

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ВОЛОКНИСТОЙ ОСНОВЕ: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ,
НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ**

**FIBER-BASED POLYMER COMPOSITE MATERIALS: DEVELOPMENT TRENDS,
CHARACTERISTICS, SCIENTIFIC DIRECTIONS AND TECHNOLOGIES**

*Е.В. РУМЯНЦЕВ, С.Г. СТЕПАНОВ, М.В. КИСЕЛЕВ,
А.Ю. МАТРОХИН, Ю.М. ТРЕЦАЛИН*

*E.V. RUMYANTSEV, S.G. STEPANOV, M.V. KISELEV,
A.YU. MATROKHIN, YU.M. TRECSHALIN*

**(Ивановский государственный политехнический университет,
ООО НПО «Программируемые композиты»,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова)**

**(Ivanovo State Polytechnical University,
NPO Programmable Composites LLC,
Lomonosov Moscow State University)**

E-mail: rector@ivgpu.com

Статья посвящена анализу преимуществ полимерных композиционных материалов и обзору развития рынков их применения. Показано, что современной тенденцией развития техники и технологий производства конструкционных материалов является замена металлических изделий на композиционные. Выполнен анализ преимуществ композиционных материалов, изготавливаемых на основе армирующих текстильных тканей, нитей и волокон. На основе анализа рынков производства композиционных материалов сделан вывод об их стабильном росте, особенно для предприятий Китая. Приведены примеры применения композиционных материалов из наиболее наукоемких отраслей промышленности, таких как авиационная, космическая, оборонная. Описаны современные направления развития систем виртуального проектирования композиционных материалов и построения их цифровых двойников. Приведены примеры моделирования отдельных этапов изготовления композиционных материалов с применением текстильных технологий.

The article is devoted both to the analysis of polymer composite materials advantages and to a review of the development of markets for their use. It is shown that the current trend in the development of engineering and technologies for the production of structural materials is the replacement of metal products with composite ones. The advantages of composite materials made on the basis of reinforcing textile fabrics, threads and fibers are analyzed. Based on the analysis of the composite materials production markets, it is concluded that they are growing steadily, especially for Chinese enterprises. Examples of the use of composite materials from the most high-tech industries such as aviation, space, defense are given. Modern trends in the development of systems for the virtual design of composite materials and the construction of their digital counterparts are described. Examples of modeling of individual stages of manufacturing composite materials using textile technologies are given.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, свойства, характеристики, анализ перспектив и направлений развития рынка, инновационные технологии, наука о композитах.

Keywords: polymer composite materials, properties, characteristics, analysis of prospects and directions of market development, innovative technologies, science of composites.

В настоящее время отрасли науки и производства, связанные с разработкой композиционных материалов (КМ), развиваются наиболее динамично, и в ближайшее время номенклатура этих материалов будет стремительно расширяться. Будущее именно за КМ, которые будут только совершенствоваться и все больше «выдавливаться» традиционные конструкционные материалы. Это объясняется тем, что КМ обладают комплексом свойств и особенностей, отличающихся от традиционных конструкционных материалов и в совокупности открывающих широкие возможности как для совершенствования существующих конструкций самого разнообразного направления, так и для разработки новых конструкций и технологических процессов. Свойства КМ зависят, в первую очередь, от свойств исходных компонентов: наполнителя и матрицы. Их рациональное сочетание позволяет получать эффективные конструкции с высокой степенью совершенства и заданной анизотропией физико-механических характеристик материала. Кроме того, их соединение дает синергетический эффект, связанный с появлением у композиции свойств, не характерных для изолированных исходных компонентов.

Особое место среди разнообразных видов КМ занимают композиты на волокнистой основе, армирующими наполнителями которых выступают моноволокна, нити, жгуты, сетки, ткани, ленты, холсты, нетканые материалы и др., а в качестве матриц используются полимерные и другие связующие материалы. Такие композиты выгодно отличаются от традиционных конструкционных материалов высокими прочностью, коррозионной стойкостью, сопротивляемостью усталостному и ударному разрушению, малым удельным весом. Поэтому они нашли применение прежде всего

в авиакосмической, оборонной, автомобильной, судостроительной и многих других отраслях. КМ с армирующими наполнителями из высокопрочных текстильных нитей широко используются в современных моделях самолетов. Самолеты фирм "Боинг" и "Аэробус" состоят до 60% из композитов, что резко снижает их вес и, как следствие этого, стоимость перевозки одного пассажира. Как альтернатива ведущим авиационным зарубежным фирмам в РФ создан авиалайнер МС-21, который на 80 % состоит из композитов на основе углеродных тканей.

