



УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИН-
ФУЗИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОМПОЗИТНОГО АРОЧ-
НОГО ЭЛЕМЕНТА**

В.А. Гончаров

А.Е. Раскутин

кандидат технических наук

Июль 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11

В.А. Гончаров¹, А.Е. Раскутин¹

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНФУЗИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОМПОЗИТНОГО АРОЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Описывается последовательность операций для моделирования технологического процесса изготовления композитного арочного элемента методом инфузии. Отражены феноменологические процессы, протекающие при формовании, а также характеристики, которые необходимо учитывать при имитации.

Ключевые слова: *моделирование процесса инфузии, проницаемость, метод конечных элементов, вязкость.*

V.A. Goncharov, A.E. Raskutin

COMPUTER MODELING OF THE INFUSION PROCESS IN THE MANUFACTURE OF COMPOSITE ARCHED ELEMENT

The article contains the sequence of operations for modeling of manufacturing by infusion composite arched element. Described are phenomenological processes arising from the formation and critical characteristics that must be taken into account in the simulation.

Keywords: *modeling of infusion, permeability, finite element method, viscosity.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Одним из основных преимуществ ПКМ является то, что материал, технология и конструкция создаются одновременно – этим определяется высокая степень инноваций на всех этапах жизненного цикла материала, что требует применения новых подходов к проектированию и созданию конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе сложных математических моделей, в результате использования которых появляется возможность спрогнозировать не только свойства ПКМ и конструкций из них, но и возможное образование дефектов формования [1–4].

Можно привести множество удачных примеров использования композиционных материалов в конструкциях современных изделий, таких как Boeing 787 и Space Shuttle NASA. Кроме авиационно-космической отрасли данные материалы достаточно давно используются в строительстве, автомобилестроении и судостроении.

В настоящее время ведутся разработки, направленные на снижение стоимости изготовления композиционных материалов, путем исключения необходимости использования автоклавного оборудования и изготовления препрега.

Альтернативной технологией формования ПКМ является технология вакуумной инфузии. Точность воспроизведения теоретического контура композиционных панелей, изготавливаемых методом инфузии, определяется формой оснастки, на которой осуществляется пропитка и выкладка. Основная проблема технологии вакуумной инфузии заключается в трудности получения детали со стабильными геометрическими и физико-механическими характеристиками [5–11].

Материалы и методы

С учетом процессов, протекающих при формовании инфузионными методами, определены требования, предъявляемые к исходным данным, для реализации компьютерного моделирования в программе PAM-RTM. К ним относятся характеристики связующего и наполнителя – физические, реологические и теплофизические:

– для наполнителя – градиент проницаемости, плотность, теплоемкость и теплопроводность, поверхностная площадь, а также начальная толщина преформы;

– для связующего – функция вязкости от температуры, теплоемкость и теплопроводность, плотность.

Необходимо отметить, что для наполнителя необходимо учитывать изменение проницаемости в результате процесса предварительной формовки и связанного с этим смещения его волокон относительно первоначального положения [12, 13].

Моделирование процесса инфузии сводится к решению задач гидродинамики и теплообмена. Решение задачи гидродинамики при моделировании описывается законом Дарси, определяющим расход однородной жидкости через пористую среду при ламинарном режиме потока. Основой для выполнения закона Дарси является обеспечение закона сохранения масс с учетом несжимаемости жидкости. Поскольку масса связующего в выделенном объеме со временем не меняется, то полный поток этого вектора через замкнутую поверхность обязательно равен нулю [14].

Параметрами, влияющими на процесс инфузии, являются проницаемость наполнителя, вязкость связующего, градиент давления. Чем больше проницаемость наполнителя и скорость подачи связующего, тем быстрее произойдет полная пропитка армирующего материала. Обратное влияние на процесс оказывает вязкость связующего [15, 16].

$$v = -\frac{K \cdot \Delta P}{\mu \cdot \Delta L},$$

где v – скорость пропитки, м/с; K – проницаемость армирующего наполнителя, м²; μ – вязкость эпоксидного связующего, Па·с; L – габаритный размер зоны пропитки, м; ΔP – градиент давления при пропитке, Па.

Результаты

Рассмотрим исходные данные, необходимые для моделирования процесса пропитки при изготовлении оболочки арочного элемента методом инфузии в программе CAE-анализа PAM-RTM:

По связующему

- V_m – объемное содержание в ПКМ;
- вязкость:
 - $\mu = \text{const}$ – постоянная вязкость;
 - $\mu = f(\tau)$ – изменение вязкости по времени.

