

УДК 678-419

Н. И. ТЮКОВ, А. И. ДАУТОВ, Л. Н. ГРАЧЕВА, И. К. НИГМАТУЛЛИН

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АВТОКЛАВА ПРИ ВЫПАРИВАНИИ СВЯЗУЮЩЕГО

Рассматривается разработка модели процесса формования каркаса двери кабины вертолета из полимерных композиционных материалов в автоклаве с учетом конвективного теплообмена. Формование крупногабаритных многослойных конструкций; автоклав; конвекция; кинетика сушки; критерий Пекле

В настоящее время большая номенклатура деталей вертолета изготавливается из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Использование ПКМ позволяет обеспечить прочность и низкий удельный вес детали, что особенно важно в авиастроении. Одной из таких деталей является дверь кабины вертолета.

Формование каркаса двери кабины вертолета осуществляется в автоклаве. Качество двери кабины во многом определяется тепловым потоком. Источником тепла в автоклаве является ТЭН, заключенный в огнеупорный кожух. Формование каркаса двери происходит при непрерывном движении тепловых потоков. В каркасе можно выделить элементарный участок с длиной  $L_{yч}$ . По длине элементарного участка можно составить общее дифференциальное уравнение. При этом необходимо учесть три составляющих теплового потока, определяемых лучистым, кондуктивным и конвективным теплообменом. Величина конвективной составляющей зависит от скорости движения элементарного участка. Ее количественную оценку можно осуществить по величине критерия Пекле, который для нашего случая равен:

$$P_e = \frac{V_a L_{yч}}{a},$$

где  $V_a$  – объем автоклава, м<sup>3</sup>.

$a = 0,168 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – коэффициент температуропроводности;

$L_{yч}$  – длина элементарного участка.

Подставляя численные значения, получаем  $P_e = 2,976 \cdot 10^5$ , т.е. этой составляющей можно пренебречь. Учитывая, что каркас состоит из листов стеклоткани, пропитанной связующим (препрег), незначительной толщины  $h$ , мы имеем дело с типичным случа-

ем нагрева многослойного тела. Количественная проверка принятой гипотезы проводится по величине критерия БИО:

$$B_i = -\frac{\alpha h n}{\lambda},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи каркаса.

Подставляя численные значения, получаем, что в нашем случае  $B_i \approx 0,05$ . По данным для многослойных тел достаточно, чтобы величина  $B_i \leq 0,25$ . Это условие выполняется, следовательно, исследуемый процесс можно отнести к процессам формообразования «тонкого» тела в автоклаве с постоянной температурой.

Так как при первоначальном нагреве каркаса происходит выпаривание связующего, то в данном случае будет уместным общее уравнение влаготеплопереноса для сушки различных материалов:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \alpha \nabla^2 \theta + \frac{Em}{C} \frac{q}{C\gamma_0}, \\ \frac{dU}{dt} &= Q_m \nabla^2 U + Q_m^t \nabla^2 \theta + D \nabla^2 p, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\theta$  – температура каркаса;

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности;

$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$  – оператор Лапласа, где  $x, y, z$  – пространственные координаты каркаса;

$E$  – критерий фазового превращения связующего;

$m$  – теплота парообразования;

$C$  – приведенная теплоемкость каркаса;

$q$  – объемная мощность внутреннего источника тепла, создаваемого лучистым потоком при его проникновении во внутреннее сечение каркаса;

$\gamma_0$  — приведенный коэффициент содержания связующего;

$U$  — содержание связующего в каркасе;

$D$  — коэффициент молекулярного переноса пара;

$p$  — градиент избыточного давления паров;

$Q_m, Q_m^t$  — коэффициенты переноса массы под действием градиента перепада содержания каркаса и ее температуры.

Следует также отметить, что в практике математического описания различных процессов сушки широко используют и интегральные уравнения влагопереноса [1]. Такие уравнения описывают характер изменения во времени, средних по объему значения влагосодержания и температуры, т. е. они описывают кинетику процесса сушки.

Учитывая, что каркас двери собран из тонких пластин препрега, математическое описание процесса его сушки целесообразно произвести с помощью интегральных уравнений влагопереноса. Для получения таких уравнений обычно используют уравнение баланса тепла [2], которое составляется на основе первого уравнения системы (1).

Введя понятие общего интегрального количества связующего, удаляемого связующего из каркаса под действием градиентов содержания связующего, температуры и избыточного давления паров, мы можем записать уравнение баланса тепла в виде:

$$Q_{изл} + Q_m + Q_k = C\gamma_0 V \frac{d}{dt} + r \frac{dM}{dt}, \quad (2)$$

где  $Q_{изл}, Q_m, Q_k$  — тепло, получаемое за счет лучистого теплообмена, теплопроводности и конвективного обмена, соответственно;

$C$  — приведенная теплоемкость каркаса;

$\gamma_0$  — приведенный коэффициент содержания связующего;

$V$  — объем высушиваемого каркаса;

$\theta$  — среднее значение температуры связующего;

$M = \bar{U}\gamma_0 V$  — количество выпаренного (удаленного из каркаса) связующего.

