<sup>2</sup>*

*(<sup>1</sup>Старооскольский техникум технологий и дизайна,  
<sup>2</sup>Юго-Западный государственный университет)*

*(<sup>1</sup>Stary Oskol College of Technology and Design,  
<sup>2</sup>Southwest State University)*

E-mail: tatyana.sttd2014@yandex.ru; noztat@yandex.ru; odieva@yandex.ru

*Статья посвящена первому советскому журналу мод «Ателье», исходными предпосылками для возникновения которого послужил возрастающий интерес к модным изданиям с начала XVIII века. Это был первый аутентичный журнал, где все было создано отечественными авторами: моды, тексты, изображения. В журнале были отражены основные принципы деятельности первых советских моделирующих организаций.*

*Представлен обзор журналов-предшественников и журналов-преемников с XVIII в. до начала XX в., их содержание, читательская аудитория, динамика развития, стратегия издателей, направленная на успех.*

*С началом индустриализации страны и развития швейной промышленности в стране появляются дома моделей и новые журналы мод. Некоторые тотчас исчезали, другие меняли свое лицо, третьи укрепляли свои позиции.*

*Вышедший в начале XXI в. первый номер современного специализированного журнала «Ателье» помог зародиться новой волне интереса к индустрии моды и восполнил дефицит информации о тенденциях, текстиле, организации бизнеса в швейной отрасли. Продолжая традиции единственного прикладного журнала для профессионалов швейного дела, с 2020 г. журнал имеет электронный формат.*

*The article is devoted to the first Russian fashion magazine "Atelier" and the initial prerequisites for its emergence were the growing interest in fashion publications since the beginning of the XVIII century. It was the first authentic magazine where everything (fashion, texts, images) was created by domestic authors. The journal reflected the basic principles of the first Soviet modeling organizations.*

*An overview of predecessor and successor magazines from the 18th century until the beginning of the twentieth century, including their content, readership, development dynamics, publishers' success aimed strategy is presented.*

*With the beginning of the industrialization of the country and the development of the garment industry, fashion houses and new fashion magazines appear in the country. Some immediately disappeared, others changed their face, and the third strengthened their positions.*

*The first issue of the modern specialized magazine "Atelier", published at the beginning of the XXI century, helped to generate a new wave of interest in the fashion industry and filled the lack of information about trends, textiles, and business organization in the clothing industry. Continuing the traditions of the only applied magazine for sewing professionals, since 2020 the magazine has an electronic format.*

**Ключевые слова:** журналы мод, история, мода, журнал «Ателье», успех, творчество русских художников, модели одежды, индустрия моды.

**Keywords:** fashion magazines, history, fashion, Atelier magazine, success, the creativity of Russian artists, clothing models, fashion industry.

Ровно 100 лет назад, в 1923 г., увидел свет первый в истории советской моды журнал «Ателье», в котором анализировались взаимоотношения моды и революции, танца, театра, спорта.

Этому значительному событию в сфере моды предшествовал выпуск целого ряда «модных» журналов, более или менее популярных и значимых, различающихся содержанием и оформлением, предназначенных для узкого или широкого круга читателей, выпускаемых с различной регулярностью и продолжительностью.

Совершая экскурс в историю российских модных журналов, следует отметить, что модные издания в России, как и в Ев-

ропе, вплоть до конца XVIII в. были редкостью. В России первые статьи, имеющие отношение к внешнему виду и косвенно к моде, появились благодаря Петру I в «Ведомостях» (1702 г.), где было указано, в каком виде стоит являться на «ассамблеи» [8]. Придворные дамы петровских времен чаще всего шили новые платья на европейский манер, скопированные с путешествующей в модном платье куклы Пандоры.

Летоисчисление модных журналов в России начинается с 1779 г. открытием Н.И. Новиковым журнала «Модное ежемесячное издание. Библиотека для дамского туалета», выпуск которого через год был прекращен.



Рис. 1

В 1791 году к концу правления Екатерины в Москве был выпущен «Журнал английских, французских и немецких новых мод» (издатель В.И. Окорочков), ставший первым отечественным журналом об одежде. С апреля по декабрь вышло всего три выпуска, в которых писалось исключительно о моде и нравах в Европе – Берлине, Париже, Лондоне, Гамбурге, Варшаве.

В 1804 году М.Н. Макаровым также в Москве был организован выпуск 12 номеров ежемесячного издания «Журнал для милых» [6].

Непродолжительное существование первых русских журналов мод было связано с повальной «франкоманией». Французские издания, которых в России в последней четверти XVIII – начале XIX вв. было сполна, содержали подробные описания новейших французских нарядов. Читательскую аудиторию данных изданий составляло столичное дворянство. Российские же журналы мод заказывали только дамы из провинции.

Издание первого женского журнала-долгожителя связано с именем Петра Ивановича Шаликова. В 1823 г. в Москве князь П.И. Шаликов создает бюджетный аналог дорогостоящих заграничных журналов мод – «Дамский журнал», выходявший в свет еженедельно на протяжении десяти лет и пользовавшийся популярностью у читательниц. Модный раздел журнала снабжался большим количеством эскизов платьев, шляпок и обуви. Присутствовали и акварельные зарисовки, дающие дамам примерное представление о модных оттенках.