Следует отметить, что если вязкость связующего за время пропитки изменяется незначительно, то в программе PAM-RTM при вводе исходных данных она может задаваться константой. В ином случае данная характеристика описывается исключительно функциональной зависимостью от времени, полученной по результатам экспериментальных исследований с помощью вискозиметра (рис. 1).

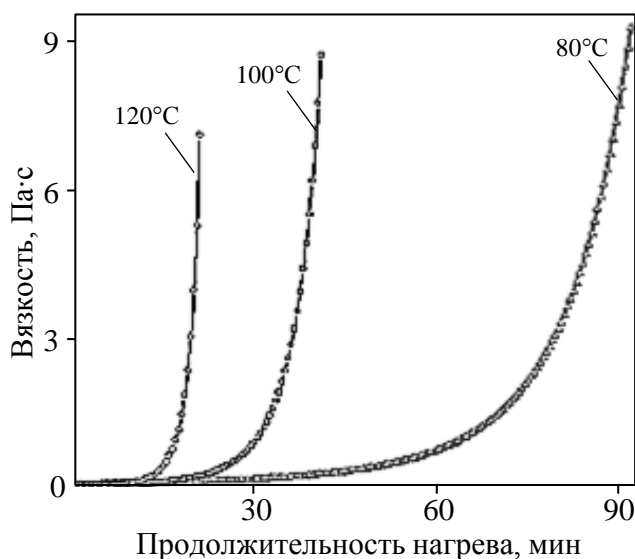


Рис. 1. Изменения вязкости связующего ВСЭ-15 при нагреве в изотермическом режиме при температурах 80, 100 и 120°C

По армирующему наполнителю

- V_f – объемное содержание в ПКМ;
- проницаемость пакета наполнителя:
 - K_1 – коэффициент проницаемости в направлении основы;
 - K_2 – коэффициент проницаемости в направлении утка;
 - K_3 – коэффициент проницаемости в трансверсальном направлении.

По распределительной сетке (РС) с повышенной фильтруемостью

- K_{PC} – коэффициент проницаемости в направлении основы и утка.

По геометрической форме образца

- оболочечная или трехмерная САД-модель с разбивкой на конечные прямоугольные и/или треугольные элементы.

Требования к геометрической форме образцов при моделировании

2,5D – для моделирования ПКМ на поверхностных моделях, которые представляют собой срединные поверхности с эквивалентными свойствами. Недостатком данного подхода является невозможность определения объемных эффектов – например, пористости по толщине композита.

Для моделирования полной объемной картины ПКМ рекомендуется использовать 3D-расчет [17]. Так, для моделирования процесса инфузии при изготовлении композитной оболочки арочного элемента определены значения характеристик связующего ВСЭ-38 (изменение вязкости по времени) и наполнителя Siltex 4716 (коэффициент проницаемости преформы с учетом распределительной сетки).

По результатам исследования реологических свойств установлено, что вязкость связующего ВСЭ-38 при температуре 25°C изменяется с 0,37 до 1 Па·с за 214 мин, что вводит ограничения по времени пропитки – не более 3,5 ч.

По анализу скорости течения жидкости через армирующий материал при подаче с одного торца образца, а отводе – с противоположной стороны, проводили исследование фильтрационных характеристик и определяли коэффициент проницаемости преформы на основе наполнителя Siltex 4716 с использованием распределительной сетки: $2,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ (рис. 2).

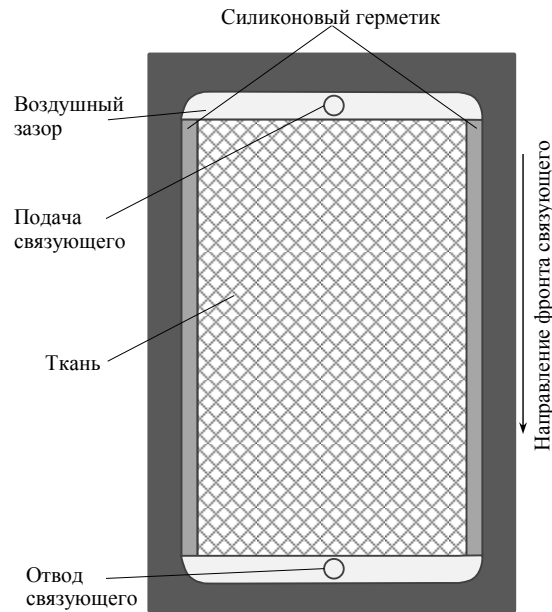


Рис. 2. Схема заготовки для экспериментального определения коэффициента проницаемости

