

УДК 678.8

А.Э. Рахматуллин¹, В.И. Постнов¹, С.В. Стрельников¹

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ НА ОБОГРЕВАЕМОЙ ОСНАСТКЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-48-56

Представлен опыт создания систем управления процессом безавтоклавного формования конструкций из ПКМ на обогреваемой оснастке, основное внимание уделено разработке программного обеспечения для таких систем. Рассмотрены требования, предъявляемые к программе управления со стороны технологов процесса, аппаратные особенности реализации системы, типы датчиков, подключаемых к системе, особенности работы с датчиками и анализа поступающей с них информации. Приведена схема управления величиной вакуумного давления при формовании ПКМ. Дано описание структурных блоков программы управления формованием.

Ключевые слова: ПКМ, обогреваемая оснастка, система управления, методики контроля технологических свойств, вакуумное формование, безавтоклавные методы формования.

A.E. Rakhmatullin¹, V.I. Postnov¹, S.V. Strelnikov¹

DEVELOPMENT AND APPLICATION EXPERIENCE OF SOFTWARE FOR CARRYING OUT THE FORMATION PROCESS OF STRUCTURES FROM PCM ON THE HEATED EQUIPMENT

The experience of development control systems for the process of forming of structures from PCM is presented, the main attention is paid to the development of software for such systems. The requirements for the software from the process technologists, hardware features of the system implementation, different types of sensors connected to the system, methods of their use are considered. The scheme of control of the vacuum pressure value during PCM molding is given. The description of structural blocks of the program of control of molding is given.

Keywords: PCM, heated equipment, control system, methods of control of technological properties, vacuum forming, out-autoclave methods of forming.

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

Анализ состояния науки и технологий показывает, что в мире активно развивается и продолжит развиваться направление по созданию новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–3]. Рост применения композиционных материалов в авиационной технике и соответствующий рост объемов производства конструкций из них требуют повышения автоматизации технологических процессов, что позволит снизить их трудоемкость и энергоемкость [4, 5]. Длительное время в технологии изготовления конструкционных ПКМ для авиационных деталей преобладал препрегово-автоклавный способ [6], который позволяет обеспечивать высокий уровень физико-

механических свойств и низкую пористость. Однако данный способ обладает высокой энергоемкостью и стоимость изготовления деталей увеличивается из-за использования дорогостоящих автоклава, оснастки и технологических материалов [7–9]. Вопрос снижения издержек при сохранении качества в производстве деталей из ПКМ заставляет искать пути внедрения новых материалов и энергосберегающих технологий. В связи с этим для изготовления слабо- и средненагруженных деталей из ПКМ стали широко применяться безавтоклавные методы формования. Процесс формования деталей из ПКМ под вакуумным мешком на обогреваемой оснастке позволяет получать крупногабаритные детали сложной формы без использования дорогостоящего автоклава и снизить энергозатраты [10–12]. Для проведения процесса формования деталей из ПКМ в том числе и на обогреваемой оснастке в УНТЦ ВИАМ разработаны системы управления, в состав которых входит и специально разработанное программное обеспечение.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Говоря о программе управления для проведения процесса формования конструкций из ПКМ на обогреваемой оснастке, часто приходится обсуждать не только программное обеспечение, а всю систему управления процессом формования конструкций, состоящую из вычислительной электроники, силовых электронных компонентов, датчиков и программного обеспечения. На рис. 1 представлены два примера разных систем управления формованием деталей из ПКМ.



Рис. 1. Восьмиканальная система управления крупногабаритными обогреваемыми оснастками мощностью до 70 кВт (а), мобильная система управления процессом формования, предназначенная для ремонта изделий из ПКМ (б)

На первом этапе разработки программы управления необходимо сформировать требования к программе. Это один из наиболее ответственных этапов, на котором необходимо вовлечь как можно больше заинтересованных лиц для обсуждения требований к будущей системе целиком и к программе управления, в частности.

