

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ МЕЖНИТЕВОГО ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА АРМИРУЮЩЕЙ ТКАНИ

В работе поставлена цель создания простой и прозрачной модели структуры межнитевых пор, образованных переплетением плоских нитей. Для армирующей ткани саржевого (twill) переплетения построена модель профиля плоской нити, защемленной в местах перехода её с одной стороны поверхности ткани на другую, посредством сплайн-аппроксимации точек её защемления отрезками кубических полиномов. По результатам фотографирования увеличенного изображения структуры ткани построена объемная модель взаимного положения переплетающихся нитей в трех измерениях. Получена трехмерная модель элементарного объема межнитевого порового пространства ткани. Составлена схема алгоритма компьютерного моделирования межнитевого порового пространства ткани.

Ключевые слова: структура ткани, процесс пропитки, компьютерное моделирование, поровое пространство, композиционный материал.

V.V. SYS

Kherson National Technical University

CONSTRUCTION OF COMPUTER MODEL OF INTERFIBRILLARY PORE SPACE OF REINFORCING FABRIC

Abstract – Parameters of pore volume between fibres of the fabric determine a progress of impregnation by treatment solution in the chemical processes of the technology of textile materials and producing of composites. In the case of composites the impregnation of the reinforcing fabric with resin and hardener composition, given its viscosity, the process has particular difficulties. Despite the use of special vacuum technology in impregnated fabric structure may be air bubbles and excess amount of a viscous composition on the outer surface of the filaments, which have a negative effect on the properties of the composite material.

Inclusion of air bubbles lead to a heterogeneous structure, violate integrity and hence the strength of the composite material. An excess of the impregnating composition on the outside surfaces yarns leads to weighting products. Therefore, the task of further improving the impregnation process requires information about the shape and size of pores between fibres. The modern approach to this is to use a method of modelling the structure of the fabric. However, a major drawback of current systems is their opacity simulation for the user, eliminating the process control algorithms.

In this paper, the goal is to create a simple and transparent own model of structure of pores between fibres, formed by weave flat yarn. For reinforcing fabric with twill weave a model profile of flat yarn is created, clamped in places of transition it from one side to the other surface of the fabric by spline approximation of pinched points by segments of cubic polynomials. According to the results of photographing of large image of fabric structure the solid model the relative position of interwoven threads is built. Obtained three-dimensional model of an elementary volume of the pore space between fibres of fabric. The scheme of the algorithm simulation pore space between fibres of fabric is created.

Keywords: structure of fabric, process of impregnation, computer modelling, pore space, composite material.

Постановка проблемы

Процесс пропитки ткани обрабатываемым раствором лежит в основе практически всех технологических процессов химической технологии текстильных материалов и производства композиционных материалов.

Пропитка армирующей ткани составом смолы и отвердителя с учетом высокой степени вязкости пропитываемого состава является одним из наиболее сложно реализуемых процессов. Поэтому для пропитки армирующей ткани при изготовлении деталей из композитов в авиастроении применяют специальную вакуумную технологию, что обеспечивает относительно высокую степень полноты пропитки.

В ручном варианте этого способа выполняют следующие операции в последовательности: предварительная пропитка текстильного материала составом, перенос его в форму, раскатывание валиком по поверхности формы, прибивание кистью к поверхности формы, укладка слоя разделительной ткани, слоя пористого материала (мешковины), слоя изолирующей полимерной пленки, герметизация стыка полимерной пленки с наружной поверхностью формы, после чего к слою пористого материала подключают вакуумную систему, создают разрежение величиной не менее $0,8 \dots 1,0 \text{ кг/см}^2$ и оставляют на несколько часов для полимеризации. Одновременно из пропитываемой ткани удаляют излишек состава, который переходит в специальный слой из пористого материала, накладываемого на ткань, силой сдавливания слоев под действием вакуума.