По результатам проведенных исследований скорости фильтрации через армирующий наполнитель установлено, что при градиенте давления в 0,3 ат (0,03 МПа) положение фронта жидкости относительно точки подачи сместилось на 210 мм за 60 с, что позволяет определить коэффициент проницаемости:

$$K_{\text{exp}} = \frac{x^2 \cdot \varphi \cdot \mu}{2P \cdot \tau},$$

где x – координата распределения фронта связующего; μ – вязкость; P – давление; τ – продолжительность пропитки; φ – объемное содержание армирующего наполнителя.

Полученное высокое значение коэффициента проницаемости обусловлено наличием на поверхности распределительной сетки, применение которой увеличивает скорость фильтрации связующего в направлениях основы и утка для обеспечения полной пропитки изделия. Значения вязкости и проницаемости являются ключевыми характеристиками для использования в качестве входных данных для моделирования пропитки в программе PAM-RTM [18–23].

Для проведения расчета геометрическая форма композитной оболочки арочного элемента с величиной пролета 8000 мм, диаметром в сечении 300 мм и высотой подъема 1000 мм построена в виде оболочечной CAD-модели в программе SolidEdge (рис. 3).

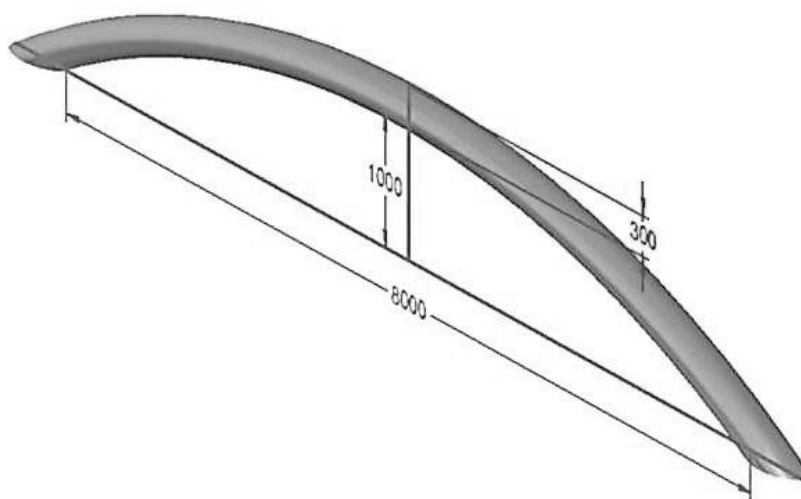


Рис. 3. CAD-модель композитной оболочки арочного элемента

С целью минимизации влияния граничных условий на точность последующего расчета осуществлен переход от криволинейной геометрической к эквивалентной прямолинейной CAD-модели.

После перевода CAD-модели из формата .igs в программу FisualMesh сгенерирована сетка с разбивкой на конечные треугольные элементы. Далее в программе PAM-RTM заданы граничные условия и положение точек инъекции (подачи связующего) и вакуумирования для первой схемы пропитки. Особенностью данной схемы является наличие точки подачи для инъекции связующего по центру конструкции и двух – для отвода связующего, расположенных по торцам моделируемого объекта.

По результатам моделирования определено положение фронта связующего для прогнозирования времени, затрачиваемого на пропитку при изготовлении композитной оболочки по первой схеме. Установлено, что через 4 ч после начала инъекции полной пропитки не произошло, что не соответствует технологической жизнеспособности связующего ВСЭ-38 (рис. 4).

