

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА  
АВТОКЛАВНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ  
ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПАКЕТЕ**

**О. С. Дмитриев<sup>1</sup>✉, Ф. А. Насонов<sup>2,3</sup>, Б. Б. Морозов<sup>2</sup>, Н. Ю. Маренков<sup>1</sup>**

*Кафедра «Физика», phys@tstu.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), Тамбов, Россия;*

*ОКБ Сухого ПАО «ОАК» (2), Москва, Россия;*

*ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) (3), Москва, Россия*

**Ключевые слова:** автоклавное формование; математическая модель; полимерный композиционный материал; процесс отверждения; сотовый наполнитель.

**Аннотация:** Создание адекватных математических моделей технологических процессов автоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с разнородной структурой в технологическом пакете является актуальной задачей и способствует возможности проектировать производственные процессы с оптимальными технологическими параметрами, с достаточным совершенством технико-экономических показателей, а также необходимым уровнем качества получаемых изделий. Рассмотрены один из наиболее распространенных в авиастроении вариантов структуры изготавливаемого изделия из ПКМ с сотовым наполнителем и особенности технологического пакета его изготовления методом автоклавного формования. Предложена математическая модель теплопереноса в слоях технологического пакета и химической кинетики в слоях ПКМ, приемлемая для разработки алгоритма проектирования оптимальных режимов отверждения ПКМ.

---

### Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря своим высоким показателям удельных характеристик конструктивных свойств, высокой технологичности способов формования изделий различной функциональности и неоспоримым преимуществам по сравнению с традиционными металлическими материалами все шире применяются в различных областях техники, прежде всего в авиационной промышленности. Объем применения ПКМ в конструкции планера ряда современных и перспективных гражданских и боевых самолетов в настоящее время начинает превышать 50 % по массе и 80 % по площади внешнего контура летательного аппарата (ЛА) [1–3]. Вместе с тем особенностью изготовления изделий из ПКМ, имеющих разнородную структуру, является специальный режим их формования автоклавным методом, так как в процессе нагрева происходит неравномерное распределение температурных полей во всем объеме подготовленного к формованию пакета. Для изделий со сложной структурой, включающей сотовые наполнители, разработать технологический процесс изготовления является непростой задачей, так как необходимо обеспечить требуемое каче-

ство изделия, представляющего собой комбинацию конструктивно различных элементов со специфическими технологическими и теплофизическими характеристиками (ТФХ) [2, 4].

Основными параметрами технологических процессов, которыми можно управлять в процессе переработки полуфабрикатов ПКМ в изделия, являются температура, давление и время. Необходимое распределение температурных полей в системе «рабочее тело (воздушная среда в автоклаве) – оснастка – технологический пакет – заготовка детали» и конверсионных полей в заготовке имеет определяющее значение для достижения оптимальных характеристик ПКМ в изделии.

Один из подходов, позволяющих наблюдать и исследовать распределение температурных и конверсионных полей при отверждении изделия из ПКМ – математическое моделирование процесса отверждения с учетом всех особенностей их производства. Таким образом, актуальной задачей научно-обоснованного подхода к моделированию и проектированию технологических процессов переработки ПКМ в изделия авиационного назначения является создание адекватных математических моделей данных процессов [5 – 12].

### **Объект исследования и технологический процесс**

Одним из широко применяемых ПКМ в составе сложных авиационных конструкций рассматривается углепластик ВКУ-30 на основе клеевого связующего марки ВСК-14-3 разработки Всероссийского института авиационных материалов (НИЦ «Курчатовский институт»– ВИАМ) и однонаправленного высокопрочного армирующего углеродного наполнителя (волокна) [13, 14]. Препрег указанного углепластика формируется пропиткой эпоксидными композициями клеевого связующего однонаправленных нетканых наполнителей (лент). Углепластик предназначен для изготовления деталей конструкционного назначения монолитной и/или трехслойной структуры за один технологический цикл формования обшивки и склеивания с сотовым наполнителем без использования дополнительных клеевых материалов и решения вопроса совместимости клея и связующего препрега [15]. При этом прочность пластика, отформованного на сотовом наполнителе, соответствует необходимым показателям, поэтому данный материал нашел применение при производстве сложных, крупногабаритных деталей наружных обшивок панелей крыла и средней части фюзеляжа, а также деталей горизонтального оперения летательных аппаратов разработки ОКБ Сухого [14]. Базовый минимальный режим отверждения указанного материала: 3 часа выдержки при температуре 175 °С и давлении формования 6 атм.