Оценка перспективности развития любого промышленного производства, инновационного проекта или стратегического направления тесно связана с анализом рынков потребления продукции. Рассмотрим самый многочисленный и бурно развивающийся вид КМ с полимерной матрицей (ПКМ – полимерный композиционный материал).

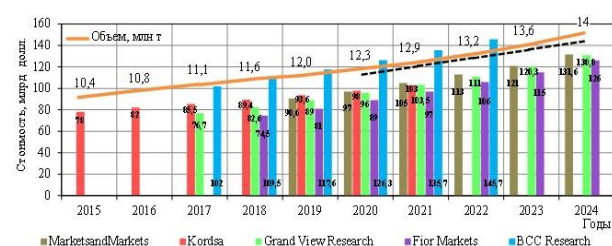


Рис. 1

По мнению большинства консалтинговых компаний, таких как MarketandMarkets, Kordsa, Grand View Research, наблюдается непрерывный рост мирового рынка ПКМ. Его объем, по разным оценкам, составил в 2019 г. от 90,6 до 93,6 млрд. долларов (рис. 1 – оценка мирового рынка полимерных композиционных материалов) и приблизительно 12,0 млн. т в натуральном выраже-

нии. Совокупный среднегодовой темп роста прогнозируется в диапазоне от 4 до 7,7%, что до 2024 г. должно обеспечить объем рынка на уровне 103...131,6 млрд. долл. и 13...14 млн. т в натуральном выражении [1].

Интересным представляется практическая возможность внедрения ПКМ в различные отрасли экономики. На рис. 2 представлены структура и объем потребления ПКМ и изделий из них по секторам экономики в 2020 г. [2]. Мировое потребление ПКМ – приблизительно 130 млн. т.

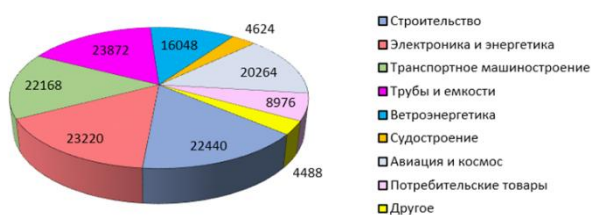


Рис. 2

КМ в зависимости от их функционального назначения могут производиться с армированием различными по составу текстильными нитями и волокнами. Например, для экологически чистых и биоразлагаемых композитов могут использоваться нити из натурального сырья – лен, конопля, хлопок и другие. Однако для технических целей в большинстве случаев применяются химические высокопрочные стеклянные, базальтовые, борные, кремниевые, арамидные и др. нити и волокна. Среди высокопрочных химических нитей особое место занимают углеродные волокна (УВ) и нити. Вследствие высоких механических свойств данных волокон, их низкой удельной объемной плотности и гидрофильности УВ являются перспективными для использования, в том числе с точки зрения замены металлических изделий. Наиболее характерно применение УВ в авиационной и космической отраслях, где альтернативы их свойствам найти практически невозможно.

На рис. 3 приведены данные по проектным мощностям компаний-производителей УВ в мире (сентябрь 2019 г.), тыс. т.

Мощность ведущих мировых производителей УВ составляет около 150,9 тыс. тонн. В краткосрочной перспективе ожида-

ется увеличение производства УВ на 14,6 тыс. т (+ 9,7 %). В среднесрочной и долгосрочной перспективе уже объявлено о дополнительных 44,1 тыс. т в год (+ 29,2 % по сравнению с 2019 г.).

