



УДК 678.8:621.311.001.57

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-4-4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ИНФУЗИИ ПКМ
НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ВСЭ-21
И ТКАНИ TENAX-E STYLE 450**

В.А. Гончаров

К.В. Сорокин

М.Ю. Федотов

А.Е. Раскутин

кандидат технических наук

Октябрь 2014

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 678.8:621.311.001.57

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-4-4

В.А. Гончаров¹, К.В. Сорокин¹, М.Ю. Федотов¹, А.Е. Раскутин¹

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ИНФУЗИИ ПКМ НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ВСЭ-21 И ТКАНИ TENAX-E STYLE 450

Описана последовательность операций для моделирования технологического процесса изготовления ПКМ на основе связующего ВСЭ-21 и ткани Tenax-E Style 450 методом инфузии. Отражены феноменологические процессы, протекающие при формовании, а также характеристики, которые необходимо учитывать при имитации процесса. Описаны возможности использования моделирования для определения параметров формования еще на стадии расчета и алгоритм реализации модели для получения высокой сходимости при моделировании.

Ключевые слова: *моделирование композиционного материала, проницаемость, метод конечных элементов, вакуумная инфузия.*

V.A. Goncharov, K.V. Sorokin, M.Yu. Fedotov, A.E. Raskutin

MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF PCM ON A BASE OF VSE-21 RESIN AND TENAX-E STYLE 450 FABRIC MANUFACTURE BY INFUSION METHOD

A sequence of operations for modeling of PCM based on VSE-21 resin and Tenax-E Style 450 fabric manufacture by infusion method is described. Phenomenological processes appearing at forming and also critical characteristics which have to be taken into account during the imitation process are given. Abilities of modeling usage for forming parameters identification even on the stage of calculation and algorithm of model realization to get a high convergence during modeling are described.

Keywords: *modeling of composite material, permeability, finite element method, vacuum infusion.*

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

Ужесточение требований к эффективности летательных аппаратов приводит к росту требований к материалам. Высокий уровень современной авиакосмической техники связан во многом с применением конструкционных, в том числе и полимерных, композиционных материалов (ПКМ), которые обладают высокой надежностью, весовой эффективностью, хорошими технологическими и эксплуатационными свойствами.

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. Это требует применения новых подходов к проектированию и созданию конструкций из 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].

Актуальной задачей является разработка технологий, позволяющих снизить стоимость изготовления композиционных материалов путем исключения необходимости использования автоклавного оборудования и изготовления препрега.

Альтернативой препрегово-автоклавной технологии и технологии контактного формования являются процессы, совмещающие операции пропитки наполнителя связующим и формования детали, что приводит к сокращению продолжительности производства и удешевлению технологии.

К таким процессам относят технологии пропитки под давлением (Resin Transfer Modeling – RTM), инфузионной пропитки под вакуумом (Vacuum Infusion – VARTM) и пропитки пленочным связующим (Resin Film Infusion – RFI).

Альтернативной технологией формования ПКМ в настоящее время является технология вакуумной инфузии. Точность воспроизведения теоретического контура композиционных панелей, изготавливаемых методом инфузии, определяется формой оснастки, на которой осуществляются пропитка и выкладка. Основная проблема технологии вакуумной инфузии заключается в трудности получения детали со стабильными геометрическими и физико-механическими характеристиками [5–14].

Материалы и методы

Основные процессы, которые протекают при инфузии и должны учитываться при моделировании, можно разделить на несколько категорий: реология процесса, термическая составляющая, химия процесса. К реологической категории относится

движение связующего через среду наполнителя с учетом проницаемости, а также изменение вязкости связующего.

Теплофизика процесса формования включает в себя учет теплопроводности оснастки, теплоемкости и теплопроводности компонентов ПКМ, конвекции тепла от одной области изделия к другой с помощью движущейся среды, в данном случае связующего. При определении химической составляющей должны быть учтены диффузия и полимеризация в процессе формования.

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, 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. Для наполнителя необходимо учитывать изменение проницаемости в результате процесса предварительной формовки и связанное с этим смещение его волокон относительно первоначального положения [15, 16].

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. Поскольку масса связующего в выделенном объеме со временем не меняется, то полный поток этого вектора через замкнутую поверхность обязательно равен нулю [17].