В ноябрьском номере 1833 г. было сообщено о прекращении существования журнала [8].

Отечественные журналы мод становятся важной и неотъемлемой частью издательского рынка с 1830-х годов. Основная задача издателей и редакторов заключалась в том, чтобы приучить читателя к отечественным модным изданиям. Лишь только в конце 40-х и в 50-е годы XIX в. идея издания женских журналов получит свое дальнейшее развитие. Один за другим появятся самые разные женские журналы. Журналы становились арбитрами хорошего вкуса, обучали женщин одеваться «к лицу», вводили в курс светской и культурной жизни.



Рис. 2

В 1836 г. для более широкой и менее богатой публики Елизавета Францевна Сафонова выпускает в Москве первое издание модного журнала – «Журнал новейшего шитья». А через два года в Санкт-Петербурге она издает «Санкт-Петербургский журнал разного рода шитья и вышивания» [8]. Е.Ф. Сафонова всю свою жизнь посвятила журналам для обычных тружениц и простых девушек, в которых содержались советы, как сформировать и разнообразить свой гардероб, предоставлялись иллюстрации и выкройки, полезные прикладные приложения, чтобы женщины могли повторить модный фасон самостоятельно или вместе со своей портнихой. На специально отведенных полосах журнала впервые начинает публиковаться реклама, связанная в основном с модной индустрией.

Тиражи модных журналов на протяжении всего XIX в. были крайне малы. По 1000-3000 экземпляров на номер составляли средние журналы, 10000-12000 экземпляров во второй половине века составляли лишь крупнейшие журналы.

Во второй половине XIX века в дамские издания проникают идеи эмансипации и феминизма, авторы начинают больше говорить об образовании женщин, появляются материалы научно-популярного характера [8]. Женщины начинают работать, у них появляется больше возможностей прокормить себя самостоятельно. В этом им очень помогают модные журналы. Отечественные журналы читали как портнихи и модистки русского происхождения, чтобы предлагать обеспеченным клиенткам самые модные фасоны платьев и шляпок, так и дамы, интересующиеся модами, не знавшие европейских языков.

В 1862 г. София Григорьевна Мей впервые выпустила журнал, названный на английский манер «Модный магазин» о модных новинках Парижа и Петербурга, выпуски которого появлялись два раза в месяц. В официальном описании отмечалось, что журнал «заключал в себе моды, литературу, новости, хозяйство и работы». В 1883 г. С.Г. Мей передала свой журнал Г.Д. Гоппе, который сделал его частью своей издательской империи.

Герман Дмитриевич Гоппе, приглашенный в Россию из Германии в 1867 г., начинает издавать богато иллюстрированный, с обилием картинок журнал «Модный свет» (1868 г.), получивший сразу громадный успех.

Для расширения читательской аудитории Г. Гоппе в 1883 г. соединяет «Модный свет» с журналом «Модный магазин». С этого времени выходит предназначенное для самых широких слоев населения объединенное издание «Модный свет и модный магазин». Данный журнал составлял обзор последних модных тенденций сезона и иллюстрации модных костюмов с описанием цвета и сорта тканей предлагаемых моделей.

Приобретя лицензию на немецкий журнал «Der Bazaar», Г. Гоппе в 1870 г. начинает издавать его переводной вариант под названием «Новый Русский Базар». Издательский дом Гоппе помимо журналов мод издавал семейный журнал «Огонек», роскошные иллюстрированные альбомы, большое количество различных книг [3].

Ученик Г. Гоппе, Николай Павлович Аловерт, в 1884 г. открыл собственный отечественный журнал для русских женщин «Вестник Моды», подписчицей которого была Императрица Александра.

Для профессионалов модной индустрии (модистки, портные) предназначались профессиональные модные журналы, такие, как «Новейшие моды мужских платьев», «Детские платья и белье», «Модистка» и «Парижские модели шляп». Большое количество выкроек и модных картинок, отражающих детали фасона и тонкости кроя, включало единственное петербургское издание, посвященное исключительно мужской моде, – ежемесячный журнал «Новейшие моды мужских платьев» (1884-1912 гг., изд. И.П. Пелицаро).

В последнее десятилетие XIX в. умами и вкусами дам безраздельно правили три основных издания: «Новый Русский Базар», «Модный свет и модный магазин» и «Вестник Моды».

Н.П. Аловерт, выходец из мелкой воронежской буржуазии, в начале XX в. выкупает старые издания Гоппе и к 1913 г. единолично контролирует все крупные модные издания в стране. Все выпуски журнала стали снабжаться большим количеством выкроек. Аловерт сделал возможным заказ выкроек в восьми разных размерах [8]. Помимо рисунков в модных журналах стали публиковаться и чёрно-белые фотографии. Будучи неотъемлемой частью моды, модная фотография формировала свое восприятие эстетики и красоты.

Николай Аловерт превзошел своего учителя, выпуская на страницах журнала рекламу косметики и лекарств, создавая колонку, в которой редактор отвечал на письма читательниц и давал советы. Данная

стратегия принесли ему успех. Аловерт четко разделял аудиторию, понимая интересы каждой из групп своих читательниц.