Несмотря на высокую степень обработанности технологии пропитки армирующей ткани вязким составом в пропитываемой структуре ткани могут оставаться как пузырьки воздуха, так и некоторое избыточное количество вязкого состава. Неоднородности в виде включения пузырьков воздуха в структуре пропитываемой ткани нарушают монолитность композиционного материала и вызывают уменьшение его прочности. Излишек состава на поверхности пропитываемой ткани приводит к утяжелению детали, изготавливаемой из композиционного материала. Особенно негативно это проявляется в самолетостроении, так как приводит к ухудшению летных и технико-экономических показателей летательных аппаратов.

Конечно, это учитывается при конструировании изделия благодаря существующей системе допусков и коэффициентов запаса. Но, если ставить цель дальнейшего развития технологии, то для этого

необходимо исследовать возможные резервы уменьшения массы. Для этого в первую очередь требуется получить сведения о структуре пропитываемой ткани и характере распределения неоднородностей в её структуре.

Хотя получить необходимые сведения возможно чисто экспериментальным путем, автор использовал другой подход, который в настоящее время получил широкое распространение в мире. Он заключается в построении компьютерной модели по результатам предварительного исследования структуры ткани с последующим экспериментированием на модели.

В настоящее время существуют различные системы моделирования структуры текстильных материалов. Однако все они предназначены для коммерческого использования, и, следовательно, являются достаточно сложными и универсальными. Главным недостатком существующих систем моделирования является их непрозрачность для пользователя, что исключает контроль за процессом вычислений. Поэтому при работе с подобными системами функции пользователя сводятся к вводу исходных данных и получению результатов, правильность которых он контролировать не может.

Анализ последних публикаций

В аэрокосмической промышленности существует способ получения углерод-углеродных композитов, который заключается в инфильтрации химических паров в подогреваемую заготовку волокнистого материала с целью создания в поровом пространстве материала матрицы. Поскольку экспериментальное определение оптимальных параметров процесса является трудоемким и чрезвычайно затратным, авторы работы [1] предлагают подход, основанный на предварительном моделировании процесса, и показывают экономическую целесообразность этого за счет резкого сокращения объема экспериментальных исследований.

Указанный подход заключается в получении изображений внутренней структуры образца композиционного материала методом рентгеновской томографии с последующей компьютерной обработкой изображений. Это позволило вычислить геометрические и транспортные характеристики исследуемого композиционного материала. Так как в процессе получения композита происходит изменение его внутренней структуры, смысл моделирования заключается в предсказании эволюции пористой среды при инфильтрации. Недостатком такого подхода является то, что для его реализации требуется сложное и дорогостоящее оборудование.

Наиболее интересный подход к моделированию структуры текстильного полотна представлен в работах [2, 3]. Разработанная авторами среда моделирования текстильных полотен и композитов под названием *WiseTex* содержит модель внутреннего строения ткани в свободном и деформированном состоянии. В модели *WiseTex* внутреннее строение ткани задается высотами волн изгиба утка и размерами поперечных сечений нитей основы и утка. Значения этих величин изменяются в процессе деформирования. Результаты моделирования структуры ткани используют в качестве исходных данных для последующего расчета течения связующего через ткань при пропитке.

Исходными данными для моделирования являются: 1) линейная плотность нитей, их поперечное сечение в свободном состоянии; 2) топология переплетения; 3) плотность ткани (количество нитей на единицу длины/ширины). Результатом расчета геометрии нитей является форма средних линий и изменение размеров сечения вдоль нитей.

Авторы среды моделирования *WiseTex* исходят из того факта, что текстильные материалы обладают иерархией структуры [4]. Отметим, что еще ранее в работах [5] и [6] рассматривались трехуровневые структуры, предназначенные для крашения «пакетка – нить – волокно» и «ткань – нить – волокно» соответственно. Недостатком среды моделирования *WiseTex* является сложность построения иерархической модели, поскольку это требует участия квалифицированных специалистов различного профиля.