Метод автоклавного формования, применяемый для отверждения углепластика ВКУ-30, является одним из самых распространенных при изготовлении изделий из ПКМ в авиационной промышленности благодаря возможности обеспечения высокой степени уплотнения слоев полуфабриката на основе термореактивных связующих, возможности формообразования заготовок сложных конфигураций, в том числе со структурой, отличающейся как существенным изменением толщины, так и сочетанием нескольких типов конструкции (монолитная и сэндвич-структура). Особенность автоклавного метода – возможность использования формообразующей оснастки открытого (незамкнутого) типа из металлических или композиционных материалов, в том числе имеющей достаточно крупные габариты. Для обеспечения создания и распределения формирующих усилий применяется мембрана (вакуумный чехол), устанавливаемая в составе герметичного технологического пакета с использованием разделительных и дренажных слоев на пакет-заготовку детали. Различия теплофизических свойств основных материалов (полуфабрикатов ПКМ, сотовых наполнителей), вспомогательных (технологиче-

ских) материалов, материалов оснастки, особенности реокинетических зависимостей связующих ПКМ, а также особенности структуры и геометрических характеристик изготавливаемых деталей необходимо учитывать при назначении режимов формования автоклавным методом. Недостаточный учет указанных особенностей может приводить к отклонению от предъявляемых требований качества изготавливаемых изделий (нарушения структуры материала, коробления, технологические и остаточные механические напряжения, приводящие к снижению механической статической и усталостной стойкости конструкций и др.).

Технологический пакет, предназначенный для формования изделий из ПКМ, представлен на рис. 1. Основа укладки – формообразующая оснастка 1, которая может быть изготовлена из металла, имеющего высокую теплопроводность или ПКМ, обладающего достаточно низкой теплопроводностью, что существенно влияет на ход процесса отверждения. Формообразующая оснастка, как правило, имеет сложную конфигурацию, повторяющую форму поверхности будущего изделия из ПКМ, и в своей основе имеет достаточно большие плоские участки, превышающие толщину изделия в 10 раз. Это позволяет считать изделие неограниченной пластиной и использовать одномерную модель распространения тепла в изделии по координате  $x$ .

На формообразующую оснастку 1 сначала укладывается антиадгезионная пленка (на рис. 1 не показана из-за ее малой порядка 50 мкм толщины), затем проводится укладка слоев препрега 2 соответствующих размеров согласно схеме армирования ПКМ. Слои препрега прикатываются валиком до их приклеивания для выдавливания воздуха из межслойного пространства. Затем укладывается предварительно вырезанный под нужный размер сотовый наполнитель 3. На него снова укладываются слои препрега 4 нужного количества для создания необходимой толщины изделия. Для придания нужной формы верхней поверхности изделия и создания равномерного давления на верхний слой препрега укладывается сначала перфорированная пленка (на рис. 1 не показана из-за ее малой толщины), затем металлическая или из ПКМ цулага 5. На полученную технологическую заготовку укладывается дренажный слой 6 в виде нетканого синтепонового материала или нескольких слоев стеклоткани. Дренажный слой служит для улучшения условий вакуумирования сотового наполнителя, осуществления прижима и приклеивания препрега углепластика к сотовому наполнителю, выравнивания давления по всей поверхности изделия и впитывания выдавленных излишков связующего. Весь технологический пакет накрывается вакуумной пленкой 7, загерметизированной жгутовым герметиком с встроенным штуцером 8 и затем приклеивается жгутовым герметиком к формообразующей оснастке. Проверяется герметичность полученного технологического пакета.