Большую часть требований к программному обеспечению можно условно разделить на две основные категории:

- технологические требования, поступившие от технологов, отвечающих за разработку и проведение режима формования конструкций из ПКМ;
- требования, связанные с исполнением системы управления на конкретной электронной и вычислительной базе.

К требованиям технологов к программе чаще всего относятся:

- возможность заранее задавать и сохранять в памяти технологические режимы;
- возможность корректировки заданного технологического режима в процессе проведения режима;
- режим «пауза», во время которого поддерживается достигнутое значение температуры оснастки, технологический режим не сбрасывается и позволяет продолжить процесс формования;
- надежность системы – оповещение технолога о выходе параметров процесса за границы режима или при аварийных ситуациях;
- сохранение всех параметров проведенного режима на жестком диске или в памяти устройства;
- возможность просмотра параметров выполненных режимов;
- возможность экспортировать данные параметров режима в файлы с форматами, поддерживаемыми офисными приложениями, – например, Excel и Word компании Microsoft для создания отчетов, актов и другой необходимой заказчику документации.

С точки зрения электронного оснащения системы управления программное обеспечение должно удовлетворять следующим требованиям:

- работа программы на заданной платформе управляющего контролера или компьютера, т. е. совместимость с операционной системой;
- подключение к системе разных типов датчиков для контроля технологических параметров процесса формования.

Из требований, представленных ранее, возникает ряд задач, которые необходимо решить при проектировании программы управления. Некоторые задачи и способы, которые применены при их решении, рассмотрены далее.

Результаты и обсуждение

К системе управления процессом формования ПКМ требуется подключать разные датчики. Рассмотрим некоторые датчики и методы их использования.

Температурные датчики (термопары, термометры сопротивления) для контроля температуры процесса. Если подключено несколько термопар, то возможно их размещение в разных точках оснастки или детали для лучшего контроля температурного поля. Существуют разные варианты управления процессом нагрева с использованием значений, полученных с нескольких температурных датчиков: по значению одного выбранного датчика; по минимальному или максимальному значению; по значению, полученному усреднением температуры с нескольких датчиков.

Датчики измерения вакуумного давления. Для контроля вакуумного давления в технологическом пакете под вакуумным мешком датчик должен быть по возможности подключен на максимальном удалении от точки подачи вакуума [13]. Обладая возможностью измерять и регулировать значение вакуумного давления в процессе формования, можно реализовать технологические приемы для улучшения свойств ПКМ на стадии отверждения, в том числе режим пульсирующего вакуума, когда разряжение под мешком меняется в определенном интервале в течение всего процесса [14].

Принцип действия метода управления величиной вакуумного давления в процессе формования ПКМ применен на обогреваемой оснастке и основан на изменении уровня вакуума под вакуумным мешком путем попеременного подключения через электромагнитные клапаны вакуумной линии (1) и атмосферного давления (2). Контроль величины вакуума под вакуумным мешком осуществляется датчиком контроля вакуума (5) и для визуального контроля стрелочным вакуумметром (4) (рис. 2) [15].

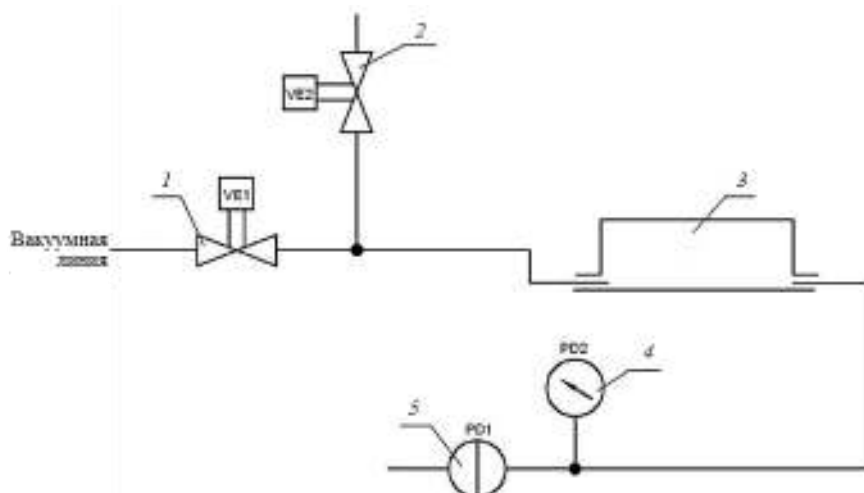


Рис. 2. Схема управления величиной вакуумного давления при формовании ПКМ на обогреваемой оснастке:

1 – клапан вакуумный электромагнитный на вакуумной линии; 2 – клапан вакуумный электромагнитный соединения с атмосферой; 3 – вакуумный мешок на обогреваемой оснастке; 4 – вакуумметр стрелочный; 5 – датчик контроля вакуума

Емкостные датчики для измерения значения диэлектрической проницаемости формуемого материала. Информация о значении диэлектрической проницаемости может быть использована для контроля степени отверждения деталей из ПКМ (рис. 3) [16].

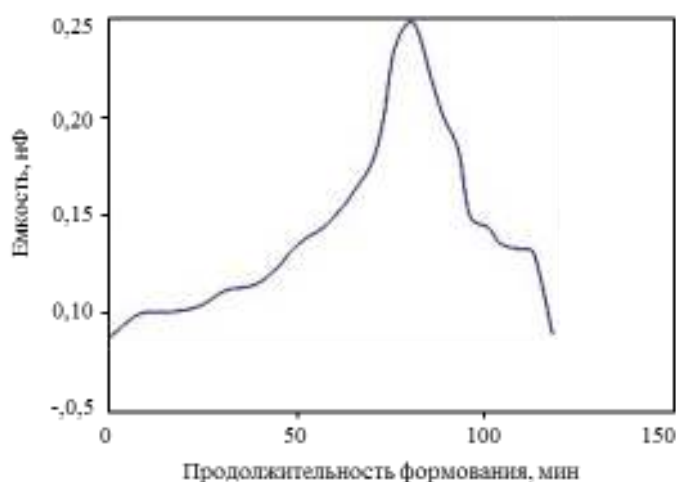


Рис. 3. Изменение значения показаний емкостного датчика в процессе формования детали из стеклопластика СТ-69Н

Ультразвуковые датчики для контроля процесса формования [16, 17]. При этом датчики могут встраиваться в технологические оснастки без повреждения структуры

формуемой детали. Ультразвуковые методы обладают методологической простотой и являются универсальными по отношению к материалам как с проводящими, так и с диэлектрическими свойствами, что позволяет непосредственно определять с помощью известных зависимостей вязкоупругие характеристики материала, опираясь на измеренные значения скорости распространения и коэффициента затухания ультразвука. На рис. 4 представлен пример изменения амплитуды ультразвуковой волны при контроле отверждения ПКМ. Видно, что в начале процесса формирования при повышении температуры нагрева происходит снижение вязкости связующего – линия графика изменения амплитуды снижается и проходит минимум (рис. 4, а). При дальнейшем увеличении температуры и с началом процесса гелеобразования вязкость связующего начинает расти, кривая значений амплитуды поднимается вверх и при выдержке на заданном уровне температуры нагрева постепенно переходит в постоянную величину, отличающуюся от среднего значения не более чем на 2–3%, что указывает на окончание процесса отверждения полимерной матрицы.