В работе [7] описан прототип информационно-телекоммуникационной платформы (ИТП) для проектирования новых полимерных композиционных материалов и структурного анализа изделий с учетом технологий их изготовления. ИТП представляет собой интегрирующую среду для обеспечения информационного обмена данными между различными системами проектирования и базами данных о свойствах материалов. В ИТП предусмотрено решение двух комплексов задач – комплекс проектирования нового композиционного материала на основе исходных компонентов и комплекса проектирования изделий на основе созданного композиционного материала.

При этом каждая из нескольких самостоятельных систем моделирования, входящих в платформу, по мере необходимости может заменяться другими, что дополнительно расширяет возможности платформы. Недостаток такого подхода является общим для всех крупномасштабных систем моделирования и заключается в сложности и непрозрачности для пользователя.

Цель работы

С учетом отмеченного выше, а также ввиду отсутствия необходимости в универсальности модели, в работе поставлена цель создания собственной простой и прозрачной модели. В этой модели главным является геометрический аспект структуры ткани, важный с точки зрения процесса её пропитки, а также учтена иерархическая структура «ткань – нить – волокно».

Работа посвящена построению модели армирующей ткани как результата переплетения плоских

нитей. Поставлены задачи определения формы и размеров межнитевого порового пространства, а также формы профиля нитей. Это является необходимой основой для последующей оценки характера распределения вязкого состава в межнитевом пространстве и на внешней поверхности нитей в процессе пропитки.

Основная часть

Поставим задачу построения математической модели ткани на уровне нити. Структура армирующей ткани образована саржевым (twill) переплетением плоских нитей. По результатам наблюдения увеличенного изображения структуры ткани построим объемную модель элемента межнитевого порового пространства.

Рассмотрим элементарное переплетение ткани (раппорт), которое содержит четыре основных нити и четыре нити утка, представленное на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что каждая уточная нить огибает две основные нити, находясь над ними, а затем переходит на другую сторону ткани, скрываясь за следующими двумя основными нитями и т.д. Между участками перехода, в которых происходит защемление гибкой упругой нити, она образует выпуклость. Это хорошо видно из рис. 2, на котором представлено увеличенное изображение участка поверхности готового композиционного материала.

Из рис. 2 видно, что нить, выходя на поверхность ткани, имеет отчетливо выпуклую форму. Если повернуть образец ткани на 90° , не изменяя условий освещения, то те отрезки нитей, которые первоначально были расположены горизонтально, также приобретают выпуклую форму, хотя до поворота выглядят плоскими. Такой же выпуклый вид имеют все выходящие на поверхность нити как с одной, так и с другой стороны ткани. Поэтому межнитевое пространство образовано внутренними поверхностями взаимноперпендикулярных выпуклых участков нитей, выходящих на поверхность ткани, которое в процессе пропитки заполняется вязким составом на основе смолы.

Положение переплетающихся взаимноперпендикулярных нитей, соответствующее раппорту ткани, показано на рис. 3. Отметим, что степень изгиба и направления нитей на рисунке несколько гиперболизирована, чтобы нагляднее показать характер изменения расстояния между двумя нитями, выходящими на нижнюю поверхность и нитью, которая огибает их сверху.

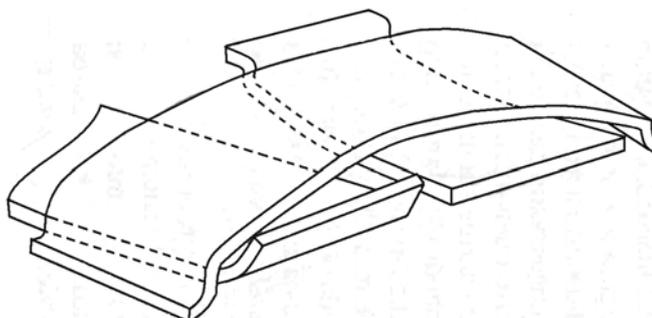


Рис. 3. Взаимное положение нитей в структуре ткани

Для выполнения задачи построения геометрической модели структуры ткани прежде всего необходимо определить форму профиля нити. При этом возможны два варианта действий, один из которых – задать форму изгиба произвольно, например, с использованием эллиптической или цепной линии, либо смоделировав её отрезком окружности. Однако такой способ не способен отразить реальные физические процессы, которые заставляют профиль нити принять ту или иную форму. Второй способ, который заключается в моделировании физического состояния нити, определяющего её форму, предпочтительнее, поскольку позволяет получить более реалистическую информацию о размерах межнитевых пор.