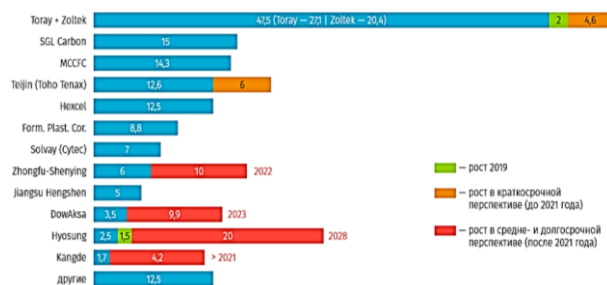


Рис. 3

Рынок потребления УВ по отраслям промышленности приведен на рис. 4.

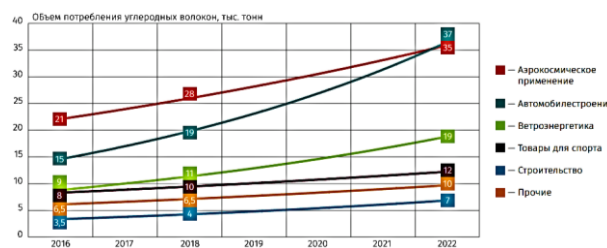


Рис. 4

Предполагается, что к 2022 г. в автомобилестроении будет потребляться не менее 37 тыс. т УВ, что превысит потребление в авиационной промышленности.

В связи с активным применением зеленых технологий ожидается резкий подъем потребления УВ для ветроэнергетики – около 19 тыс. тонн. В последнее время активно развивается применение УВ в медицинской отрасли.

Мировой рынок УВ и композиционных материалов на его основе демонстрирует стабильный рост – 10...12% в год. Положительные прогнозы подтверждаются сильными рыночными и инновационными индикаторами: крупными инвестициями производителей УВ в расширение производства; сотрудничеством производителей УВ с поставщиками технологий УВ по их совершенствованию, развитию уровня технологических ноу-хау производства УВ; применением инновационных материалов в различных отраслях промышленности; раз-

витиём зеленых и энергосберегающих технологий, ростом производства электромобилей, снижением выбросов CO₂ и др.

Особый интерес представляет азиатский регион, в частности Китай, где расширение мощностей производства УВ китайскими компаниями Zhongfu-Shenyang и Kandge Group может существенно увеличить долю Китая на мировом рынке производства УВ.

Таким образом, рынок КМ на основе УВ имеет тенденцию к значительному росту в ближайшей и среднесрочной перспективе, основанному на многочисленных сильных импульсах. Такая тенденция обусловлена не только стабильным ростом потребления УВ в традиционных областях его применения, но и множеством инновационных применений и технологий изготовления новых видов КМ, которые только начинают выходить на рынок.

Рост рынка КМ обусловлен не только инвестициями производителей в расширение производства, но и созданием новых наукоемких оборудования и технологий для производства КМ.

Учитывая современные тенденции мирового технологического развития, наиболее высокими темпами должна развиваться наука, которая является основой для ускорения темпов развития новой техники, в свою очередь создающей научно-технологическую базу для дальнейшего развития производства. Между этими тремя компонентами существуют и обратные связи: каждый из них взаимодействует друг с другом и обуславливает их развитие.

Разработка новых КМ и производство изделий из них тесно связаны с процессом их виртуального проектирования и создания цифрового двойника изделия. Актуальность данной задачи связана с классическими преимуществами применения математического моделирования по сравнению с экспериментальными методами подбора армирующей структуры столь сложного объекта, как КМ. Построение цифровых двойников изделия может стать обязательной частью процесса сертификации продукции или производства. Показательно, что именно в России впервые в мировой

практике утверждён национальный стандарт [3], устанавливающий соответствующее единое определение "цифрового двойника изделия" и сфокусированный на создании изделий с помощью технологии цифровых двойников [4]. В данном направлении практически все ведущие производители программного обеспечения, такие как ANSYS, ESI Group, MSC Software, eXstream Engineering, Siemens и др. разрабатывают ПО, виртуально моделирующие все технологические процессы производства КМ. Одна из таких цепочек виртуального проектирования и изготовления композиционного изделия от фирмы ESI Group представлена на рис. 5.