Накануне революции в России выходило огромное количество модных изданий. Только в Петербурге – около 40 газет и журналов, посвященных стилю, шитью и хозяйству.

Революция 1917 г. изменила уклад и жизнь многих людей. Н.П. Аловерт был вынужден закрыть свои журналы. С извинениями в том, что он не может более доставлять из Парижа иллюстрации из-за сложившейся обстановки, он обращается к читательницам в последнем выпуске «Вестника Моды». На 33 году издания августовским сдвоенным номером (№ 9-10) 1918 г. «Вестник Моды» прекратил свое существование.

В начале 1918 г. начинается новая история развития журналов, т.к. после революции в Советской России какое-то время их не было. Выходит один из первых журналов «Искусство» с новыми революционными и художественными задачами: дать искусству новое, социалистическое содержание, изменить эстетический облик городов, сделав его жизнерадостным и нарядным; найти художественную форму народных празднеств, обычаев, создать, новый быт XX в., достойный великой пролетарской эпохи [9, с. 113].

После революции ничто не могло оставаться прежним, меняется и переосмысливается жизнь граждан новой страны. Начало 20-х годов – пик творчества авангардных художников. Приветствовалась простота во всем, в том числе в форме и крое бытового костюма. Роль журналов мод выполняют литературно-общественные журналы и грубые книжки швейной промышленности. В это время издается брошюра «Швейник»: одноцветная, на дешевой бумаге, с плохими техническими изображениями моделей и советами по их изготовлению.

В 1923 г. увидел свет первый в истории советской моды журнал «Ателье», в котором анализировались взаимоотношения моды и революции, танца, театра, спорта.

В работе журнала «Ателье» приняли участие известные деятели искусства Б.М. Кустодиев, Н.П. Ламанова, М.С. Шагинян, А.А. Экстер и др., выразили готовность участвовать в издании журнала авторы и иллюстраторы А.А. Ахматова, Ю.П. Анненков, Е.И. Замятин, М.А. Кузмин, К.А. Сомов, Л. Бакст, К.С. Петров-Водкин и др. [12, с. 142...143]. Это был первый аутентичный журнал, где все было создано советскими авторами: моды, тексты, изображения. «Ателье» стал глотком воздуха для эстетов: хорошая печать, цветные иллюстрации, мелованная бумага и необычная для того времени тема – мода.

Журнал «Ателье» был издан благодаря энергии двух женщин: Н.П. Ламановой и Ольги Сеничевой. Художественным руководителем «Ателье» была назначена великая Ламанова – «русский гений эlegantности», чье имя было известно всей Москве.

Стильную обложку журнала украшал эскиз экстравагантной модели удлиненного объемного пальто из светло-синего шелка-тафты (А.А. Экстер). Платье-бутон В.И. Мухиной, похожее на распускающийся цветок, с юбкой, стянутой в талии, широкополая красная шляпа и трость предвосхитило new look К. Диора и вызвало общий восторг [1].



Рис. 3

На страницах журнала демонстрировались фотографии известных московских актрис в роскошных нарядах, отделанных польским бобром манто, трехцветных платьях из шифона, головных уборах из тюля и страусовых перьев и т.п., разработанных в «Ателье мод» [9, с. 102], созданном на базе

«Центра по становлению нового советского костюма» и ставшем в дальнейшем прообразом Дома моделей одежды [10]. В журнале были напечатаны материалы на темы: «Вышивка в настоящем производстве», «Влияние танца на моду», «Влияние костюма на театр», «Костюм и революция» и др.

Среди рубрик были: «Обзор модных течений из иностранных журналов», «Театр», «Выставки», «Промышленное и художественное производство», «Спорт», «Новые книги» и др. Активно работала реклама.

Вышедший тиражом 2000 экземпляров журнал «Ателье» имел успех. Кроме печатного издания вышел киножурнал. Съемки Эдуарда Тиссе вошли в появившуюся позже на экранах «Хронику мод № 1». В хронике представлены модели, экспонировавшиеся на I Всероссийской художественно-промышленной выставке, прошедшей в 1923 г., на которой мастерской современного костюма, руководимой Н.П. Ламановой, был присужден диплом Государственной академии художественных наук [5]. В представленных моделях были отражены основные принципы деятельности первых советских моделирующих организаций: демонстрация народности костюма, не подражавшего западной моде; соответствие костюма образу жизни, труду, климатическим и природным условиям, физическому и духовному облику человека [13, с. 17; 9, с. 115...116].

Несмотря на то, что тираж журнала «Ателье» быстро разошелся, первый номер оказался и последним. Конкуренты обрушились с критикой, обвинив в «художничанье». Но настоящая причина молниеносного заката журнала: отсутствие средств. Выпускать подобное издание было роскошью.

Модные советы продолжали находить свое отражение в специализированной литературе и журналах. Теория Н.П. Ламановой о целесообразности красивой одежды, улучшающей жизнь не отдельных привилегированных людей, а широких слоев населения, была представлена в альбоме «Искусство в быту», вышедшем в 1925 г. и включающем ее модели, эскизы к ним,

практические рекомендации, по которым каждый в домашних условиях мог самостоятельно из простых материалов изготовить современную модную одежду [7, с. 69].