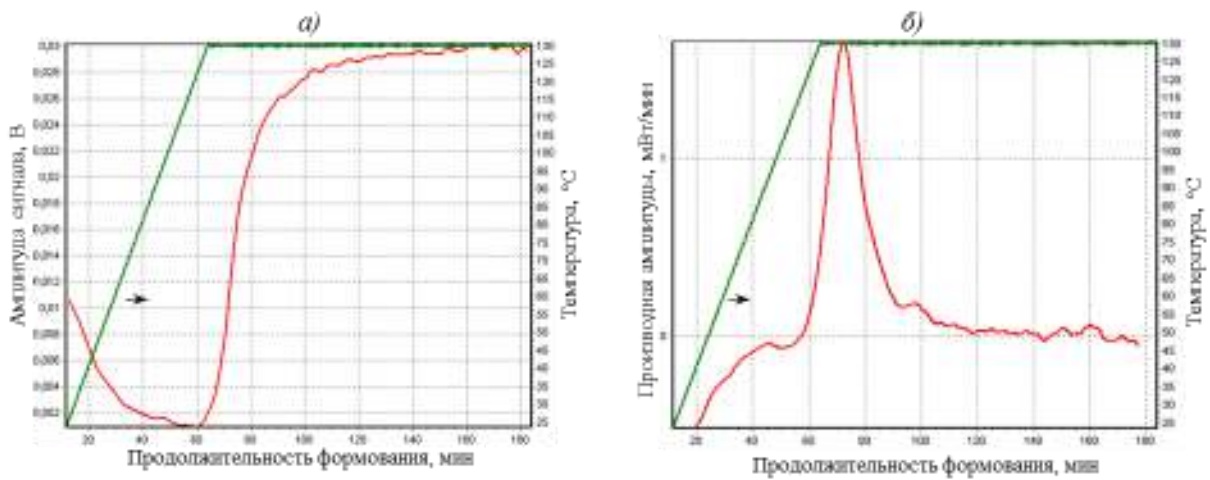


Рис. 4. Изменение амплитуды ультразвукового сигнала (—) в процессе формирования стеклопластика СТ-69Н:

а – фактическое значение амплитуды ультразвукового сигнала; б – производная изменения амплитуды

Приведение полученных значений амплитуды ультразвукового сигнала через производную второго порядка позволяет получить более наглядное изменение амплитуды в процессе формирования отверждения полимерной матрицы (рис. 4, б).

Трудность подключения и опроса по программе такого разнообразия датчиков заключается в различии подходов к работе с ними: каждый датчик имеет свое время отклика, что отражается на времени, затрачиваемом на опрос, при этом нельзя откладывать опрос других датчиков; датчики формируют разное количество информации (для датчика температуры это может быть простое числовое значение, для ультразвукового датчика – большой массив данных, описывающий акустические колебания). Отличаются также способы обработки и отображения данных с датчиков.

Для решения поставленной задачи в процессе проектирования программу структурно разбивали на несколько уровней. Нижний уровень программы отвечал за взаимодействие с аппаратной частью системы. Для взаимодействия с этим уровнем спроектировали специальный интерфейс – так называемый слой аппаратных абстракций (Hardware Abstraction Layer – HAL), предназначенный для сокрытия особенностей аппаратного обеспечения от другой части программного кода, реализующего основную

логику работы. Такой интерфейс позволяет уменьшить количество строк кода, которые придется модифицировать при внесении изменений в аппаратную часть системы. Данный интерфейс, разработанный для управляющей программы, представляет собой набор функций, ориентированных на асинхронную работу. При вызове асинхронных функций кроме необходимых параметров запроса также передается ссылка на функцию, содержащую код, который будет выполнен после осуществления запроса к оборудованию и получения ответа с требуемыми данными. Асинхронный стиль программирования увеличивает сложность проектируемого программного обеспечения, что, соответственно, ведет к увеличению трудоемкости, а также времени, затраченному на создание и отладку управляющей программы, но является необходимым условием при взаимодействии с более медленным контроллером аппаратной части. В связи с этим при реализации уровня HAL приходится создавать параллельный поток, в котором происходит непосредственный обмен пакетами данных с аппаратной частью системы. При этом длительное (относительно верхних уровней программы) ожидание ответа от оборудования не сказывается на работоспособности всей программы. Для облегчения работы с параллельными потоками можно воспользоваться разными готовыми решениями – например, использовать в проекте стандарты OpenMP, OpenCL или подключать специальные библиотеки, такие как OmniThreadLibrary, которые берут на себя рутинную и трудоемкую работу по созданию и синхронизации потока, организации эффективной коммуникации с ним: обмен сообщениями, отслеживание состояния, остановка и уничтожение потока. На этом же уровне структуры программы происходит конвертация данных из специфичной для аппаратной части формы в универсальный вид для обработки на следующем уровне.