Если выделить элементарный объем с фиксированными координатами, то появляется возможность реализовать подход Эйлера к описанию сплошной среды. При этом можно наблюдать за изменениями в этом объеме, связанными с протеканием через выделенный объем все новых и новых частиц. Такой подход отличается от приема, предложенного Лагранжем, который предлагает выделять элементарный объем в пространстве и следить за частицами объема, двигаясь вместе с ними. В данном случае выполняется стационарное уравнение неразрывности потока – одно из основных уравнений динамики сплошной среды.

Параметрами, влияющими на процесс инфузии, являются проницаемость наполнителя, вязкость связующего, градиент давления. Чем больше проницаемость

наполнителя и скорость подачи связующего, тем быстрее пройдет полная пропитка армирующего материала. Вязкость связующего оказывает обратное влияние на процесс [18–20].

Результаты и обсуждение

Рассмотрим, какие исходные данные требуются для моделирования процессов пропитки при изготовлении композитов инфузионными методами формования (такими как вакуумная инфузия, RTM, RFI) в программах CAE-анализа.

По связующему

- объемное содержание в ПКМ – V_m ;
- вязкость:
 - постоянная вязкость – $\mu = \text{const}$;
 - изменение вязкости во времени – $\mu = f(t)$ – для стадии пропитки;
 - изменение вязкости при температуре – $\mu = f(T)$ – для стадии отверждения.

По армирующему наполнителю

- объемное содержание в ПКМ – V_f ;
- проницаемость пакета наполнителя – коэффициент проницаемости в направлении:
 - основы – K_1 ;
 - утка – K_2 ;
 - в трансверсальном направлении – K_3 ;
- поверхностная плотность;
- диаметр филамента углеродного жгута.

По распределительной сетке с повышенной фильтруемостью

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

По геометрии образца

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

Требования к геометрии 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 композиционного материала.

Для возможности наблюдения объемных особенностей по толщине необходимо использовать 2D-модели, позволяющие моделировать поперечное сечение композици-

онного материала с учетом свойств каждого композитного слоя или их групп (при их большом количестве).

Для моделирования полной объемной картины ПКМ рекомендуется использовать 3D расчет [21].

В данном расчете образец размером 500×800 мм представлен оболочечной CAD-моделью с разбивкой на конечные треугольные элементы. Геометрия образца задана в программе SolidEdge и импортирована в формате igs в программу FisualMesh, где для нее была создана сетка из конечных элементов для дальнейшей имитации процесса с заданными граничными условиями, в том числе точки расположения портов подачи связующего и вакуумирования (рис. 1).

При определении исходных данных с целью моделирования процесса инфузии для углепластика на основе эпоксидного связующего и равнопрочной углеродной ткани Tenax-E Style 450 использовано связующее ВСЭ-21, пригодное для изготовления композиционных материалов с углеродными, стеклянными и органическими волокнистыми наполнителями. Проведены исследования физических (плотность) и реологических свойств связующего (рис. 2), установлено, что при плотности связующего $1,25 \text{ г/см}^3$ и температуре 60°C вязкость эпоксидного связующего ВСЭ-21 будет оптимальной, так как не происходит преждевременной полимеризации связующего, и свойства сохраняются в течение 170 мин (2 ч 50 мин), соответственно продолжительность пропитки пакета должна быть меньше этого времени, что необходимо учитывать при моделировании в программе CAE-анализа PAM-RTM с использованием метода конечных элементов.

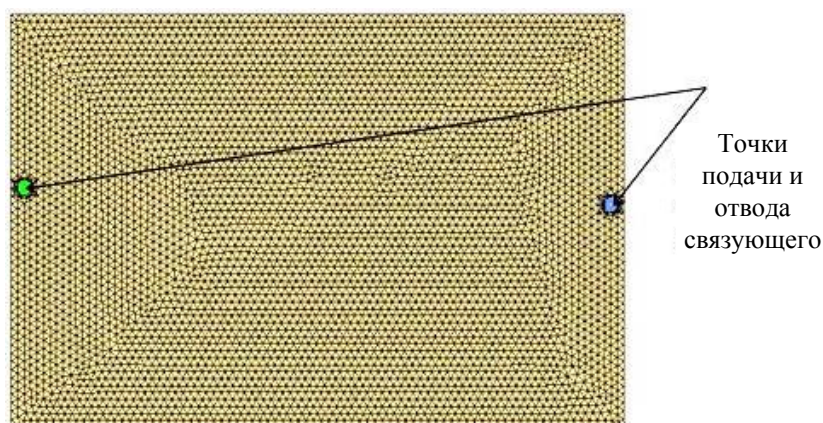


Рисунок 1. Точки инъекции на FEM-модели (схема 1)