Рис. 5

Проектирование и создание цифровой модели изделия начинается с построения CAD-модели (модели автоматизированного проектирования) армирующей структуры композита. Для армирования композиционных изделий применяются различные технологии получения структуры армирующего каркаса. Для армирования непрерывными нитями наибольшее распространение получили текстильные технологии намотки, плетения, однослойного ткачества для слоистых композитов и специализированные технологии 3D ткачества для получения композитов с повышенными механическими свойствами (рис. 6 – армирование композита методом намотки (ESI Group); рис. 7 – армирование композита методом плетения (ESI Group); рис. 8 – идеализированная модель структуры 3D-ткани от TechGen).



Рис. 6

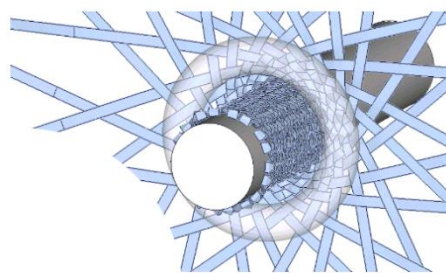


Рис. 7

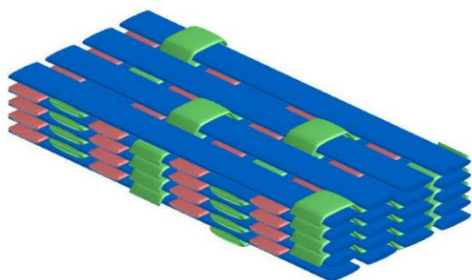
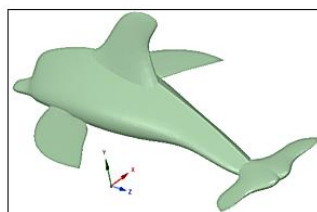
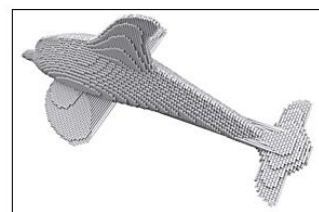


Рис. 8



Заданная деталь сложной пространственной конфигурации



Построенная модель объемной преформы сложной пространственной конфигурации в ПО "Преформа"

Рис. 9

Особое внимание уделяется армированию композитов по 3D-технологии ткачества, поскольку данные композиты имеют высокие механические свойства по всем направлениям осей координат, хорошо выдерживают знакопеременные и ударные нагрузки, не склонны к расслоению. Для создания CAD-моделей 3D-тканей используется специализированное ПО ведущих мировых фирм-производителей WeaveStudio (EAT), ScotCAD Textiles Ltd, ScotWeave Design Software, WiseTex (S.Lomov), ESI GROUP (Франция) и др. Разработанное ПО моделирует структуру 3D-ткани только в объеме параллелепипеда для "представительского объема" материала с одной структурой раппорта ткани. В направлении проектирования геометрической CAD-модели 3D-тканей перспективным представляется ПО "Преформа" [5], [6]. Основными преимуществами данного ПО является возможность построения структуры 3D-ткани в преформе для всего заданного изделия, а не только для "представительского объема" материала, что существенно важно для решения практических задач производства. ПО "Преформа" является единственным программным обеспечением, которое дает одновременно и высокоточную CAD-модель структуры преформы изделия и авто-

матически формирует САМ модуль для его изготовления на станке. На рис. 9 демонстрируется возможность построения преформы с применением технологий 3D-ткачества для заданного изделия со сложной объемной конфигурацией [6].

Одним из стратегических направлений развития Ивановского государственного политехнического университета является развитие теории, методов расчета, проектирования изделий из КМ, разработка инновационных технологий их производства, которые основываются, в том числе и на существующих собственных научных школах и результатах [7...14]. Труды молодых ученых университета в соавторстве с ведущими учеными страны [15...18] также посвящены разработке системно-аналитических подходов к проектированию и прогнозированию характеристик КМ, в том числе: разработке математических моделей для анализа кинетики самопроизвольного впитывания жидкости волокнисто-пористыми средами; обоснованию наиболее информативных параметров для численной оценки взаимосвязи структуры материалов волокнистой матрицы и физических особенностей процесса течения жидкости в поровом пространстве; исследованию адгезионного взаимодействия волокнистой основы с раз-

личными водостойкими клеящими веществами для создания эластичных гидроизоляционных композиционных материалов; прогнозированию физико-механических характеристик композиционных материалов на основе нетканых полотен.