Если учесть, что при высокоинтенсивных процессах усадкой материала можно пренебречь, то уравнение (2) можно представить в виде:

$$Q_{изл} + Q_m + Q_k = CP_k \frac{d\theta}{dt} + rP_k \frac{dU}{dt},$$

где  $P_k = \gamma_i V_i$  — вес сухого каркаса.

Теория и практика процессов теплопередачи позволяют записать выражение для об-

щего количества теплоты  $Q$ , получаемого каркасом, в следующем виде:

$$Q = FC_{пр}\varphi_{1-2} \left[ \left( \frac{T_{изл}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{пк}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{mk} F (\theta_{ср} - \theta_{пк}), \quad (3)$$

где  $F$  — боковая поверхность каркаса, воспринимающая теплоизлучение;

$C_{пр}$  — приведенный коэффициент лучепоглощения;

$\varphi_{1-2}$  — среднее значение по поверхности коэффициента взаимного облучения между поверхностями каркаса нагревательным элементом;

$T_{изл}, T_{пк}$  — температура излучателей и температура поверхности каркаса соответственно, °К;

$\alpha_{mk}$  — приведенный коэффициент теплообмена, теплопроводности и конвекции;

$\theta_{ср}, \theta_{пк}$  — эквивалентное значение средней температуры окружающей среды, участвующей в теплообмене, и поверхности каркаса.

При упрощенном подходе к математическому описанию процесса формования часто в уравнении (2) вводят эквивалентный коэффициент лучистого теплообмена  $\alpha_R$ , величина которого определяется выражением:

$$\alpha_R = \frac{C_{пр}}{\theta_a - \theta_{пк}} - \left[ \left( \frac{T_{изл}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{пк}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где  $\theta_a$  — приведенная температура автоклава.

Подставляя выражение (1) в (2) с учетом соотношения (4), получим:

$$F(\alpha_R + \alpha_{mk})(\theta_a - \theta_{пк}) = C\gamma_i V_i \frac{d\theta}{dt} + r\gamma_i V_i \frac{d\bar{U}}{dt} \quad (5)$$

или

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = \frac{C_{пр} d\bar{\theta}}{r dt} + \frac{F(\alpha_R + \alpha_{mk})}{\gamma_0 V_0 r} (\theta_a - \theta_{пк}). \quad (6)$$

Нетрудно заметить, что в уравнении (6) коэффициент  $\alpha_R$  может иметь значительную величину, которая определяется температурой излучателей автоклава.

Действительный характер изменения содержания связующего для различных режимов формования можно проследить по экспериментальным кривым кинетики сушки. Для

их определения была использована специальная лабораторная установка. Кривые кинетики сушки и ее температурные кривые приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Они показывают, что весь процесс сушки препрега можно охарактеризовать следующими основными величинами:

$\tau_{\text{пр}}$  — время нагрева препрега или перехода сушки в период постоянной скорости, начало которого определяется первым критическим содержанием связующего  $U_{\text{кр}1}$ ;

$N$  — значение скорости сушки в периоде постоянной скорости;

$Q$  — температура препрега в период постоянной скорости сушки;

$U_{\text{кр}2}$  — второе критическое содержание связующего, с которого сушка переходит в период падающей скорости;

$M$  — максимальная скорость нагрева препрега в период падающей скорости сушки.

Порядок определения перечисленных величин по кривым кинетики можно отследить по рис. 1 и 2.

Таким образом, имея общее выражение для скорости сушки и экспериментальные кривые кинетики сушки, можно дать полный анализ процесса сушки препрега. В общем случае весь этот процесс может быть разделен на три стадии. Первая стадия характеризуется нагревом препрега при незначительной величине скорости сушки с ростом теплового потока в автоклаве. Длительность этого периода невелика по сравнению со всем процессом формования. На рис. 1 дана зависимость эквивалентной температуры автоклава от времени  $\tau_{\text{пр}}$ . Нетрудно заметить, что при  $Q_a > 90^\circ\text{C}$  величиной  $\tau_{\text{пр}}$  можно пренебречь в общем процессе сушки, и считать его совмещенным со второй стадией, которая называется стадией постоянной скорости сушки. На этой стадии температура каркаса постоянна и все тепло затрачивается только на удаление влаги, тогда выражение для скорости сушки упрощается и принимает вид:

$$N_i = \frac{dU_2}{dt} = \frac{F \cdot (L_R + L_{\text{пк}})}{\gamma_0 V_0 r} \cdot (Q_a - Q_{\text{пк}}). \quad (7)$$