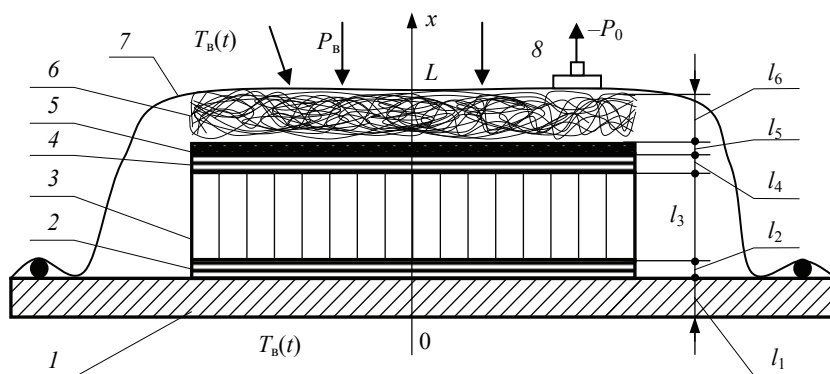


Рис. 1. Схема технологического пакета

Собранный технологический пакет на формообразующей оснастке перемещается на транспортное средство и закатывается в автоклав, подключаются все необходимые разъемы и соединения, и затем начинается процесс. Процесс отверждения включает в себя нагрев рабочего тела (воздушной среды в автоклаве) по определенному температурно-временному режиму  $T_B(t)$ , контролируемому с помощью термодатчиков, встроенных в оснастку и другие необходимые для контроля места. В определенные моменты времени откачивается воздух из-под вакуумного мешка –  $P_0$  и создается избыточное давление внутри автоклава  $P_B$ .

### Математическая модель

При математическом моделировании теплопереноса в технологическом пакете учитывается, что не все слои пакета оказывают существенное влияние на распространение тепла, и из рассмотрения исключаются тонкие полимерные пленки. При этом металлическую цулагу приходится учитывать, так как она, несмотря на малую толщину, обладает высокой объемной теплоемкостью и значительно влияет на перенос тепла. Считается, что между технологическими слоями пакета осуществляется идеальный тепловой контакт, то есть тепловой поток на границах раздела слоев не имеет разрывов. Следовательно, математическая модель должна иметь граничные условия сопряжения слоев.

Отверждаемое изделие с внешней стороны обогревается потоком воздуха при температуре  $T_B(t)$ , то есть осуществляется вынужденный конвективный теплообмен по закону Ньютона, и имеет место граничное условие третьего рода. Значения температуры греющего воздуха  $T_B(t)$  являются управлением  $U(t)$ , при помощи которого отверждаемый материал подвергается заданному, заранее рассчитанному температурно-временному воздействию, например рассчитанному для других ПКМ в работах [10, 11].

Математическую модель теплопереноса и химической кинетики в процессе термического отверждения в многослойном технологическом пакете при автоклавном формовании представим в виде системы следующих дифференциальных уравнений теплопроводности и конвективного теплообмена, описывающих теплоперенос в следующих слоях пакета:

1 – в формообразующей оправке ( $i = 1$ )

$$C_1(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_1(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$T \equiv T(x, t), \quad 0 < x < L_1, \quad 0 < t < t_k, \quad L_1 = l_1;$$

2 – теплопереноса в препреге ( $i = 2$ )

$$C_2(T, \beta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_2(T, \beta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_{n2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t}, \quad (2)$$

$$T \equiv T(x, t), \quad L_1 \leq x < L_2(t), \quad L_2 - L_1 = l_2, \quad 0 < t < t_k;$$

– кинетики отверждения препрега

$$\frac{\partial \beta_2}{\partial t} = \begin{cases} \varphi_2(\beta) \cdot \exp(-E_2(\beta)/RT), & \beta < 1, \\ 0, & \beta = 1, \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta_2 \equiv \beta_2(x, t), \quad \beta_2(x, 0) = \beta_{02}(x), \quad L_1 \leq x < L_2(t), \quad L_2 - L_1 = l_2, \quad 0 < t \leq t_k;$$

3 – теплопереноса в сотовом заполнителе ( $i = 3$ )

$$C_3(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_3(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (4)$$

$$T \equiv T(x, t), \quad L_2(t) \leq x < L_3, \quad L_3 - L_2 = l_3, \quad 0 < t < t_k;$$

4 – теплопереноса в препреге ( $i = 4$ )

$$C_4(T, \beta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_4(T, \beta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_{\text{п4}} \frac{\partial \beta_4}{\partial t}, \quad (5)$$

$$T \equiv T(x, t), \quad L_3 \leq x < L_4(t), \quad L_4 - L_3 = l_4, \quad 0 < t < t_k;$$