Учитывая последнее, а также динамичное развитие отраслей науки, технологий и производства ПКМ, редакцией журнала "Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности" было принято решение о включении нового раздела "Композиты на волокнистой основе" в структуру журнала. Включение нового раздела в журнал – веление времени. Раздел должен включать оригинальные статьи по целому ряду вопросов по ПКМ: принципы создания, сведения о составе, структуре и свойствах основных видов армирующих волокон и матричных материалов различной природы, технологические процессы их совмещения и физико-механические свойства получаемых композитов, сведения об их эффективном использовании в современных конструкциях, вопросы структурной механики, механики разрушения, статических испытаний, адгезии между наполнителем и матрицей, расчета и проектирования конструкций из ПКМ и др.

Новый раздел органично впишется в структуру журнала, так как в качестве армирующих наполнителей в ПКМ выступают, как уже отмечалось выше, моноволокна, нити, жгуты, сетки, ткани, ленты, холсты, нетканые материалы и др., то есть текстильные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Электронный научный журнал "Труды ВИАМ". – 2020, №6.

2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://viam.ru/news/2108>. (дата обращения 22.05.2021).

3. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.

4. В России утвержден первый в мире стандарт в области цифровых двойников изделий / Официальный сайт Росстандарта. Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1/8339>. (дата обращения 04.10.2021)

5. Киселев А.М., Хамматова В.В., Голубев С.Е., Киселев М.В. Описание возможностей системы проектирования структуры цельнотканых 3D преформ "Преформа" // Дизайн. Материалы. Технология. – 2019, № 1(53). С.20...25.

6. Киселев А.М. Разработка методологии проектирования геометрических структур и прогнозирования свойств текстильных материалов объемного строения: Дис. ... докт. техн. наук. – Казань, КНИТУ, 2019.

7. Степанов Г.В. Создание и технология получения технических тканей для производства композиционных материалов: Дис. ... докт. техн. наук. – М.: МТИ им. А.Н. Косыгина, – М., 1990.

8. Моторин Л.В., Степанов О.С., Братолобова Е.В. Математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010, №8. С. 103...109.

9. Моторин Л.В., Степанов О.С., Братолобова Е.В. Упрощенная математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, № 1. С. 126...133.

10. Степанов О.С., Братолобова Е.В., Широков А.А. Исследование влияния различных факторов на прочность напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 4. С.105...108.

11. Степанов С.Г., Джаннаизова В.М., Мырхалыков Ж.У. и др. Математическая модель строения технических тканей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 4. С.79...83.

12. Степанов С.Г., Джаннаизова В.М., Мырхалыков Ж.У. и др. Расчет параметров строения технической ткани для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 6. С. 113...118.

13. Ershov S., Kalinin E., Kuznetsov V., Koksharov S. and Baranov A. Numerical model of the mass transfer transition states in the vacuum infusion process of the polymer matrix and the reinforcing filler structure // Key Engineering Materials. New Polymer Composite Materials II. – Vol. 869, 2020. P. 196...201.

14. Ершов С.В., Суворов И.А., Кузнецов В.Б., Никифорова Е.Н., Калинин Е.Н. Синтез 3d-модели тканой армирующей структуры текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 1. С. 114...119.

15. Трещалин Ю.М. Математическое моделирование процесса подъема жидкости в зависимости от пористости волокнистого материала. Ч. 1 // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2015, № 9–10 (200–201). С. 27...29.

16. Трещалин Ю.М., Хамматова Э.А. Оценка возможности применения аналитических моделей для описания кинетики впитывания жидкости неткаными материалами // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. Т.18, № 11. С.151...156.

17. Хамматова В.В., Трещалин Ю.М., Трещалин М.Ю., Киселев А.М. Разработка и создание ударопрочных многослойных композиционных материалов с использованием нетканых полотен и плетеных изделий // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. Т. 19, № 23. С. 68...73.