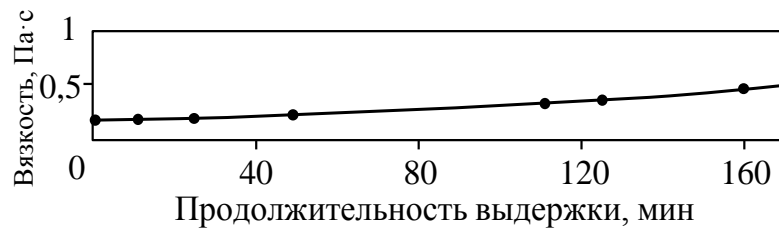


Рисунок 2. Зависимость изменения вязкости эпоксидного связующего ВСЭ-21 от продолжительности выдержки при температуре 60°C

Кроме того, для формирования исходных данных при моделировании процесса изготовления инфузионным методом углепластика на основе связующего ВСЭ-21 и равнопрочной углеродной ткани исследованы фильтрационные характеристики углеродного равнопрочного наполнителя Tenax-E Style 450. Установлено, что коэффициент абсолютной жидкостной проницаемости в направлении основы и утка $K=4,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$, так как ткань равнопрочная ($K_1=K_2$), т. е. разницей проницаемости в направлении основы и утка можно пренебречь. Поверхностная плотность составила 205 г/м^2 .

С использованием исследованных характеристик ПКМ проведено моделирование процесса изготовления инфузионным методом углепластика на основе связующего ВСЭ-21 и наполнителя – равнопрочной углеродной ткани Tenax-E Style 450 – с учетом параметров технологии формования и исходных данных компонентов (вязкость связующего, проницаемость наполнителя).

Отметим, что изменение объемного содержания компонентов в ПКМ, габаритных размеров пакета, схемы армирования не влияет на температурно-временной режим отверждения связующего в процессе изготовления углепластика, но является критичным для стадии пропитки в процессе изготовления [18–20].

Таким образом, при моделировании и разработке информационной модели процесса изготовления ПКМ инфузионным методом основное внимание следует уделять процессу пропитки пакета наполнителя связующим.

При моделировании процесса пропитки пакета наполнителя размером $500 \times 800 \text{ мм}$ эпоксидным связующим ВСЭ-21 рассмотрена наиболее распространенная для вакуумной инфузии схема расположения точек инъекции для изготовления образца углепластика. В данной схеме связующее поступает в пакет для пропитки наполнителя через одну точку, расположенную на краю пакета, а отводится в ловушку с противоположной стороны.

Компьютерное моделирование осуществляли в программе PAM-RTM, в результате которого рассчитана продолжительность пропитки наполнителя с учетом реологии связующего и проницаемости армирующего наполнителя в пакете (рис. 3). При моделировании процесса пропитки пакета наполнителя связующим ВСЭ-21 по схеме 1 (с одноточечной подачей связующего) получены следующие результаты: объем связующего для пропитки $3,99 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; связующее, слившееся в ловушку, $1,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, продолжительность пропитки $1,29 \cdot 10^4 \text{ с}$ (3 ч 58 мин).

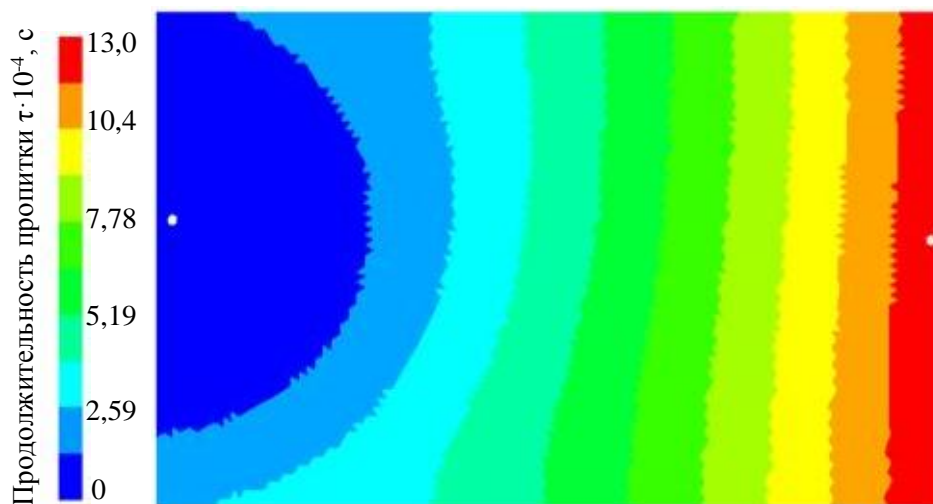


Рисунок 3. Продолжительность пропитки наполнителя с одной точкой подачи связующего (схема 1)

При продолжительности пропитки наполнителя по данной схеме возможно образование дефектов типа непрочлея в зоне выхода связующего в ловушку (так как продолжительность сохранения оптимальной вязкости эпоксидного связующего ВСЭ-21 составляет 2 ч 50 мин), что может привести к снижению физико-механических свойств углепластика.