– кинетики отверждения препрега

$$\frac{\partial \beta_4}{\partial t} = \begin{cases} \varphi_4(\beta) \cdot \exp(-E_4(\beta)/RT), & \beta < 1, \\ 0, & \beta = 1, \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta_4 \equiv \beta_4(x, t), \quad \beta_4(x, 0) = \beta_{04}(x), \quad L_3 \leq x < L_4(t), \quad L_4 - L_3 = l_4, \quad 0 < t \leq t_k;$$

5 – теплопереноса в цулаге ( $i = 5$ )

$$C_5(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_5(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (7)$$

$$T \equiv T(x, t), \quad L_4(t) \leq x < L_5, \quad L_5 - L_4 = l_5, \quad 0 < t < t_k;$$

6 – теплопереноса в дренажном слое ( $i = 6$ )

$$C_6(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_6(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (8)$$

$$T \equiv T(x, t), \quad L_5 \leq x < L_6(t), \quad L_5 - L_4 = l_5, \quad 0 < t < t_k.$$

Начальные и граничные условия системы:

$$T(x, 0) = f(x), \quad 0 \leq x \leq L_6, \quad (9)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha [T_B(t) - T(0, t)], \quad 0 < t \leq t_k, \quad (10)$$

$$-\lambda_6 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_6} = \alpha [T_B(t) - T(L_6, t)], \quad 0 < t \leq t_k, \quad (11)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_i-0} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L_i+0}, \quad 0 < t \leq t_k, \quad i = 1, 2, \dots, 5, \quad (12)$$

$$T(x, t) \Big|_{x=L_i-0} = T(x, t) \Big|_{x=L_i+0}, \quad 0 < t \leq t_k, \quad i = 1, 2, \dots, 5; \quad (13)$$

– управление

$$U(t) = T_B(t),$$

где  $C$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $E$  – эффективная энергия активации, Дж/моль;  $f$  – начальное распределение температуры, К;  $L$  – толщина изделия, м;  $Q_{\text{п}}$  – полный тепловой эффект, Дж/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $x$  – пространственная координата, м;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\beta$  – степень отверждения;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $\varphi$  – кинетическая функция процесса отверждения; индексы: в – воздух; к – конечный.

Теплофизические характеристики  $C$  и  $\lambda$  для всех слоев, кроме препрега, являются функциями температуры  $C(T)$  и  $\lambda(T)$ , но для слоев препрега необходимо учитывать зависимость ТФХ от температуры и степени отверждения  $C(T, \beta)$  и  $\lambda(T, \beta)$  [6, 11, 12]. Математическая модель кинетики процесса отверждения связующего представляет собой уравнение формальной кинетики с температурной зависимостью Аррениуса. Функциональная зависимость скорости и порядка реакции в модели описывается произвольной экспериментально определяемой кинетической функцией  $\varphi$ .

Завершающий этап математического моделирования любого процесса – идентификация параметров модели, включая теплофизические и кинетические характеристики, которые определяются экспериментально с помощью специальных методов и приборов [6, 11, 12]. Поэтому исследование теплофизических и кинетических характеристик ПКМ при отверждении, компьютерное моделирование процесса и расчет оптимального температурно-временного режима отверждения будем в дальнейшем проводить с помощью специально разработанной информационно-измерительной системы процесса отверждения, содержащей в своем составе специальные аппаратно-технические средства, а также математическое, алгоритмическое, метрологическое и программное обеспечение, ориентированное на решение прямых, обратных и оптимизационных задач [16, 17].

### Заключение

Разработана математическая модель отверждения изделий из ПКМ, получаемых методом автоклавного формования, пригодная для дальнейшего использования в расчетах температурно-конверсионных полей отверждающегося композита. Решение системы уравнений (1) – (13) позволит получить температурное распределение в изделии  $T(x, t)$ , скорость отверждения  $\partial\beta/\partial t$  и степень отверждения  $\beta$  как функции времени и координаты внутри композита и тем самым как бы заглядывать внутрь материала при его отверждении. Кроме того, компьютерное моделирование процесса отверждения позволит просчитывать различные варианты ведения процесса и проводить анализ процесса с оценкой преимуществ и недостатков полученного режима для данного материала и выбирать правильную стратегию поиска оптимального режима. Это позволяет создавать крупногабаритные изделия сложной структуры из ПКМ с максимально возможными прочностными характеристиками и минимальной стоимостью, обеспечив максимальную производительность работы оборудования.