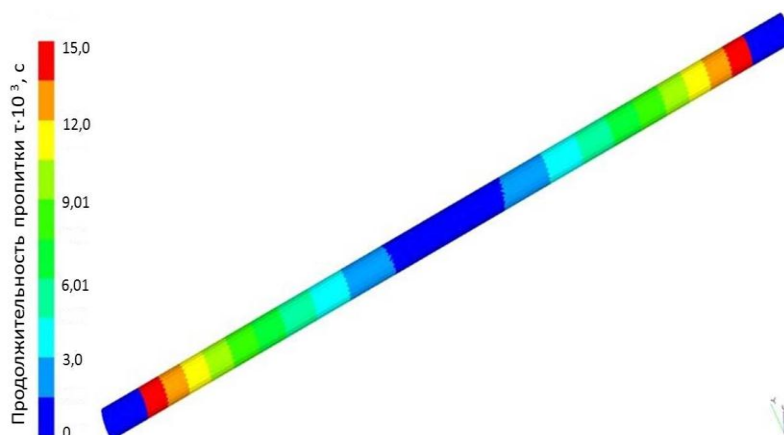


Рис. 4. Продолжительность пропитки композитной оболочки по первой схеме

С учетом полученных результатов моделирования по первой схеме расположения точек подачи и отвода связующего в программе PAM-RTM скорректированы граничные условия и положение точек инъекции и вакуумирования для второй схемы пропитки. Особенностью данной схемы является наличие трех точек подачи связующего для инфузии и двух – для отвода, расположенных между точками подачи на одинаковом удалении.

По результатам имитационного компьютерного моделирования определено положение фронта связующего для прогнозирования времени, затрачиваемого на пропитку при изготовлении по второй схеме (рис. 5).

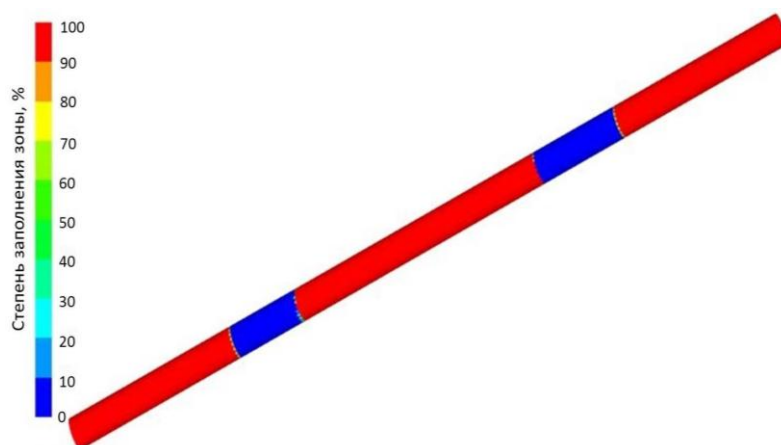


Рис. 5. Положение фронта связующего через 60 мин после начала пропитки
Продолжительность полной пропитки по второй схеме составила 2 ч, что соответствует технологической жизнеспособности связующего.

Обсуждение и заключения

По результатам сравнения данных моделирования процесса инфузии при изготовлении композитной оболочки с различными вариантами расположения точек подачи связующего установлено сокращение продолжительности полной пропитки в 3 раза путем оптимизации схемы при добавлении дополнительных двух точек подачи связующего и одной точки вакуумирования.

По результатам моделирования процесса инфузии композитной оболочки арочного элемента оптимизировано расположение точек инъекции для пропитки с учетом жизнеспособности связующего, а также установлено, что применение средств компьютерной имитации позволяет определить продолжительность пропитки, а также спрогнозировать характер распределения фронта связующего еще на стадии расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
3. Каблов Е.Н., Каримова С.А., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком //Коррозия: материалы, защита. 2011. №12. С. 1–7.
4. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
5. Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Компьютерное моделирование технологического процесса изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 286–291.
6. Душин М.И., Мухаметов Р.Р., Платонов А.А., Меркулова Ю.И. Исследование фильтрационных характеристик армирующих наполнителей и связующих при разработке технологии безавтоклавного формования полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 22–25.
7. Григорьев М.М., Коган Д.И., Твердая О.Н., Панина Н.Н. Особенности изготовления ПКМ методом RFI //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 03 (viam-works.ru).
8. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
9. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 18–26.
10. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии. 2008. 822 с.
11. Чурсова Л.В., Душин М.И., Коган Д.И., Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Платонов А.А. Пленочные связующие для RFI-технологии //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 63–66.