Для устранения возможных дефектов типа непрочлеев скорректированы параметры для оптимизации технологического процесса пропитки наполнителя связующим с целью сокращения времени инъекции [25–30].

После анализа распределения поля давлений при инъекции, выбрана схема подачи связующего с дополнительной точкой подачи в центре образца (рис. 4). При моделировании процесса пропитки пакета наполнителя связующим ВСЭ-21 с двухточечной схемой подачи связующего (схема 2) получены следующие результаты: продолжительность пропитки $4,78 \cdot 10^3 \text{ с}$ (1 ч 33 мин); объем связующего для пропитки $4,05 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; связующее, слившееся в ловушку, $6,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

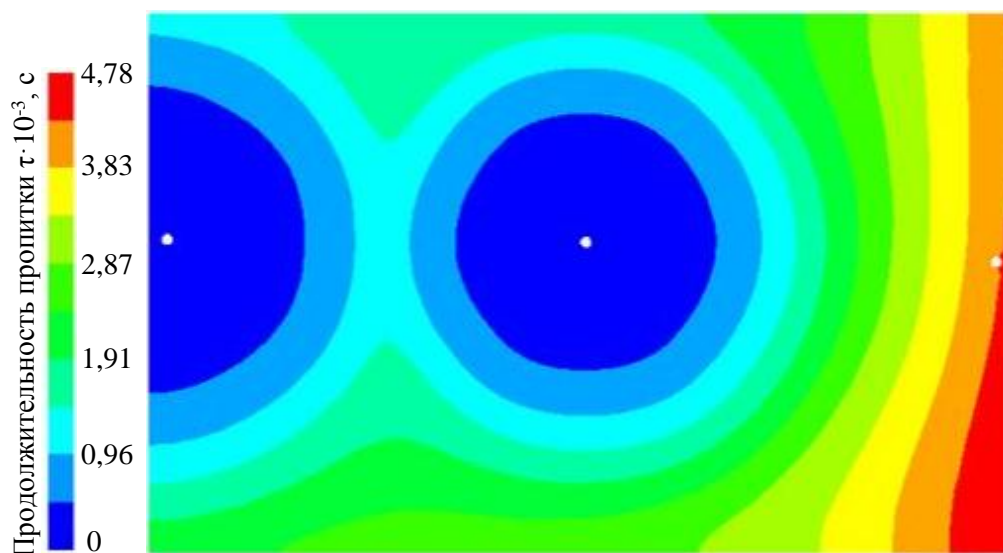


Рисунок 4. Продолжительность пропитки наполнителя при двухточечной схеме подачи связующего (схема 2)

Из распределения поля давлений видно, что оптимизация технологических параметров достигается в данном случае благодаря правильному расположению точек инъекции (рис. 5).