### Список литературы

1. Каблов, Е. Н. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации / Е. Н. Каблов, В. В. Антипов // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 10. – С. 907 – 916. doi : 10.31857/S0869587323100055
2. Parveez, B. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review / B. Parveez, M. I. Kittur, I.A. Badruddin, S. Kamangar, M. Hussien, M. A. Umarfarooq // Polymers (Basel). – 2022. –Vol. 14(22). – P. 5007. doi : 10.3390/polym14225007

3. Wu, Y. Application of carbon fiber composite materials in aircraft // *Applied and Computation Engineering*. – 2024. – Vol. 61, No. 1. – P. 245– 248. doi: 10.54254/2755-2721/61/20240969

4. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин [и др.]; под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия.– 2008. – 560 с.

5. Мищенко, С. В. Математическое моделирование процесса отверждения изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумного автоклавного формования в технологическом пакете / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, А. В. Шаповалов, В. Н. Кириллов // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 7 – 19.

6. Дмитриев, О. С. Моделирование теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / О. С. Дмитриев, А. А. Барсуков, Д. Я. Баринов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2024. – Т. 31, № 2. – С. 355 – 370.

7. Morozov, V. V. Development of the algorithm for modelling autoclave curing conditions and calculation of temperature fields into elements of sandwich structures / V. B. Morozov, F. A. Nasonov, S. V. Bukharov // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, – Sevastopol, 2020. – P. 022061. – doi: 10.1088/1757-899X/971/2/022061

8. Дмитриев, О. С. Моделирование кинетических характеристик процесса отверждения полимерных композитов на основе нейронной сети / О. С. Дмитриев, А. А. Барсуков // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. –2021. – Т. 27, № 1. – С. 31 – 41. doi:10.17277/vestnik.2021.01.pp.031-041

9. Хасков, М. А. Моделирование процессов отверждения термореактивных матриц на примере сложнопрофильного образца / М. А. Хасков, Е. В. Сафронов // *Труды ВИАМ*. – 2019. – Т. 84, № 12. – С. 46 – 54. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-46-54

10. Дмитриев, О. С. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов/ О. С. Дмитриев, В. Н. Кириллов, А. О. Дмитриев, А. В. Зуев // *Тепловые процессы в технике*. – 2013. – № 10. – С. 467 – 475.

11. Dmitriev, O. S. Thermo-chemical analysis of the cure process of thick polymer composite structures for industrial applications / O. S. Dmitriev, A. A. Zhyvenkova, A. O. Dmitriev // *Materials and Technologies*. – 2016. – № 2. –P. 53 – 60. doi: 10.17277/amt.2016.02.pp.053-060

12. Живенкова, А. А. Алгоритмическое и программное обеспечение информационно-измерительной системы исследования теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / А. А. Живенкова, О. С. Дмитриев // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2014. – № 4(54). – С. 212 – 217.

13. Куцевич, К. Е. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов / К. Е. Куцевич, Л. А. Дементьева, Н. Ф. Лукина // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 8(44) – С. 52 – 59. doi: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7

14. Старков, А. И. Разработка композиционного материала клеевого на основе альтернативного углеродного жгутового наполнителя марки УМТ49S-12К-EP и клеевого связующего марки ВСК-14-3 / А. И. Старков, К. Е. Куцевич, Т. Ю. Тюменева // *Труды ВИАМ*. – 2020. – № 6-7(89) – С. 62 – 71. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-62-71

15. Морозов, Б. Б. Особенности технологии изготовления деталей из армированных пластиков на основе клеевых препрегов / Б. Б. Морозов, А. А. Филатов // *Адгезионные материалы : сб. докладов науч.-техн. конф. (ВИАМ)*. – 2016. – С. 10 – 25.

16. Интегрированная информационно-измерительная система исследования свойств и расчета режимов отверждения полимерных композитов / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, А. О. Дмитриев, И. С. Касатонов, С. О. Дмитриев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 230 – 240.

