

УДК 62.003.2

**В. А. Скачков, В. И. Иванов, Т. Н. Нестеренко, О. Р. Бережная**  
**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ АВТОКЛАВНОГО**  
**ОТВЕРЖДЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ЗАГОТОВОК**

*Описаны аспекты математического моделирования процесса нагрева углепластиковых заготовок при их отверждении в автоклавах аэродинамического типа. Разработан алгоритм адаптивного управления температурным режимом данного процесса для обеспечения допустимого уровня отклонений по скорости нагрева.*

*Ключевые слова:* углепластиковая заготовка, композитный материал, автоклавное отверждение, температурный режим работы, адаптивное управление.

**В. О. Скачков, В. І. Іванов, Т. М. Нестеренко, О. Р. Бережна**  
**АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ АВТОКЛАВНОГО**  
**ЗАТВЕРДІВАННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ЗАГОТОВОК**

*Описано аспекти математичного моделювання процесу нагрівання вуглепластикових заготовок під час їх затвердіння в автоклавах аеродинамічного типу. Розроблено алгоритм адаптивного управління температурним режимом цього процесу для забезпечення допустимого рівня відхилень за швидкістю нагрівання.*

*Ключові слова:* вуглепластикові заготовки, композитний матеріал, автоклавне затвердіння, температурний режим роботи, адаптивне управління.

**V. Skachkov, V. Ivanov, T. Nesterenko, O. Berezhnaya**  
**ADAPTIVE CONTROL BY TEMPERATURE CONDITION FOR AUTOCLAVE**  
**CONSOLIDATION OF COALPLASTIC MATERIAL BLANKS**

*There are described the aspects of mathematical modeling of heating process for coalplastic material blank at their consolidation in the autoclaves of aerodynamic type. It is worked out the algorithm of adaptive control for the temperature condition of this process at providing of possible level of rejections on speed of heating.*

*Keywords:* coalplastic material blank, composite material, autoclave consolidation, temperature condition of work, adaptive control.

**Актуальность темы.** Композиты на основе углеродных волокон и карбонизованных полимерных матриц являются самыми перспективными материалами для отраслей машиностроения, связанных с термохимическими и высокотемпературными процессами. Качественные показатели таких материалов в значительной степени определяются точным исполнением температурно-временных режимов, обеспечением заданных расходов рабочих газов и параметров давления, а также остаточного давления при вакуумировании.

Для стадии формирования углепластиковых заготовок рассмотрен комплекс расчетно-экспериментальных методов обеспечения вязкости феноло-формальдегидного связующего и его жизнеспособности [2]. Определены рациональные условия ведения процессов послойной выкладки и намотки заготовок различных геометрических размеров и толщины.

Наиболее ответственной стадией производства углепластиковых заготовок является процесс их отверждения в автоклавах аэродинамического типа, который обеспечивает удаление продуктов поликонденсации феноло-формальдегидных смол в вакуумную систему при уплотнении структуры заготовки избыточным удельным давлением до 1,20 МПа.

Данный процесс характеризуется наличием сложной комбинации тепловых и силовых факторов, таких как скорость нагрева углепластиковой заготовки на разных этапах процесса поликонденсации связующего, внешнее давление (его изменение во времени и максимальное значение), а также глубина и длительность вакуумирования зоны отверждаемого связующего [5]. Наличие значительного количества этапов данного процесса, которое усложнено существенной тепловой инерцией отверждаемой заготовки, обуславливает сложности в управлении температурно-временными режимами автоклава [1, 4].

**Постановка задачи.** Аэродинамический нагрев в автоклавах обеспечивает безинерционное регулирование температуры в его объеме. Однако инерционность нагрева углепластиковой заготовки с учетом тепловых эффектов при ее отверждении свидетельствует о необходимости учета предыстории изменения полей температуры в объеме автоклава для реализации заданного режима ее нагрева, а, следовательно, и о целесообразности его математического моделирования.

В связи с вышеизложенной задачей данных исследований является разработка адапционной модели процесса нагрева углепластиковых заготовок для управления

температурним режимом их автоклавного отверждения.