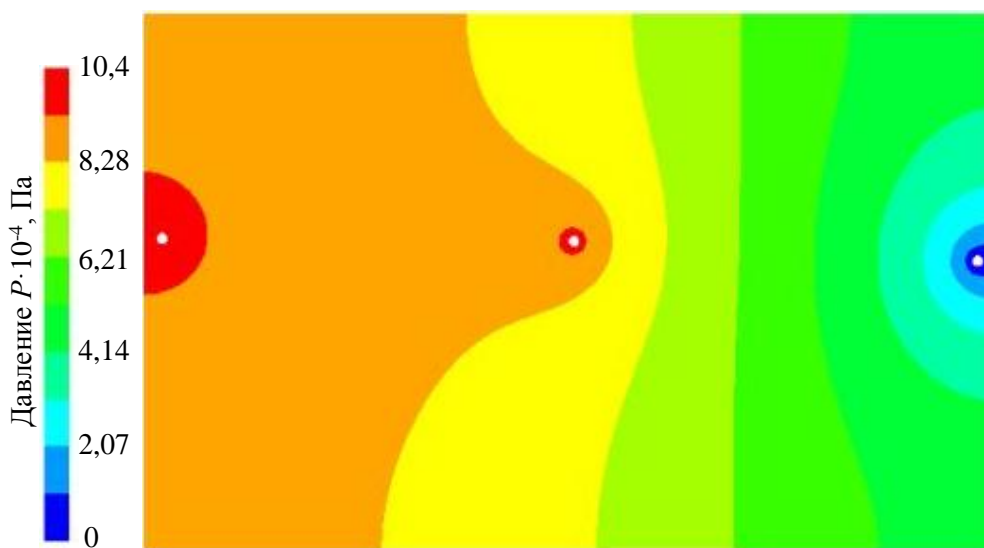


Рисунок 5. Распределение поля давлений по схеме 2

Пропитка наполнителя связующим ВСЭ-21 по предлагаемой схеме 2 с двумя точками подачи связующего в течение 1 ч 33 мин не приведет к образованию дефектов, что обеспечит получение ПКМ с высоким воспроизведением физико-механических свойств по всей площади пропитанного образца.

Заключение

По результатам моделирования процесса изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии установлено, что применение компьютерной имитации позволяет определить продолжительность, требуемую для пропитки, объем связующего для инъекции, выбрать расположение точек подачи и отвода связующего, оптимизировать параметры технологического процесса, а также спрогнозировать возможное образование дефектов при формовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
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. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
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. 24–33.
10. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии. 2008. 822 с.

11. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
12. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 412–423.
13. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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).
18. Бунаков В.А., Головкина Г.С. Армированные пластики. М.: МАИ. 1997. 404 с.
19. Koefoed M.S. Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades. Industrial Ph.D. Dissertation. 2003. P. 5–10.
20. Weitzenbock J.R., Sheno R.A., Wilson P.A. Radial flow permeability measurement. Part A: Theory. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 1999. V. 30(6). P. 781–796.
21. Котов В.В. Моделирование производства композиционных материалов – вызов времени //Перспективные материалы для авиакосмической промышленности. 2011. №1. С. 21–23.

22. Mastbergen D.B. Simulation and Testing of Resin Infusion Manufacturing Processes for Large Composite Structures, SAND2006-7856P Unlimited Release Printed October. 2007. P. 12–53.
23. 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. №5. С. 292–301.
24. 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.
25. Гончаров В.А., Федотов М.Ю. Моделирование физико-механических свойств интеллектуального углепластика с оптоволоконными сенсорами /В сб. материалов V Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN 2013. М. 2013. С. 822–823.
26. 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.
27. Ouagne P., Bréard J. Continuous transverse permeability of fibrous media //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. V. 41. P. 22–28.
28. Yenilmez B., Senan M., Murat Sozer E. Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process //Composites Science and Technology. 2009. V. 69. P. 1710–1719.
29. 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.
30. Porto J., Letzow M., Dos Santos E., Amico S., Souza J., Isoldi L. Computational modeling of RTM and LRTM processes applied to complex geometries //Engenharia Térmica (Thermal Engineering). 2012. V. 11. P. 93–99.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.

2. Kablov E.N. Materialy i himicheskie tehnologii dlja aviacionnoj tehniki [Materials and chemical technologies for aircraft equipment] //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 [Corrosiveness CFRP and protection of metal bearing structures in contact with the carbon fiber] //Korrozija: materialy, zashhita. 2011. №12. S. 1–7.
4. Kablov E.N. Korrozija ili zhizn' [Corrosion or life] //Nauka i zhizn'. 2012. №11. S. 16–21.
5. Raskutin A.E., Goncharov V.A. Komp'juternoe modelirovanie tehnologicheskogo processa izgotovlenija PKM metodom vakuumnoj infuzii [Computer simulation of the technological process of RMB by 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 armirujushhijh napolnitelej i svjazujushhijh pri razrabotke tehnologii bezavtoklavnogo formovanija polimernyh kompozicionnyh materialov [Study of the filtration characteristics of reinforcing fillers and binders in the development of technology bezavtoklavnogo molding of polymer composites] //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 [Peculiarities of RMB by RFI] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 03 (viam-works.ru).
8. Sokolov I.I., Raskutin A.E. Ugleplastiki i stekloplastiki novogo pokolenija [Carbon and fiberglass 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 the manufacture of RMB by pressure impregnation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 24–33.
10. Mihajlin Ju.A. Konstrukcionnye polimernye kompozicionnye materialy Structural polymer composite materials [Structural polymer composite materials]. SPb.: Nauchnye osnovy i tehnologii. 2008. 822 s.
11. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. III. Znachimye faktory starenija [Climatic aging of composite materials for aircraft industry. III. Significant factors of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2011. №1. S. 34–40.