12. Гончаров В.А., Шиенок А.М., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Зеленский П.В. Моделирование инфузионных технологий изготовления слоистых полимерных композиционных материалов //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №1. С. 43–49.
13. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
14. Гончаров В.А. Моделирование инфузионных технологий изготовления ПКМ на основе эпоксидных связующих и углеродных тканей Porcher //Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №5. Ст. 08 (materialsnews.ru).
15. Бунаков В.А., Головкина Г.С. Армированные пластики. М.: МАИ. 1997. 404 с.
16. Antonucci V., Esposito M., Ricciardi M.R., Raffone M., Zarrelli M., Giordano M. Permeability characterization of stitched carbon fiber preforms by fiber optic sensors //Express Polymer Letters. 2011. V. 5. P. 1075–1084.
17. Porto J., Letzow M., Dos Santos E., Amico S., Souza J., Isoldi L. Computational modeling of RTM and LRTM processes applied to complex geometries //EngenhariaTérmica (Thermal Engineering). 2012. V. 11. P. 93–99.
18. Котов В.В. Моделирование производства композиционных материалов – вызов времени //Перспективные материалы для авиакосмической промышленности. 2011. №1. С. 21–23.
19. Li J., Zhang C., Liang R., Wang B., Walsh S. Modeling and analysis of thickness gradient and variations in vacuum-assisted resin transfer molding process //Polymer Composites. 2008. V. 29. P. 473–482.
20. Гончаров В.А., Федотов М.Ю., Сорокин К.В., Раскутин А.Е. Моделирование стадии пропитки получения углепластиков на основе эпоксидных связующих для RTM и VARTM технологий //Справочник. Инженерный журнал. 2013. №12. С. 24–28.
21. Гончаров В.А., Федотов М.Ю., Шиенок А.М. Моделирование полимерных композиционных материалов /В сб. трудов конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России». М.: ВИАМ. 2010. С. 8.
22. Гончаров В.А., Федотов М.Ю. Моделирование физико-механических свойств интеллектуального углепластика с оптоволоконными сенсорами /В сб. материалов. V Международной конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN 2013. М. 2013. С. 822–823.

23. Гончаров В.А., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Раскутин А.Е. Моделирование технологического процесса изготовления методом инфузии ПКМ на основе связующего ВСЭ-21 и ткани Tenax-e Style 450 //Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 04 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
2. Kablov E.N. Materialy i himicheskie tehnologii dlja aviacionnoj tehniki [Materials and chemical technologies for aviation engineering] //Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 82. №6. S. 520–530.
3. Kablov E.N., Karimova S.A., Semenova L.V. Korroziionnaja aktivnost' ugleplastikov i zashhita metallicheskih silovyh konstrukcij v kontakte s ugleplastikom [Corrosion activity ugleplastikov and protection of metal load bearing structures in contact with the ugleplastiki] //Korrozija: materialy, zashhita. 2011. №12. S. 1–7.
4. Kablov E.N., Sivakov D.V., Guljaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Ju., Goncharov V.A. Metody issledovanija konstrukcionnyh kompozicionnyh materialov s integrirovannoj jelektromehanicheskoj sistemoj [Methods of research of constructional composite materials with the integrated electromechanical system] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №4. S. 17–20.
5. Raskutin A.E., Goncharov V.A. Komp'juternoe modelirovanie tehnologicheskogo processa izgotovlenija PKM metodom vakuumnoj infuzii [Computer modeling of technological process of manufacturing of PKM by method of vacuum infusion] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 286–291.
6. Dushin M.I., Muhametov R.R., Platonov A.A., Merkulova Ju.I. Issledovanie fil'tracionnyh harakteristik armirujushhih napolnitelej i svjazujushhih pri razrabotke tehnologii bezavtoklavnogo formovanija polimernyh kompozicionnyh materialov [Research of filtration characteristics of reinforcing fillers and binding when developing technology of bezavtoklavny formation of polymeric composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 22–25.