Продолжателем идей журнала «Ателье» был «Женский журнал», издававшийся в 1926-1930 гг., в котором печатались статьи на «женские темы», присутствовал раздел о моде «Мода в красках». Изредка статьи об одежде появлялись в главных общественно-политических женских изданиях СССР – «Работнице» и «Крестьянке». Эти журналы воспитывали женщин, небрежно относящихся к своей внешности, телу, здоровью.

В 1928 г. начал выходить журнал «Искусство одеваться», в котором печатали модели одежды М. Орловой, Н. Оршанской, О. Анисимовой, Е. Якуниной с использованием мотивов народной вышивки.

С началом этапа индустриализации страны в 1929 г. выходит новый профессиональный журнал «Швейная промышленность», в котором решались вопросы массового промышленного производства одежды [7, с. 70]. В эти же годы открываются швейные техникумы, школы ФЗУ, швейные факультеты при текстильных предприятиях, которые готовят специалистов для легкой промышленности. Это способствовало развитию модной индустрии в стране.

В 1930-е начинают издаваться красочные «Модели сезона» и гляцевые журналы универмагов (например, «Модели ГУМа») и производств. С открытием в 1935 г. Дома моделей на Сретенке (будущий Общесоюзный дом моделей одежды – 1944 г.) в 1936 г. выходит в свет ведомственный журнал «Дом моделей», издававшийся небольшим тиражом и распространявшийся адресно, среди советской элиты. Помимо работ отечественных иллюстраторов содержал раздел «Моды за границей», где были представлены работы западных кутюрье. В этом журнале впервые в новой истории появились фотографии моделей. Журналы мод издавали и региональные дома моделей.

С 1945 г. многие десятилетия главным источником информации о моде был «Жур-



нал мод», представлявший модели Общесоюзного дома моделей одежды на Кузнецком мосту, который практически без изменений просуществовал вплоть до конца 1980-х годов.

После войны на страницах журналов мод появляется мужской образ. Мужская мода – мода победителей.

После смерти Сталина пришедший к власти Хрущев объявил войну помпезному стилю. Объединенная редакция «Журнала мод» и «Моделей сезона» обратилась к строгому советскому неоклассицизму. Функциональный крой и простые силуэты должны были позволить наладить, наконец, массовое производство одежды и вывести моду из элитарного в массовое пространство.

В начале 50-х годов началась активная работа по созданию отечественных модных коллекций. Появлялось все больше и больше ярких и талантливых дизайнеров, уникальных специалистов (В. Аралова, Т. Осмеркина, Г. Гагарина, А. Игманд, С. Кочарава, Т. Мокеева, И. Крутикова, Е. Иванова, Е. Стерлигова и Е. Телегина).

С оттепелью 60-х годов увеличилось число изданий, посвященных теме моды, шитья, рукоделия. Как и в XIX веке, выходили приложения с выкройками и чертежами к женским журналам.

В 70-80-е годы появились самостоятельные издания ГУМа – «Моделей ГУМа», альбомы сезонной одежды. В последующие годы стала возможной интеграция европейских модных тенденций посредством западных журналов, издаваемых на русском языке («Burda», «Harpers bazaar», «Vogue» и др.).

Советские журналы мод просуществовали практически неизменно вплоть до конца 1986 г. В 1987 г. появляется первый в Советском Союзе иностранный журнал Burda. Реорганизованный «Журнал Мод» был первым советским глянцем, который мог конкурировать с западными изданиями. Тираж журнала увеличился до небывалых полутора миллиона экземпляров на номер. Блестящий период в истории «Журнала мод» закончился в 1991 г.

Во второй половине 90-х российский рынок стали осваивать более уважаемые издания. В 1996 г. открылись русские версии «Elle» и «Harpers bazaar». В 1998 г. на фоне дефолта и кризиса открылась российская версия «Vogue».

Как и в начале XX в., ценным практическим пособием для профессионалов стал новый специализированный журнал «Ателье», изданный издательским домом «Конлига Медиа» в январе 2001 г. Журнал имел эксклюзивную лицензию на распространение на территории России и стран СНГ материалов по немецкой системе кроя «М. Мюллер и сын» из журнала Rundschau [2] и был популярен как у профессионалов индустрии моды, так и любителей шитья. Большое внимание журнал уделял истории моды и кроя, системе профессионального образования, современным и перспективным тенденциям моды, ярким личностям ее создателей, швейной технологии, особенностям создания одежды из трикотажа, конкурсам молодых дизайнеров, публиковал на своих страницах мастер-классы по изготовлению швейных изделий и аксессуаров, служил площадкой для общения всех, кто вовлечен в процесс создания высококачественной, соответствующей мировым тенденциям одежды.

В разные годы журнал возглавляли главные редакторы – Элеонора Иванова, Александр Хилькевич. Более десяти лет главным редактором журнала «Ателье» была Светлана Костенко.

В 10-летний юбилей подарком для читателей стал выход электронной версии «Ателье» вместе с бумажной.

В конце 2019 г. закончилась история бумажной версии журнала «Ателье», а с 2020 г. начался новый этап электронной подачи информации. Сайт журнала продолжает традиции единственного прикладного журнала для профессионалов швейного дела [2].