17. Dmitriev, O. S. Computer-Measuring System for Research into Properties of Glutinous Prepregs and Calculation of Curing Cycles of the Polymer Composite Materials on Their Base / O. S. Dmitriev, S. V. Mischenko, A. O. Dmitriev, V. N. Kirillov // Polymer Science, Series D. – 2010. – Vol. 3, No. 1. – P. 20 – 25. doi: 10.1134/S199542121001003X

---

## **A Mathematical Model of the Autoclave Curing Process of a Polymer Composite Material Product with a Honeycomb Filler in the Technological Package**

**O. S. Dmitriev<sup>1</sup>✉, F. A. Nasonov<sup>2,3</sup>, B. B. Morozov<sup>2</sup>, N. Yu. Marenkov<sup>1</sup>**

*Department of Physics (1), phys@tstu.ru, TSTU, Tambov, Russia;  
Sukhoi Design Bureau of PJSC UAC (2), Moscow, Russia;  
MAI (National Research University) (3), Moscow, Russia*

**Keywords:** autoclave molding; mathematical model; polymer composite material; curing process; honeycomb core.

**Abstract:** The development of adequate mathematical models for the technological processes of autoclave molding for PCM products with a heterogeneous structure in the technological package is an urgent task and it contributes to the possibility of designing production processes with optimal technological parameters, with sufficient perfection of technical and economic indicators, as well as the required level of quality of finished products. The article considers one of the most common options in aircraft construction for a manufactured PCM product with a honeycomb filling structure and the features of the technological package of its manufacture by the autoclave molding method. A mathematical model of heat transfer in the layers of the technological package and chemical kinetics in the PCM layers is proposed, and it is acceptable for developing an algorithm for designing optimal PCM curing cycles.

### *References*

1. Kablov E.N., Antipov V.V. [The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation], *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Herald of the Russian Academy of Sciences], 2023, vol. 93, no.10, pp. 907-916, doi: 10.31857/S0869587323100055 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Parveez B., Kittur M.I., Badruddin I.A. et al. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review, *Polymers (Basel)*, 2022, vol. 14, no. 22, pp. 5007. doi: 10.3390/polym14225007

3. Wu, Y. Application of carbon fiber composite materials in aircraft, *Applied and Computation Engineering*, 2024, vol. 61, no. 1, pp. 245– 248. doi: 10.54254/2755-2721/61/20240969

4. Kerber M.L., Vinogradova V.M., Golovkin G.S. et al. *Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svoystva, texnologiya, Pod red. A.A. Berlin*. [Polymer composite materials: structure, properties, technology], St. Petersburg: Professiya, 2008, 560 p. (In Russ.)

5. Mishchenko S.V., Dmitriev O.S., Shapovalov A.V., Kirillov V.N. [Mathematical modeling of the process of curing products from polymer composite materials by vacuum autoclave molding in a technological package], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2001, vol. 7, no. 1, pp. 7-19. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Dmitriev O.S., Barsukov A.A., Barinov D.Ya. Modeling the thermophysical characteristics of polymer composites in the curing process, *Thermophysics and Aeromechanics*, 2024, vol. 31, no.2, pp. 329-343. doi : 10.1134/s0869864324020124
7. Morozov, B.B., Nasonov, F.A., Bukharov S.V. Development of the algorithm for modelling autoclave curing conditions and calculation of temperature fields into elements of sandwich structures, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Sevastopol, 2020, pp. 022061. doi : 10.1088/1757-899X/971/2/022061
8. Dmitriev O.S., Barsukov A.A. [Modeling the kinetic characteristics of the curing process of polymer composites based on a neural network], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 31-41. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.031-041
9. Khaskov M.A., Safronov E.V. [The optimization of thermosetting matrixes curing schedule on the example of complex shape sample], *Tr. Vseross. Inst. Aviats. Mater.* [Proceedings of VIAM], 2019, vol. 84. no. 12, pp. 46-54. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-46-54 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Dmitriev O.S., Kirillov V.N., Dmitriev A.O., Zuev A.V. [Determination of the optimal modes of curing of thick-walled products from polymer composites], *Teplovye processy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2013, no. 10, pp. 467-475. (In Russ.)
11. Dmitriev O.S., Zhyvenkova A.A., Dmitriev A.O. Thermo-chemical analysis of the cure process of thick polymer composite structures for industrial applications, *Advanced Materials and Technologies*, 2016, no. 2, pp. 53-60. doi:10.17277/amt.2016.02.pp.053-060
12. Zhyvenkova A.A., Dmitriev O.S. [Algorithmic and software support for the information and measurement system for studying the thermophysical characteristics of polymer composites during the curing process], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. 4(54), pp. 212-217. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kutsevich K.E., Dementyeva L.A., Lukina N.F. [Properties and purpose of polymer composite materials based on adhesive prepregs], *Tr. Vseross. Inst. Aviats. Mater.* [Proceedings of VIAM], 2016, vol. 44. no. 8, pp. 52-59. doi: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu. [Development of a composite adhesive material based on an alternative carbon rope filler of the UMT49S-12K-EP brand and an adhesive binder of the VSK-14-3 brand], *Tr. Vseross. Inst. Aviats. Mater.* [Proceedings of VIAM], 2020, vol. 89. no. 6-7, pp. 62-71. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-62-71 (In Russ., abstract in Eng.)
15. Morozov B.B., Filatov A.A. [Features of the technology of manufacturing parts from reinforced plastics based on adhesive prepregs], *Adgezionnye materialy. Sb. dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferencii (VIAM)*, [Adhesive materials. Proceedings of scientific and technical conference (VIAM)], 2016, pp. 10-25. (In Russ.)
16. Dmitriev O.S., Mishchenko S.V., Dmitriev A.O., Kasatonov I.S., Dmitriev S.O. [Integrated information-measuring system for study ing the properties and calculating the curing cycles of polymer composites], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 230-240. (In Russ., abstract in Eng.)
17. Dmitriev O.S., Mischenko S.V., Dmitriev A.O., Kirillov V.N. Computer-Measuring System for Research into Properties of Glutinous Prepregs and Calculation of Curing Cycles of the Polymer Composite Materials on Their Base, *Polymer Science, Series D*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 20-25. doi: 10.1134/S199542121001003X