Отметим, что зависимость процесса пропитки от размера межнитевых пор вполне естественна, так как они выполняют транспортную функцию, и с уменьшением размера поры при неизменной вязкости пропитывающего состава возрастает гидродинамическое сопротивление его продвижению. Влияние формы поперечного сечения поры менее очевидно. Тем не менее, форма поперечного сечения поры оказывает не меньшее, а иногда и большее влияние на процесс продвижения состава в ходе пропитки, чем размер сечения

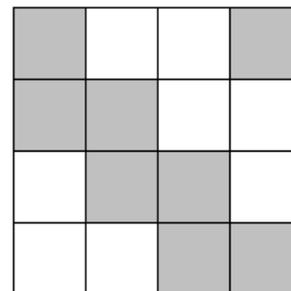


Рис. 1. Раппорт ткани усиленного саржевого (twill) переплетения 2/2

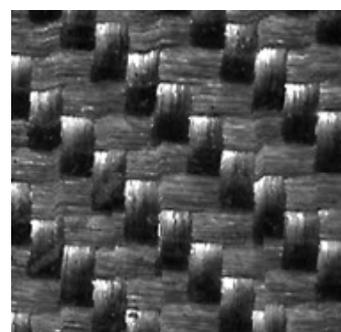


Рис. 2. Увеличенное фотографическое изображение поверхности композиционного материала

поры. Это обусловлено тем, что любое отклонение поперечного сечения поры от круглой формы при неизменной площади сечения приводит к относительному росту длины периметра сечения поры. Особенно велик периметр по сравнению с круглым сечением той же площади у пор щелевидной формы. Но с ростом периметра возрастает площадь контакта вязкого состава со стенками поры, что приводит к росту сил трения и затруднению продвижения состава через поровое пространство. Заметим, что интенсивность процесса пропитки лимитирует участок наименьшего сечения порового пространства или участок поры с наибольшей степенью щелевидности.

Таким образом, задача моделирования сводится к построению точной геометрической копии порового пространства текстильного материала, пропитываемого в ходе изготовления композиционного материала. На межнитевом уровне изменение размера пор обусловлено изменением взаимного положения поверхностей нитей, которые, переплетаясь между собой определенным образом, создают структуру внутреннего пространства ткани, как это было описано выше.

Рассмотрим взаимное положение переплетающихся плоских нитей более детально. Из рис. 2 видно, что уточную нить защемляют боковые поверхности основных нитей, между которыми она проходит с одной стороны ткани на другую. Защемление происходит при переходе нити с одной поверхности ткани на другую. Если учесть, что плоская нить обладает свойствами гибкости и упругости, а линейный размер рассматриваемого участка мал и не превышает 4 мм, то её упругие свойства оказываются хорошо выраженными, и нить можно представить в виде плоской гибкой упругой пластины. При этом, как показывают результаты измерений, выполненных с помощью окулярного микроскопа, ширина нити составляет 0,7 мм, а толщина – 0,05 мм. Эти результаты подтверждаются также данными информационных источников [9].

Смоделируем положение гибкой пластины, защемленной в точках перехода с одной поверхности ткани на другую. Для этого построим в среде универсальной математической системы Mathcad 14 в заданном масштабе точки защемления и получим профиль изгиба нити, выполнив сплайн-аппроксимацию точек защемления. При использовании сплайн-аппроксимации исходная функция заменяется отрезками, например, кубических полиномов, проходящих через смежные узловые точки. Коэффициенты полиномов рассчитывают так, чтобы непрерывными были первая и вторая производные. Линия, которую описывает сплайн-функция, напоминает по форме гибкую линейку, защемленную в узловых точках.