В приведенном выражении величина температуры поверхности препрега постоянна, следовательно, скорость сушки определяется только температурой в автоклаве  $Q_a$ . Однако, учитывая выражение для коэффициента теплообмена (7),

$$\frac{dU_3}{dt} = \int (Q_a). \quad (8)$$

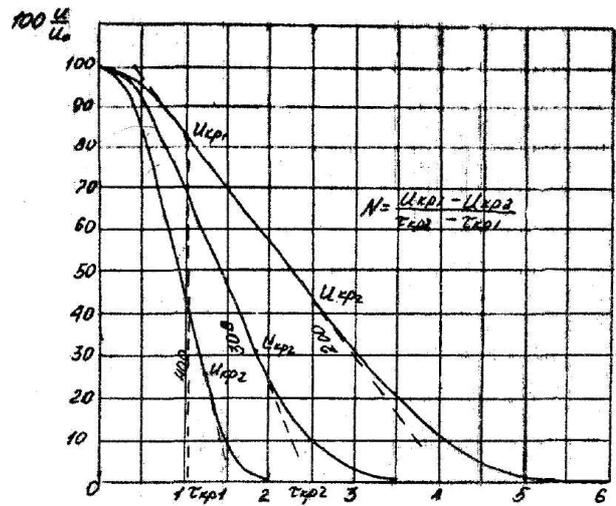


Рис. 1. Кривые кинетики сушки препрега

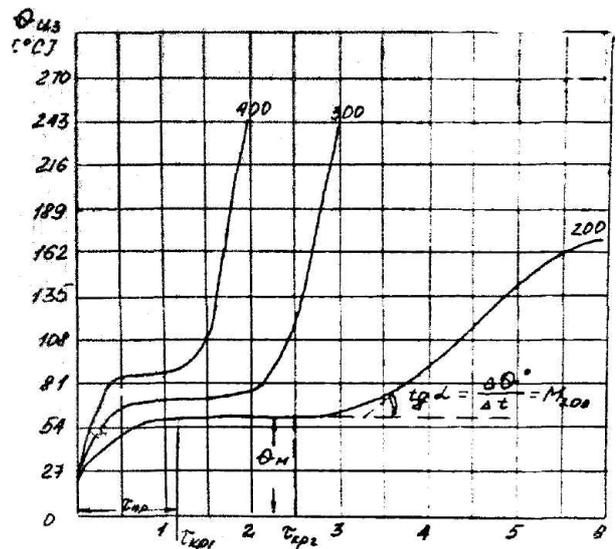


Рис. 2. Температурные кривые сушки при контроле за температурой препрега

Характер этой зависимости можно получить по результатам обработки кривых кинетики сушки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен процесс выпаривания связующего на стадии нагрева препрега, который представляет собой объект с распределенными параметрами. Модель процесса аппроксимирована системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Получены выражения для скорости выпаривания связующего. Результаты математического описания процесса выпаривания связующего показывают, что скорость выпаривания

пропорциональна температуре в автоклаве и определяет характер всего процесса для фиксированных температурных стадий автоклава. Для обеспечения нормального ведения процесса сушки необходимо чтобы содержание связующего при выходе из автоклава не падало ниже 15%.

Разработанная математическая модель процесса формования каркаса отражает характер преобразования входных воздействий в выходные и позволяет использовать результаты для управления процессом формования.

Имеется акт о внедрении результатов теоретических и экспериментальных исследований, представленных в статье, на Кумертауском авиационном производственном предприятии (КумАПП) в цехе по производству изделий из полимерных композиционных материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красовский, А. А.** Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
2. **Воронов, А. А.** Теория автоматического управления : учеб. для вузов : Ч. 2 / А. А. Воронов. М.: Высшая школа, 1986. 504 с.

#### ОБ АВТОРАХ



**Грачева Любовь Николаевна**, доц. каф. пром. автоматики Кумертауск. филиала УГАТУ. Дипл. инж. по автоматиз. технол. проц. и произв. (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по той же спец. Иссл. в обл. автоматиз. изготовл. изделий из полимеров.



**Даутов Анвар Ибрагимович**, дир. того же филиала, зав. каф. естественнонауч. и общетехн. дисц. Дипл. инж. электрон. техн. (Электротехн. ин-т нефти, 1972). Канд. техн. наук по теплотехн. (Казанск. хим.-технол. ин-т, 1977). Иссл. в обл. теплотехн. и теплофиз.



**Тюков Николай Иванович**, проф., зав. каф. пром. автоматики того же филиала. Дипл. инж. (Оренбургск. с.-х. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по авт. упр. и рег. (Ин-т им. Потона, 1984). Иссл. в обл. автом. технол. проц. в вертолетостроении.



**Нигматуллин Ильшат Кашафетдинович**, ст. преп. той же каф. Дипл. инж. по автоматиз. технол. проц. и произв. (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. автоматиз. и автоматич. упр. теплоэнергетич. процессами.