12. Kirillov V.N., Starcev O.V., Efimov V.A. Klimaticeskaja stojkost' i povrezhdaemost' polimernyh kompozicionnyh materialov, problemy i puti reshenija [Weather resistance and a defect of polymeric composite materials, problems and solutions] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 412–423.
13. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkova A.K., Nikolaev E.V. Issledovanie vlijaniya klimaticeskikh faktorov i mehanicheskogo nagruzhenija na strukturu i mehanicheskie svojstva PKM [Investigation of the influence of climatic factors and mechanical loading on the structure and mechanical properties of the PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 41–45.
14. 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 binders for RFI-technology] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 63–66.
15. Goncharov V.A., Shienok A.M., Sorokin K.V., Fedotov M.Ju., Zelenskij P.V. Modelirovanie infuzionnyh tehnologij izgotovlenija sloistyh polimernyh kompozicionnyh materialov [Simulation of infusion technology manufacturing laminates of polymer composite materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2013. №1. S. 43–49.
16. Goncharov V.A., Fedotov M.Ju., Sorokin K.V., Raskutin A.E. Modelirovanie stadii propitki poluchenija ugleplastikov na osnove jepoksidnyh svjazujushhih dlja RTM i VARTM tehnologij [Modeling of the impregnation step, obtaining carbon-fiber epoxy binders for RTM and VARTM technology] //Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. 2013. №12. S. 24–28.
17. Goncharov V.A. Modelirovanie infuzionnyh tehnologij izgotovlenija PKM na osnove jepoksidnyh svjazujushhih i uglerodnyh tkanej Porcher [Modeling infusion manufacturing techniques PCM epoxy binder and carbon fabrics Porcher] //Novosti materialovedenija. Nauka i tehnika. 2013. №5. St. 08 (materialsnews.ru).
18. Bunakov V.A., Golovkina G.S. Armirovannye plastiki [Reinforced plastics]. M.: MAI. 1997. 404 s.
19. Koefoed M.S. Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades. Industrial Ph.D. Dissertation. 2003. P. 5–10.
20. Weitzenbock J.R., Shenoj R.A., Wilson P.A. Radial flow permeability measurement. Part A: Theory. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 1999. V. 30(6). P. 781–796.

21. Kotov V.V. Modelirovanie proizvodstva kompozicionnyh materialov – vyzov vremeni [Modeling of composite materials – call time] //Perspektivnye materialy dlja aviakosmicheskoy promyshlennosti. 2011. №1. S. 21–23.
22. Mastbergen D.B. Simulation and Testing of Resin Infusion Manufacturing Processes for Large Composite Structures, SAND2006-7856P Unlimited Release Printed October. 2007. P. 12–53.
23. Hrul'kov A.V., Dushin M.I., Popov Ju.O., Kogan D.I. Issledovaniya i razrabotka avtoklavnyh i bezavtoklavnyh tehnologij formovaniya PKM [Research and development and autoclave molding technology bezavtoklavnogo PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 292–301.
24. Goncharov V.A., Fedotov M.Ju., Shienok A.M. Modelirovanie polimernyh kompozicionnyh materialov [Simulations of polymer composite materials] /V sb. trudov konf. «Novye materialy i tehnologii glubokoj pererabotki syr'ya – osnova innovacionnogo razvitiya jekonomiki Rossii». M.: VIAM. 2010. S. 8.
25. Goncharov V.A., Fedotov M.Ju. Modelirovanie fiziko-mehanicheskikh svojstv intelektual'nogo ugleplastika s optovolokonnymi sensorami [Modeling of physical and mechanical properties of carbon fiber with fiber optic smart sensors] /V sb. materialov V Mezhdunarodnoj konferencii «Deformacija i razrushenie materialov i nanomaterialov» DFMN 2013. M. 2013. S. 822–823.
26. 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.
27. Ouagne P., Bréard J. Continuous transverse permeability of fibrous media //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. V. 41. P. 22–28.
28. Yenilmez B., Senan M., Murat Sozer E. Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process //Composites Science and Technology. 2009. V. 69. P. 1710–1719.
29. 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.
30. Porto J., Letzow M., Dos Santos E., Amico S., Souza J., Isoldi L. Computational modeling of RTM and LRTM processes applied to complex geometries //Engenharia Térmica (Thermal Engineering). 2012. V. 11. P. 93–99.