18. Советников Д.А., Мишаков В.Ю., Павлов М.А., Кирсанова Е.А., Трещалин Ю.М. Теоретическое исследование волокнистых материалов с целью расчета и прогнозирования теплофизических свойств // Дизайн и технологии. – 2017, № 57. С. 86...91.

REFERENCES

1. Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review) // Electronic scientific journal "Proceedings of VIAM". – 2020, No.6.

2. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow [Electronic resource] / Access mode: <https://viam.ru/news/2108> . (accessed 22.05.2021).

3. GOST R 57700.37–2021. Computer models and modeling. Digital doubles of the editions. General provisions.

4. The world's first standard in the field of digital product doubles has been approved in Russia / Official website of Rosstandart. Access mode: <https://www.rst.gov.ru/newsRST/redirect/news/1/8339> . (accessed 04.10.2021)

5. Kiselev A.M., Khammatova V.V., Golubev S.E., Kiselev M.V. Description of the capabilities of the system for designing the structure of solid-woven 3D preforms "Preform" // Design. Materials. Technology. – 2019, No. 1(53). P.20...25.

6. Kiselev A.M. Development of methodology for designing geometric structures and forecasting the properties of textile materials of volumetric structure: Dis. ... doct. technical sciences. – Kazan, KNITU, 2019.

7. Stepanov G.V. Creation and technology of production of technical fabrics for the production of composite materials: Dis. ... doct. Technical Sciences. – M.: MIT named after A.N. Kosygin, – M., 1990.

8. Motorin L.V., Stepanov O.S., Bratolyubova E.V. Mathematical model for strength calculation of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2010, No.8. P. 103...109.

9. Motorin L.V., Stepanov O.S., Bratolyubova E.V. Simplified mathematical model for strength calculation of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. -2011, No. 1. P. 126...133.

10. Stepanov O.S., Bratolyubova E.V., Shirokov A.A. Investigation of the influence of various factors on the strength of pressure fire hoses under hydraulic action // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2012, No. 4. P.105...108.

11. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrhal'ykov Zh.U. et al. Mathematical model of the structure of technical fabrics for the production of thermoplastic composite materials according to the reduced technology // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.. – 2020, No. 4. P.79...83.

12. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Myrhal'ykov Zh.U. et al. Calculation of the parameters of the structure of a technical fabric for the production of thermoplastic composite materials using abbreviated technology // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2020, No. 6. pp. 113...118.

13. Ershov S., Kalinin E., Kuznetsov V., Koksharov S. and Baranov A. Numerical model of the mass transfer transition states in the vacuum infusion process of the polymer matrix and the reinforcing filler structure // Key Engineering Materials. New Polymer Composite Materials II. – Vol. 869, 2020. P. 196...201.

14. Ershov S.V., Suvorov I.A., Kuznetsov V.B., Nikiforova E.N., Kalinin E.N. Synthesis of 3d-model of woven reinforcing structure of textile composite by means of methodology of numerical object-oriented modeling // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No. 1. P. 114...119.

15. Treshchalin Yu.M. Mathematical modeling of the process of liquid lifting depending on the porosity of fibrous material. Part 1 // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. – 2015, № 9-10 (200□201). P. 27...29.

16. Treshchalin Yu.M., Khammatova E.A. Evaluation of the possibility of using analytical models to describe the kinetics of liquid absorption by non-woven materials // Bulletin of Kazan Technological University. 2015. Vol.18, No. 11. P.151...156.

17. Khammatova V.V., Treshchalin Yu.M., Treshchalin M.Yu., Kiselev A.M. Development and creation of impact-resistant multilayer composite materials using nonwoven fabrics and plaited products // Bulletin of Kazan Technological University. – 2016. Vol. 19, No. 23. P. 68...73.

18. Sovetnikov D.A., Mishakov V.Yu., Pavlov M.A., Kirsanova E.A., Treshchalin Yu.M. Theoretical study of fibrous materials with the purpose of calculation and prediction of thermophysical properties // Design and technologies. – 2017, No. 57. P. 86...91.

Поступила 08.11.21.