Для сплайновой аппроксимации система Mathcad 14 предлагает четыре встроенные функции. Три из них служат для получения векторов вторых производных сплайн функций при различных видах интерполяции: $lspline(VX, VY)$ возвращает вектор вторых производных при приближении в опорных точках к прямой, $pspline(VX, VY)$ возвращает вектор вторых производных при приближении в опорных точках к параболической кривой, $cspline(VX, VY)$ возвращает вектор VS вторых производных при приближении в опорных точках к кубическому полиному. Четвертая функция $interp(VS, VX, VY, x)$ возвращает значение $Y(x)$ для заданных векторов VS, VX, VY и заданного значения x . Таким образом, сплайн-аппроксимацию производят в два этапа. На первом, с помощью одной из функций $lspline, pspline$ или $cspline$ отыскивают вектор вторых производных функции $Y(x)$, заданной векторами VX и VY её значений (абсцисс и ординат). Наиболее плавная кривая соответствует аппроксимации отрезками кубических полиномов, поэтому в работе использована функция $cspline(VX, VY)$. Затем на втором этапе для каждой искомой точки вычисляют значение $Y(x)$ с помощью функции $interp(VS, VX, VY, x)$.

Таким образом, выполнив необходимые построения в системе Mathcad 14, получаем модель профиля участка плоской нити, заработанной в ткань. Особенностью полученного профиля является то, что он не назначен, а вычислен как результат действия сил упругости гибкой плоской защемленной нити (рис. 4).

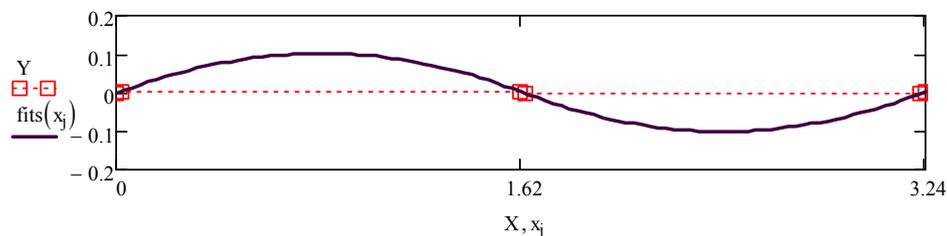


Рис. 4. Профиль нити, полученный в результате сплайн-аппроксимации точек её защемления отрезками кубических полиномов

В результате профиль деформированной нити стремится занять такое положение, которое соответствует минимальному запасу потенциальной энергии и равномерному её распределению по длине нити.

Из рассмотренного следует, что изогнутый профиль плоских нитей, из которых состоит переплетение ткани, приводит к тому, что расстояние между профилями нитей взаимноперпендикулярного направления является величиной переменной. В продольном сечении плоскостью, как это изображено на рис. 4, расстояние минимально в точках перехода нити с одной поверхности ткани на другую и максимально в середине этого участка.

В соответствии с этим при пропитке ткани это пространство между нитями заполняют смолой, слой которой имеет переменную толщину, а именно: минимальную на краях участка и максимальную в середине участка перехода профиля нити с поверхности на поверхность. Отсюда видно, что в трехмерном пространстве межнитевые поры имеют сложную форму переменного сечения. Это важно для процесса пропитки, поскольку форма и размер пор определяют ход капиллярных процессов, от которых зависит объем заполняющей поры смолы. Еще более усложняются условия пропитки, если пропитывают не одиночный слой ткани, а пакет из нескольких слоев, каждый из которых имеет собственную ориентацию переплетения нитей.