Следующий уровень структуры реализует основную логику программы (бизнес-логику) и предназначен: для выполнения работ с файлами – загрузка и сохранение заданных режимов формования, сохранение данных, полученных с различных датчиков, а также для выполнения процесса формования по выбранному режиму и в зависимости от показаний датчиков принятия решений для предусмотренных ситуаций. Этот уровень является одним из важнейших и обладает множеством опций для точной настройки системы управления. Одна из таких опций – выбор алгоритма работы регулятора нагрева оснастки. В программе реализованы несколько известных и широко используемых в промышленных регуляторах алгоритмов: П-, ПИ- и ПИД-регуляторы. В зависимости от характеристик используемой оснастки (мощность встроенного нагревательного элемента; инерционность, связанная с массой и материалом оснастки) возможно выбрать наиболее подходящий вариант регулятора для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса.

Самый верхний уровень структуры программы предназначен для взаимодействия с пользователем системы управления формированием деталей из ПКМ. Данный уровень реализует графический интерфейс системы и отвечает за правильную передачу параметров процесса формования на нижележащие уровни. Графический интерфейс пользователя разделен на несколько режимов. Каждый режим обладает своим окном с набором элементов управления и может быть вызван из главного окна программы. Режим предварительного ввода программ формования предназначен для настройки всех параметров конкретного процесса. Окно управления проведением процесса формования предназначено для запуска, остановки, оперативного изменения режима, вывода информации о текущих значениях температуры оснастки, уровня вакуума, времени, прошедшего от начала процесса, сообщений об ошибках и отклонениях от режима и т. д. Режим архива предназначен для просмотра данных сохраненных процессов, отображения данных в удобной для анализа форме, экспортирования данных.

Системы управления процессом формования конструкций как правило являются многоканальными системами. Такая система может управлять параллельно несколькими процессами формования конструкций из ПКМ. Современные электронные модули обладают большими и часто избыточными ресурсами в компактном корпусе – например, управляющий контроллер, встроенный в систему, обладает большими вычислительными ресурсами и способен обрабатывать информацию с множества однотипных каналов. Модули ввода-вывода выпускаются с множеством выходов и создают возможность подключения большого количества датчиков. Вследствие этого становится возможным создание многоканальных систем управления и в программе управления удобно выделить структуру или объект, полностью контролирующей работу одного канала. Создав в программе такой объект, можно увеличивать количество каналов системы простым копированием объекта в соответствии с количеством каналов, реализованных в системе. Количество каналов может иметь жесткое ограничение по суммарной мощности, которую способна отдавать система в обогреваемые оснастки.

Не следует забывать о надежности системы. Программа управления должна периодически сохранять накопленные данные о процессе формования в постоянной памяти устройства. В случае сбоя технолог должен иметь возможность оперативно перезапустить систему и продолжить процесс формования. Программа управления также должна иметь возможность управлять аварийной сигнализацией, реализованной в системе для привлечения внимания оператора или технолога, и сообщать о внештатной ситуации – например, о выходе значения определенного параметра за установленные пределы.

В заключение можно привести пример разработанного восьмиканального автоматизированного комплекса для управления процессом формования ПКМ, в состав которого входят обогреваемые оснастки для производства деталей интерьера самолета Ту-204-200 (рис. 5).