## ВЫВОДЫ

Стильно одеваться всегда было, есть и остается главной страстью всех женщин и многих мужчин. Одежда – это самовыражение, демонстрация своей индивидуальности, возможность показать, что ты не такой, как все. Журналы мод – периодические издания, содержащие статьи и произведения разных авторов [11, с. 191], иллюстрации о моде подсказывают модникам и модницам, как угнаться за убегающим временем, меняющим фасоны платьев, шляпок, манеры обывателей...

Модные издания во все времена помогали миллионам людей освоиться с новой модой, потому что она существует не только для подиумов и фотосессий, а прежде всего для человека. Мода «вертится» вокруг человека, ее ориентир – фигура человека [4, с. 10].

Капризная мода, непостоянная, недолговечная и бессмертная одновременно, по-прежнему управляет многими сферами нашей жизни и в XXI веке. Из истории видно, насколько живуча идея модных журналов, благополучно существующих и в наши дни независимо от формата подачи информации.

История российской индустрии модных изданий XVIII в. – начала XXI в. показала, что некоторые журналы тотчас же исчезали, другие меняли свое лицо, третьи укрепляли свои позиции, формируя и развивая родившийся тип издания. Российские журналы мод описали функциональную многогранность повседневной жизни, осмыслили механизм моды воздействия на общество и личность. Выступая средствами репрезентации моды, журналы мод создали коммуникативную систему, включающую способы и формы накопления, фиксации, трансляции и распространения культурного фонда моды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ателье*. 1923. № 1. 56с. – [https://lamanova.com/16\\_atelier.html](https://lamanova.com/16_atelier.html) (дата обращения: 01.08.2023).

2. *Atelier Magazine*. – <https://Atelier-magazine.ru> (дата обращения 09.08.2023).

3. *Белов С.В.* Издательство Г.Д. Гоппе: Книга. Исследования и материалы. Москва: Книга. 1986. Вып. LIII.С. 52...69.

4. *Горина Г.С.* Моделирование формы одежды. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1982. 184с.

5. *Журнал Ателье*. – [https://lamanova.com/16\\_atelier.html](https://lamanova.com/16_atelier.html) (дата обращения 10.08.2023).

6. *Журнал для милых*. М., 1804 // Русская периодическая печать (1702-1894). 1959. – <http://feb-web.ru/feb/periodic/pp0-abc/pp1/pp1-1112.htm> (дата обращения 07.09.2023).

7. *Ермилова Д.Ю.* История домов моды: учеб. пособие для СПО. 3-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2018. 443 с.

8. *Ильясов Т.* История журналов мод в России. Часть 1. От Петровской Ассамблеи до революции в Петрограде. – <https://materialitydotinfo.wordpress.com/2017/01/09/magazine-story/> (дата обращения: 07.09.2023).

9. *Каминская Н.М.* История костюма. 2-е изд., перераб. М.: Легпромбытиздат, 1986. 166 с.

10. *Недолгий век журнала «Ателье»*. – <https://www.rsl.ru/ru/all-news/nedolgij-vek-zhurnala-atelje> (дата обращения 10.08.2023).

11. *Ожегов С.И., Шведова Н.Ю.* Толковый словарь русского языка: 80000 слов и фразеологических выражений / Российская АН; Российский фонд культуры; 3-е изд., стереотипное. М.: АЗЪ, 1995. 928 с.

12. *Пармон Ф.М.* Композиция костюма: одежда, обувь, аксессуары. М.: Легпромбытиздат, 1997. 318 с.

13. *Стриженова Т.О.* Из истории советского костюма. М.: Советский художник, 1972. 112 с.

## REFERENCES

1. *Atelier*. 1923. № 1. 56p. – [https://lamanova.com/16\\_atelier.html](https://lamanova.com/16_atelier.html) (date of application 01.08.2023).

2. *Atelier Magazine*. – <https://Atelier-magazine.ru> (date of application 09.08.2023).

3. *Belov S.V.* G.D. Goppe Publishing House // Book. Research and materials. 1986. P. 52...69.

4. *Gorina G.S.* Moderation of the form of clothing. M.: Light and food industry, 1982. 184p.

5. *Atelier Magazine*. – [https://lamanova.com/16\\_atelier.html](https://lamanova.com/16_atelier.html) (date of application 10.08.2023).

6. *Magazine for cute*. M., 1804 // Russian Periodical Press (1702-1894). 1959. – <http://feb-web.ru/feb/periodic/pp0-abc/pp1/pp1-1112.htm> (date of application 07.09.2023).

7. *Ermilova D.YU.* The history of fashion houses: training manual for SPO. M.: Yurayt Publishing House, 2018. 443 p.

8. *Ilyasov T.* The history of fashion magazines in Russia. Part 1. From the Petrovsky Assembly to the rev-

olution in Petrograd. – <https://materialitydotinfo.wordpress.com/2017/01/09/magazine-story/>(date of application 07.09.2023).

9. *Kaminskaya N.M.* The history of the costume. 2nd edition, revised. M.: Legprombytizdat, 1986. 166 p.

10. *The short century of the Atelier magazine.* – <https://www.rsl.ru/ru/all-news/nedolgiy-vek-zhurnala-atelje>(date of application 10.08.2023).