Определим форму элемента межнитевой поры в трехмерном пространстве. Для этого рассмотрим первую четверть кривой профиля нити, изображенной на рис. 4. Элемент межнитевого порового пространства представляет собой два одинаковых компонента, ограниченных сверху поверхностью, профиль которой соответствует профилю кривой на рис. 4, и толщиной, равной ширине нити, а снизу – горизонтальной плоскостью. Спереди и сзади элементарный поровый объем ограничен двумя параллельными фронтальными плоскостями, расстояние между которыми составляет величину, равную ширине нити. Второй такой же компонент пристыковывается к первому снизу в перевернутом положении и с поворотом на 90° . Форма элемента межнитевого порового пространства ткани представлена на рис. 5.

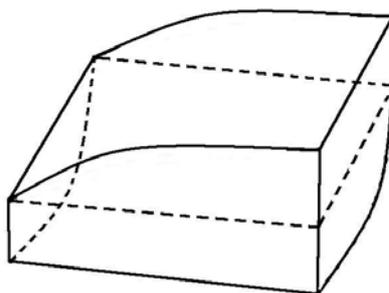


Рис. 5. Форма элемента межнитевого порового пространства ткани

Таким образом, поставленная задача построения модели элементарного объема межнитевого порового пространства успешно решена. Схема алгоритма компьютерной модели формирования межнитевого порового пространства ткани представлена на рис. 6.

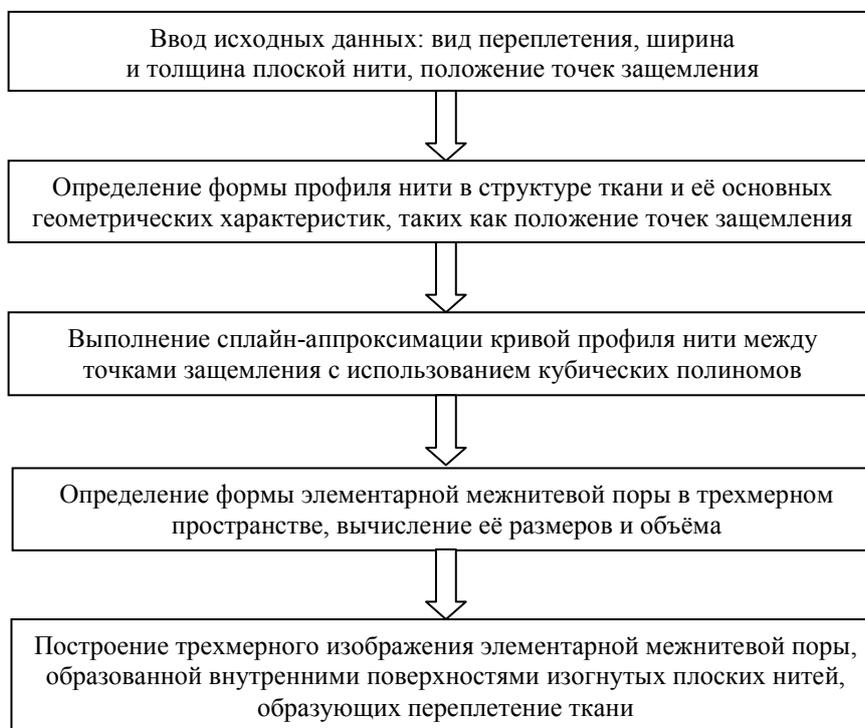


Рис. 6. Схема алгоритма компьютерной модели формирования межнитевого порового пространства ткани

Выводы

1. Для армирующей ткани усиленного саржевого (twill) переплетения 2/2 построена модель профиля плоской нити, защемленной в местах перехода её с одной стороны поверхности ткани на другую путем сплайн-аппроксимации точек её защемления отрезками кубических полиномов.
2. По результатам наблюдения и микрофотографирования поверхности ткани построена объемная

модель взаимного положения переплетающихся нитей в структуре ткани.

3. Получена модель элементарного объема межнитевого порового пространства ткани, которая представляет собой два одинаковых компонента, ограниченных сверху поверхностью, профиль которой соответствует профилю кривой сплайн-аппроксимации, снизу – горизонтальной плоскостью, а также фронтальной плоскостью и отстоящей от нее на ширину нити параллельной плоскостью. Второй такой же компонент пристыковывают к первому снизу в перевернутом положении и с поворотом на 90°.