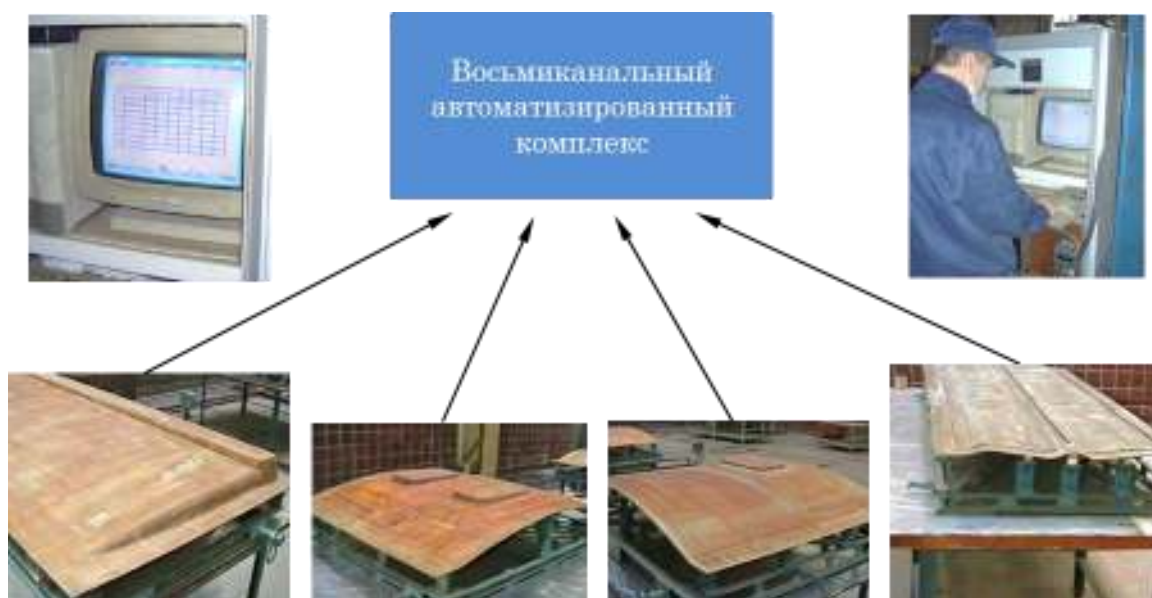


Рис. 5. Восьмиканальный автоматизированный комплекс с обогреваемыми оснастками для изготовления деталей интерьера самолета Ту-204-200

В представленном комплексе реализованы идеи, изложенные в данной статье, которые получили развитие при разработке последующих систем.

Заключения

Применение разработанных систем в производстве для проведения процесса формования конструкций из ПКМ на обогреваемой оснастке повысило степень автоматизации технологических процессов, что сказалось на энергоёмкости процесса и качестве получаемых деталей. Мобильные системы формования конструкций из ПКМ нашли применение для ремонта композиционных материалов в авиационной технике, машиностроении и других областях техники.

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. №3. С. 97–105.
3. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
4. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
5. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Свойства полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе плетеных преформ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5.
6. 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.
7. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М. и др. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №10. С. 27–35.
8. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №2 (38). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7.
9. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
10. 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.
11. Григорьев М.М., Коган Д.И., Гусев Ю.А., Гуревич Я.М. Особенности изготовления ПКМ методом вакуумного формования препрега // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 67–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-67-71.
12. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
13. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. №4 (3). С. 834–839.

14. Мосиук В.Н., Ворвуль С.В., Томчани О.В. Дифференциальное вакуумное формование как усовершенствованная технология вакуумного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №4 (49). С. 37–41. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-37-41.
15. Качура С.М., Бурхан О.Л., Рахматуллин А.Э., Никитин Е.К. Особенности микропроцессорного управления технологическими параметрами процесса вакуумного формования изделий из ПКМ // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. №4-4. С. 815–818.
16. Антюфеева Н.В., Алексашин В.М., Столянков Ю.В. Определение степени отверждения ПКМ методами термического анализа // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №3 (36). С. 79–83. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83.
17. Никитин К.Е. Новые микропроцессорные средства для неразрушающего контроля структуры, состава и свойств полимерных композитов на различных стадиях их производства // *Заводская лаборатория*. 1993. Т. 59. №3. С. 31–34.