11. *Ozhegov S.I., Shvedova N.Yu.* Explanatory dictionary of the Russian language: 80000 words and phrasological expressions / Russian Academy of Sciences;

The Russian Cultural Foundation; 3rd publication, stereotype. M.: AZ, 1995. 928 p.

12. *Parmon F.M.* The composition of the costume: clothing, shoes, accessories. M.: Legpromizdat, 1997. 318 p.

13. *Strizhenova T.O.* From the history of Soviet costume. M.: Soviet Artist, 1972. 112 p.

Рекомендована отделением дизайна и сферы услуг Старооскольского техникума технологий и дизайна. Поступила 27.09.23.

---

СОДЕРЖАНИЕ

Обзорные статьи

<i>Курданова Ж.И., Шахмурзова К.Т., Жанситов А.А., Фомичева И.Н., Хаширова С.Ю.</i> Полиэфиркетонкетон и композиты на его основе (обзор) .....	5
<i>Сашина Е.С., Михайловская А.П., Бакаева М.А., Кулешова А.Ю.</i> Термохромные полимеры, волокна и материалы: получение и свойства .....	19

Экономика, управление и организация производства

<i>Мамедова Х.Ф., Мамедов Ф.А., Таштулатов С.Ш.</i> Структурные преобразования в системе приоритетов региональной политики Азербайджана .....	30
<i>Бабаханова Х.А., Саодатов А.А., Хасанова М.Э., Камалова С.Р.</i> Оценка качества продукции экспертным методом .....	38

Материаловедение

<i>Орлов А.В., Пашин Е.Л.</i> Определение изгибной жесткости льняного волокна при его прогибе .....	45
<i>Леденева И.Н.</i> Анализ и эмпирические модели результатов полуцикловых экспериментов с войлоками для верха обуви .....	51
<i>Шустов Ю.С., Курденкова А.В., Буланов Я.И., Орлов А.В.</i> Сравнительная оценка дублированных нетканых материалов .....	56
<i>Климова Н.С.</i> Качественная оценка эксплуатационных свойств полимерных нитей на стадии их проектирования и организации производства .....	62
<i>Винокурова Т.И., Ленкова К.А., Жаворонок Е.С., Легонькова О.А., Сенчихин И.Н., Завитаева А.А., Кедик С.А.</i> Влияние условий ускоренного старения на стабильность хирургических шовных материалов из сополимера гликолида и лактида .....	67
<i>Раева А.Ю., Матвеев Д.Н., Жанситов А.А., Хаширова С.Ю., Борисов И.Л.</i> Свойства ультрафильтрационных полволоконных мембран, полученных сухо-мокрым способом формования, на основе нового полифениленсульфона .....	74
<i>Гайнутдинов Р.Ф., Хамматова В.В.</i> Обеспечение требуемого уровня качества спецодежды из наномодифицированных тканей .....	80

Первичная обработка. Прядение

<i>Калдыбаев Р.Т., Калдыбаева Г.Ю., Дайрабай Д.Д., Кобеева Н., Каюмова У.Р., Бектаев К.</i> Определение оптимальных планов очистки хлопка-сырца и волокна в зависимости от засоренности исходного сырья .....	87
<i>Белюсов С.И., Соколов М.А., Тенчурин Т.Х., Чвалун С.Н.</i> Получение методом электроформования карбидкремниевое волокнистое материала из поликарбосиланов .....	94

Технология текстильных изделий

<i>Холбоев Э.Б., Ханхаджаева Н.Р.</i> Исследование свойств трикотажа сложных структур .....	101
<i>Комолидинова Ф.М., Абдурахимова М.М., Ханхаджаева Н.Р.</i> Параметры и свойства трикотажа для компрессионных чулочно-носочных изделий .....	107

## **Химия и технология отделки и модификации**

<i>Дащенко Н.В., Киселев А.М., Одинцова О.И., Румянцева В.Е., Румянцев Е.В.</i> Оценка фотокаталитической активности интерференционных пигментов и эффекта самоочистения текстильных материалов .....	117
<i>Быков Ф.А., Владимирцева Е.Л., Овчинников Н.Л., Бутман М.Ф., Одинцова О.И.</i> Модификация волокнистых материалов для повышения их сорбционной активности .....	123
<i>Осовская И.И., Баранова А.Е.</i> Растворы агара для улучшения качества упаковочных бумажных материалов, текстильных и кожаных изделий .....	129
<i>Кудрявцева Е.В., Буринская А.А., Ильина П.А., Аким Э.Л., Таразанов А.А.</i> Модификация натуральных текстильных материалов биметаллическими наночастицами и их практическое применение .....	132

## **Швейное производство**

<i>Москвин А.Ю., Москвина М.А., Кузьмичев В.Е.</i> Формообразование цифровых двойников малообъемной одежды .....	138
<i>Метелева О.В., Румянцев Е.В., Бузник В.М.</i> Проектирование комбинированных технологий швейного производства .....	147
<i>Алеева С.В., Радченко О.В., Кокиаров С.А., Солодушенкова Т.С., Зобнина Е.В.</i> Применение ферментативного мягчения в производстве льняных изделий платьево-блузочного ассортимента .....	155