4. Составлена схема алгоритма компьютерной модели формирования межнитевого порового пространства ткани.

Литература

1. Vignoles G. L. Contribution of X-ray CMT image processing to the modelling of pyrocarbon Chemical Vapour Infiltration [Электронный ресурс] / G.L. Vignoles, C. Mulat, C. Germain, O. Coindreau, S. Delettrez, G. Chollon // Carbon 2009, Biarritz : France. – Режим доступа : \www/ URL : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00399521/en/>

2. Lomov S.V. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites / S.V. Lomov, A.V. Gusakov, G. Huysmans, A. Prodromou, I. Verpoest // Composites Science and Technology. – 2000. – Vol. 60. – P. 2083–2095.

3. Lomov S.V. Hierarchy of textile structures and architecture of fabric geometric models / S.V. Lomov, G. Huysmans, I. Verpoest // Textile Research Journal. – 2001. – Vol. 71. – № 6. – P. 534–543.

4. Ломов С.В. WiseTex – виртуальный мир и реальное прогнозирование структуры и свойств текстильных полимерных композитов [Электронный ресурс] / С.В. Ломов, И. Ферпуст // Технический текстиль. – 2006. – №13. – Режим доступа : <http://www.rustm.net/catalog/article/140.html>

5. Сыс В.Б. Развитие научных основ создания низко модульной технологии жидкостной обработки нитей в паковках : дис. ... докт. техн. наук / Сыс В.Б. – Херсон, 2008. – 328 с.

6. Бардачѳ, Ю.Н. Развитие методов экспериментально-теоретического моделирования повышенной прогностичности химико-технологических процессов текстильной промышленности : дис. ... докт. техн. наук / Бардачѳ Ю.Н. – СПб., 1992. – 270 с.

7. Яблочников Е.И. Интеграция процессов проектирования и подготовки производства изделий из полимерных композиционных материалов / Е.И. Яблочников, С.Д. Васильков, И.А. Волков // Композитный мир. – 2012. – № 2 (41). – С. 54–57.

References

1. Vignoles, G.L., Mulat, C., Germain, C., Coindreau, O., Delettrez, S., Chollon, G. (2009). Contribution of X-ray CMT image processing to the modelling of pyrocarbon Chemical Vapour Infiltration. Carbon 2009, Biarritz: France. Retrieved November 06, 2013 from <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00399521/en/>.

2. Lomov, S.V., Gusakov, A.V., Huysmans, G., Prodromou, A., Verpoest, I. (2000). Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. Composites Science and Technology, 60, 2083-2095.

3. Lomov, S.V., Huysmans, G., Verpoest, I. (2001). Hierarchy of textile structures and architecture of fabric geometric models. Textile Research Journal, 71, 534-543.

4. Lomov, S.V., Verpoest, I. WiseTex – the virtual world and the real prediction of the structure and properties of textile polymer composites. (2006). Technical textile, 13. Retrieved November 07, 2013 from <http://www.rustm.net/catalog/article/140.html>.

5. Sys, V.B. (2008). Development of scientific basis to create a low-modulus technology of liquid processing of fibers in packages (Doctoral dissertation). Kherson national technical university, Ukraine.

6. Bardachov, Y.N. (1992). Development of methods of experimental and theoretical modeling of increased predictability of chemical and technological processes of the textile industry (Doctoral dissertation). St. Petersburg, Russia.

7. Yablochnikov, E.I., Vasil'kov, S.D., Volkov, I.A. (2012). The integration of the design and manufacture of products from polymeric composite materials. Composite world, 41, 54-57.

Рецензія/Peer review : 25.11.2013 р.

Надрукована/Printed : 7.2.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф., в.о. зав. кафедрою хімічних технологій та біохімічного синтеза,
Херсонський національний технічний університет, Сарібекова Д.Г.