7. Grigor'ev M.M., Kogan D.I., Tverdaja O.N., Panina N.N. Osobennosti izgotovlenija PKM metodom RFI [Features of manufacturing of PKM RFI method] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 03 (viam-works.ru).
8. Sokolov I.I., Raskutin A.E. Ugleplastiki i stekloplastiki novogo pokolenija [Ugleplastiki and fibreglasses of new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4 (viam-works.ru).
9. Dushin M.I., Hrul'kov A.V., Muhametov R.R., Chursova L.V. Osobennosti izgotovlenija izdelij iz PKM metodom propitki pod davleniem [Features of manufacturing of products from PKM impregnation method under pressure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 18–26.
10. Mihajlin Ju.A. Konstrukcionnye polimernye kompozicionnye materialy [Constructional polymeric composite materials]. SPb.: Nauchnye osnovy i tehnologii. 2008. 822 s.
11. Chursova L.V., Dushin M.I., Kogan D.I., Panina N.N., Kim M.A., Gurevich Ja.M., Platonov A.A. Plenochnye svjazujushhie dlja RFI-tehnologii [Film binding for RFI technology] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 63–66.
12. Goncharov V.A., Shienok A.M., Sorokin K.V., Fedotov M.Ju., Zelenskij P.V. Modelirovanie infuzionnyh tehnologij izgotovlenija sloistyh polimernyh kompozicionnyh materialov [Modeling of infusional manufacturing techniques of layered polymeric composite materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2013. №1. S. 43–49.
13. Hrul'kov A.V., Dushin M.I., Popov Ju.O., Kogan D.I. Issledovanija i razrabotka avtoklavnyh i bezavtoklavnyh tehnologij formovanija PKM [Researches and development of avtoklavny and bezavtoklavny technologies of formation of PKM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 292–301.
14. Goncharov V.A. Modelirovanie infuzionnyh tehnologij izgotovlenija PKM na osnove jepoksidnyh svjazujushhih i uglerodnyh tkanej Porcher [Modeling of infusional manufacturing techniques of PKM on the basis of epoxy binding and carbon fabrics of Porcher] //Novosti materialovedenija. Nauka i tehnika. 2013. №5. St. 08 (materialsnews.ru).
15. Bunakov V.A., Golovkina G.S. Armirovannye plastiki [The reinforced plastics]. M.: MAI. 1997. 404 s.
16. Antonucci V., Esposito M., Ricciardi M.R., Raffone M., Zarrelli M., Giordano M. Permeability characterization of stitched carbon fiber preforms by fiber optic sensors //Express Polymer Letters. 2011. V. 5. P. 1075–1084.
17. Porto J., Letzow M., Dos Santos E., Amico S., Souza J., Isoldi L. Computational modeling of RTM and LRTM processes applied to complex geometries //EngenhariaTérmica (Thermal Engineering). 2012. V. 11. P. 93–99.

18. Kotov V.V. Modelirovanie proizvodstva kompozicionnyh materialov – vyzov vremeni [Modeling of production of composite materials – time call] //Perspektivnye materialy dlja aviakosmicheskoy promyshlennosti. 2011. №1. S. 21–23.
19. Li J., Zhang C., Liang R., Wang B., Walsh S. Modeling and analysis of thickness gradient and variations in vacuum-assisted resin transfer molding process //Polymer Composites. 2008. V. 29. P. 473–482.
20. Goncharov V.A., Fedotov M.Ju., Sorokin K.V., Raskutin A.E. Modelirovanie stadii pro-pitki poluchenija ugleplastikov na osnove jepoksidnyh svjazujushhih dlja RTM i VARTM tehnologij [Modeling of stage of impregnation of receiving ugleplastikov on the basis of epoxy binding for RTM and VARTM of technologies] //Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. 2013. №12. S. 24–28.
21. Goncharov V.A., Fedotov M.Ju., Shienok A.M. Modelirovanie polimernyh kompozicionnyh materialov [Modeling of polymeric composite materials] /V sb. trudov konf. «Novye materialy i tehnologii glubokoj pererabotki syr'ja – osnova innovacionnogo razvitija jekonomiki Rossii». M.: VIAM. 2010. S. 8.
22. Goncharov V.A., Fedotov M.Ju. Modelirovanie fiziko-mehanicheskikh svojstv intellektual'nogo ugleplastika s optovolokonnymi sensorami [Modeling of physicomachanical properties intellectual ugleplastika with fiber optic sensors] /V sb. materialov. V Mezhdunarodnoj konf. «Deformacija i razrushenie materialov i nanomaterialov» DFMN 2013. M. 2013. S. 822–823.
23. Goncharov V.A., Sorokin K.V., Fedotov M.Ju., Raskutin A.E. Modelirovanie tehnologicheskogo processa izgotovlenija metodom infuzii PKM na osnove svjazujushhego VSJe-21 i tkani Tenax-e Style 450 [Modeling of technological process of manufacturing by method of infusion of PKM on the basis of binding VSE-21 and Tenax-e Style 450 fabrics] //Trudy VIAM. 2014. №10. St. 04 (viam-works.ru).