## **Текстильные машины и агрегаты**

<i>Хосровян И.Г., Родионов С.А., Хосровян А.Г., Мкртумян А.С., Хосровян Г.А.</i> Теоретические исследования процесса удаления сорных частиц в изогнутой части трубопровода оборудования для сортировки волокон .....	164
<i>Бахадиров Г.А., Набиев А.М., Рахимов Ф.Р., Мусиров М.У.</i> Определение параметров цепного транспортирующего устройства валковой машины .....	167

## **Автоматизация и информационные технологии**

<i>Тюрин И.Н., Зуфарова З.У., Ташпулатов С.Ш., Гетманцев В.В., Андреева Е.Г., Кузьмин А.Г., Фирсов А.В.</i> Вычислительное моделирование и анализ изображений компрессионных свойств неопрена гетерогенной структуры .....	175
--	-----

## **Экологическая и производственная безопасность. Промтеплоэнергетика**

<i>Щепочкина Ю.А.</i> Возможности применения текстильных отходов в производстве строительных материалов и изделий .....	184
---	-----

## **Техническая эстетика и дизайн**

<i>Морозова Е.В.</i> Мотив розы в русских печатных тканях. Краткий исторический обзор .....	192
<i>Кудабаева А.К., Шенцова А.О., Мирали С.А., Калиев А.М.</i> Исследование особенностей техники «нунофелтинг» с целью создания уникальных моделей изделий в этностиле .....	197
<i>Каюмова Р.Ф., Лопатина Д.А., Иванова А.А.</i> Костюмы для тематических фотосессий с элементами цифровизации .....	203

## Композиты на волокнистой основе

<i>Обверткин И.В., Пасечник К.А., Воронина С.Ю.</i> Прогнозирование релаксации напряжений волокнистого композиционного материала на основе данных динамического анализа .....	209
<i>Кожевникова О.В., Дедов А.В., Бокова Е.С., Статник Е.С.</i> Анализ влияния капиллярно-пористой структуры на проницаемость гибких полировальных материалов .....	216
<i>Виндижева А.С., Хаширов А.А., Хараева З.Ф., Долбин И.В., Хаширова С.Ю.</i> Полимерные композиционные материалы, используемые в челюстно-лицевой имплантологии и протезировании .....	223
<i>Зарецкая Г.П., Базаев Е.М., Руднева Т.В., Тошматова С.Д., Белоглазов А.П.</i> Исследование влияния выборочной прошивки на прочностные свойства композита с гибридным текстильным наполнителем .....	230

## Передовые производственные технологии

<i>Смирнов Е.Е., Костылева В.В., Муртазина А.Р., Разин И.Б.</i> Сравнение сверточных и полносвязных нейронных сетей применительно к задачам распознавания изображений .....	236
---	-----

## Обмен опытом, критика и библиография, краткие сообщения

<i>Щеглова Т.М., Ноздрачева Т.М., Диева О.Н.</i> История журналов мод в России. Успех журнала «Ателье» (к 100-летию выпуска журнала «Ателье») .....	243
---	-----

## CONTENTS

### Review articles

<i>Kurdanova Zh.I., Shakhmurzova K.T., Zhansitov A.A., Fomicheva I.N., Khashirova S.Yu.</i> Polyetherketoneketone and Composites Based on It (Review) .....	5
<i>Sashina E.S., Mikhailovskaya A.P., Bakaeva M.A., Kuleshova A.Yu.</i> Thermochromic Polymers, Fibers and Materials: Production and Properties .....	19

### Economics and Production Planning

<i>Mamedova H.F., Mamedov F.A., Tashpulatov S.Sh.</i> Structural Transformations in the System of Regional Policy Priorities Azerbaijan .....	30
<i>Babakhanova Kh.A., Saodatov A.A., Hasanova M.E., Kamalova S.R.</i> Product Quality Assessment by Expert Method .....	38

### Materials

<i>Orlov A.V., Pashin E.L.</i> Determining the Bending Stiffness of Flax Fiber in Its Deflection .....	45
<i>Ledeneva I.N.</i> Analysis and Empirical Models of the Results of Semi-Cycle Experiments with Felts for Shoes Uppers .....	51
<i>Shustov Yu.S., Kurdenkova A.V., Bulanov Ya.I., Orlov A.V.</i> Comparative Evaluation of Duplicated Nonwoven Materials .....	56
<i>Klimova N.S.</i> Qualitative Assessment of the Operational Properties of Polymer Threads at the Stage of their Design and Production Organization .....	62

<i>Vinokurova T.I., Lenkova K.A., Zhavoronok E.S., Legonkova O.A., Senchikhin I.N., Zavitaeva A.A., Kedik S.A.</i> Influence of Accelerated Aging Conditions on Stability of Surgical Suture Materials from a Glycolide-Lactide Copolymer .....	67
<i>Raeva A.Y., Matveev D.N., Zhansitov A.A., Khashirova S.Y., Borisov I.L.</i> Properties Of Ultrafiltration Hollow Fiber Membranes, Obtained by Dry-Jet Wet Spinning Process, Based on a New Polyphenylene Sulfone .....	74
<i>Gainutdinov R.F., Khammatova V.V.</i> Ensuring the Required Quality Level of Workwear Made of Nano-modified Fabrics .....	80