## **Mathematisches Modell des Autoklavverfahrens für die Herstellung von Produkten aus Polymerverbundstoffen mit wabenförmigen Füllstoffen im technologischen Paket**

**Zusammenfassung:** Die Erstellung adäquater mathematischer Modelle technologischer Prozesse des Autoklavformens von Produkten aus polymeren Verbundmaterialien (PVM) mit heterogener Struktur im technologischen Paket ist eine aktuelle Aufgabe und trägt zur Möglichkeit bei, Produktionsprozesse mit optimalen technologischen Parametern zu entwerfen, die ein ausreichendes Maß an technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen sowie das erforderliche Qualitätsniveau der hergestellten Produkte aufweisen. Es ist eine der am häufigsten in der Luftfahrtindustrie verwendeten Varianten der Struktur des hergestellten Produkts aus PVM mit Wabenfüllung und die Besonderheiten des technologischen Pakets für dessen Herstellung mittels Autoklavformens betrachtet. Es ist ein mathematisches Modell des Wärmeübergangs in den Schichten des technologischen Pakets und der chemischen Kinetik in den Schichten von PVM vorgeschlagen, das für die Entwicklung des Algorithmus zur Gestaltung optimaler Aushärtebedingungen für PVM geeignet ist.

---

## **Modèle mathématique du processus de durcissement à l'autoclave d'un produit en matériau composite polymère avec agrégat en nid d'abeille dans un sac technique**

**Résumé:** La création des modèles mathématiques adéquats des processus technologiques de moulage autoclave de produits en matériaux composites polymères (MCP) avec une structure hétérogène dans l'ensemble technologique est une tâche urgente et contribue à la possibilité de concevoir des processus de production avec des paramètres technologiques optimaux, avec une perfection suffisante des indicateurs technico-économiques, ainsi qu'un niveau nécessaire de qualité des produits. Est examinée l'une des variantes les plus courantes dans la construction aéronautique de la structure du produit fabriqué à partir de MCP avec un agrégat en nid d'abeille et les caractéristiques du paquet technologique de sa fabrication par moulage autoclave. Est proposé un modèle mathématique du transfert de chaleur dans les couches de l'ensemble de processus et de la cinétique chimique dans les couches de MCP, acceptable pour le développement d'un algorithme de projection des modes de durcissement optimaux de MCP.

---

**Авторы:** *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Насонов Федор Андреевич* – кандидат технических наук, ведущий технолог отдела Научно-исследовательского отделения материалов и технологий, руководитель Научно-технического сектора Совета МС ОКБ Сухого ПАО «ОАК», доцент кафедры 1103, кафедры 101 Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Россия; *Морозов Борис Борисович* – заместитель начальника Научно-исследовательского отделения материалов и технологий – начальник отдела ОКБ Сухого ПАО «ОАК», Москва, Россия; *Маренков Никита Юрьевич* – аспирант кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.