### **Preliminary Treatment. Spinning**

<i>Kaldybaev R.T., Kaldybaeva G.Yu., Dairabay D.D., Kobeeva N., Kayumova U.R., Bektaev K.</i> Determination of Optimal Plans for Raw Cotton and Fibre Cleaning Depending on the Contamination of the Initial Raw Material .....	87
<i>Belousov S.I., Sokolov M.A., Tenchurin T.Kh., Chvalun S.N.</i> Production of Silicon Carbide Fiber Material from Polycarbosilanes by Electroforming .....	94

### **Technology of Textile Products**

<i>Kholboyev E.B., Khankhadjaeva N.R.</i> Investigation of Properties of Complex Knitting Structures .....	101
<i>Komolidinova F.M., Abdurakhimova M.M., Khankhadjaeva N.R.</i> Parameters and Properties of Knitwear for Compression Hosiery Products .....	107

### **Chemistry and Technology of Finishing and Modification**

<i>Dashchenko N.V., Kiselev A.M., Odintsova O.I., Rumyantseva V.E., Rumyantsev E.V.</i> Assessment of Photocatalytic Activity of Interference Pigments and Self-Cleaning Effect of Textile Materials .....	117
<i>Bykov F.A., Vladimirtseva E.L., Ovchinnikov N.L., Butman M.F., Odintsova O.I.</i> Modification of Fibrous Materials to Increase their Sorption Activity .....	123
<i>Osovskaya I.I., Baranova A.E.</i> Agar Solutions for Improving the Quality of Packaging Paper Materials, Textiles and Leather Products .....	129
<i>Kudriavtseva E.V., Burinskaya A.A., Ilyina P.A., Akim E.L., Tarazano A.A.</i> Modification of Nature Textile Materials with Bimetallic Nanoparticles and their Practical Application .....	132

### **Sewing**

<i>Moskvin A.Yu., Moskvina M.A., Kuzmichev V.E.</i> Shaping Digital Twins of Tight-Fitting Clothes .....	138
<i>Meteleva O.V., Rumyantsev Ye.V., Buznik V.M.</i> Design of Combined Sewing Technologies .....	147
<i>Aleeva S.V., Radchenko O.V., Koksharov S.A., Solodushenkova T.S., Zobnina E.V.</i> The Use of Enzymatic Softening in the Production of Linen Dresses and Blouses .....	155

### **Textile Machines and Aggregates**

<i>Khosrovyan I.G., Rodionov S.A., Khosrovyan A.G., Mkrtumyan A.S., Khosrovyan G.A.</i> Theoretical Studies of the Process of Removing Adventitious Impurities in the Curved Part of the Pipeline of Fiber Sorting Equipment .....	164
<i>Bahadirov G.A., Nabiev A.M., Rakhimov F.R., Musirov M.U.</i> Determination of the Parameters of the Chain Conveying Device of the Roller Machine .....	167

## Automation and Information Technologies

- Tyurin I.N., Zufarova Z.U., Tashpulatov S.Sh., Getmantseva V.V., Andreeva E.G., Kuzmin A.G., Firsov A.V.* Numerical Simulation and Image Analysis of Compression Properties of Heterogeneous Neoprene Material ..... 175

## Ecological and Industrial Safety. Heat Engineering

- Shchepochkina Yu.A.* The Possibilities of Using Textile Waste in the Production of Building Materials and Products ..... 184

## Technical Aesthetics and Design

- Morozova E.V.* The Rose Motif in Russian Printed Fabrics. Brief Historical Overview ..... 192
- Kudabayeva A.K., Shentsova A.O., Mirali S.A., Kaliyev A.M.* The Investigation of the "Nunofelting" Features Technique to Create Unique Models in Ethnic Style ..... 197
- Kayumova R.F., Lopatina D.A., Ivanova A.A.* Costums for Thematic Photo Shoots with Elements of Digitalization ..... 203

## Fiber-based Composites

- Obvertkin I.V., Pasechnik K.A., Voronina S.Yu.* Prediction of Stress Relaxation Fibrous Composite Material Based on Dynamic Analysis Data ..... 209
- Kozhevnikova O.V., Dedov A.V., Bokova E.S., Statnik E.S.* Analysis of the Effect of a Capillary-Porous Structure on the Permeability of Flexible Polishing Materials ..... 216
- Vindizheva A.S., Khashirov A.A., Kharaeva Z.F., Dolbin I.V., Khashirova S.Yu.* Polymer Composite Materials Used in Maxillofacial Implantology and Prosthetics ..... 223
- Zaretskaya G.P., Bazaev E.M., Rudneva T.V., Toshmatova S.D., Beloglazov A.P.* Investigation of the Influence of Selective Stitching on Strength Properties of Composite with Hybrid Textile Filler ..... 230

## Advanced Manufacturing Technologies

- Smirnov E.E., Kostyleva V.V., Murtazina A.R., Razin I.B.* Comparison of Convolutional and Fully Connected Neural Networks in Relation To Image Recognition Tasks ..... 236

## Experience Exchange, Criticism and Bibliography. Short Items

- Shcheglova T.M., Nozdracheva T.M., Dieva O.N.* History of Fashion Magazines in Russia. The Success of "Atelier" Magazine (To the 100th Anniversary of the Issue of "Atelier" Magazine) ..... 243