**Основная часть.** Важнейшим параметром процесса автоклавного отверждения углепластиковых заготовок является температура в объеме заготовки, на величину которой существенное влияние оказывают температура и давление рабочего газа (азота) в автоклаве, а также процесс переноса теплоты в системе «рабочий газ–корзина–эластичная мембрана–заготовка–оправка». Температура рабочего газа, в свою очередь, зависит от мощности, подводимой к приводу роторного нагревателя автоклава, и абсолютного давления в его рабочем объеме. Система переноса теплоты в рабочем объеме автоклава характеризуется наличием значительной тепловой инерционности процесса нагрева отверждаемой заготовки. В связи с этим при построении модели процесса автоклавного отверждения углепластиковых заготовок необходимо учитывать предысторию нагрева автоклава, текущую температуру в его рабочем объеме и ее зависимость от давления рабочего газа  $P$  в автоклаве.

Перечисленным требованиям удовлетворяет модель, представленная в виде уравнения:

$$T_{\zeta}(t) = A(P) \cdot T_a(t) + \int_0^t k(\tau - \tau_0) \cdot \frac{dT_a(\tau)}{d\tau} d\tau, \quad (1)$$

где  $T_{\zeta}(t)$ ,  $T_a(t)$  – температура углепластиковой заготовки и температура в рабочем объеме автоклава на момент времени  $t$  соответственно;  $A(P)$  – регрессионный коэффициент, зависящий от давления в автоклаве;  $k(\tau - \tau_0)$  – функция запаздывания, учитывающая влияние предыстории режима нагрева автоклава на температуру отверждаемой заготовки.

Первый член правой части уравнения (1) определяет мгновенное влияние температуры в рабочем объеме автоклава на температуру углепластиковой заготовки, второй, интегральный член, оценивает запаздывание температуры заготовки от предыдущих этапов процесса нагрева рабочего объема автоклава.

Функция запаздывания  $k(\tau - \tau_0)$  по своему физическому смыслу должна быть монотонно убывающей и при значении аргумента  $t$ , стремящегося к бесконечности, приближаться к нулю. Указанными свойствами обладают функции вида

$$k(\tau - \tau_0) = B \cdot \exp[-K \cdot (\tau - \tau_0)], \quad (2)$$

где  $B$ ,  $K$  – эмпирические константы.

Исследованиями кривых распределения температуры в рабочем объеме автоклава для условий его промышленной эксплуатации установлено, что подобрать квадратурную функцию, которая бы аппроксимировала указанные кривые, практически невозможно. Наиболее простым и удобным методом представления указанных зависимостей является их линейная аппроксимация по локальным интервалам времени

$$T_a(\tau_n) = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i \cdot \tau_i), \quad (3)$$

где  $a_i$ ,  $b_i$  – параметры аппроксимации;  $n$  – количество участков, на которые разделяется процесс нагрева заготовки при аппроксимации;  $\tau_n$  – длительность процесса нагрева заготовки в автоклаве.

После подстановки соотношений (2) и (3) в уравнение (1) и несложных преобразований получается

$$\dot{O}_{\zeta}(t_n) = A(P) \cdot \sum_{i=1}^n (a_i + b_i \cdot \tau_i) - \frac{B(P)}{K} \cdot \sum_{i=1}^n b_i \cdot \exp[-K \cdot (t_n - \tau_i)]. \quad (4)$$

Значения параметров  $A(P)$ ,  $B(P)$  и  $K$ , входящих в уравнение (4), вычисляются с использованием регрессионных методов [5]. Для этого формула (4) расписывается по явным выражениям  $b_i$ , и получаются уравнения с неизвестными коэффициентами, включающими в свою структуру искомые параметры модели.

Так, например, для  $n = 3$ :

$$T_{\zeta}(t_3) = A_0 + A_1 \cdot b_1 + A_2 \cdot b_2 + A_3 \cdot (b_1 - b_2) + A_4 \cdot (b_3 - b_2), \quad (5)$$

где  $A_0 = A(P) \cdot T_a(\tau)$ ;  $A_1 = -\frac{B(P)}{K \cdot \exp(-K \cdot \tau)}$ ;  $A_2 = \frac{B(P)}{K}$ ;  $A_3 = \frac{B(P)}{K \cdot \exp[-K \cdot (t_3 - \tau_1)]}$ ;

$$A_4 = \frac{B(P)}{K \cdot \exp[-K \cdot (t_3 - \tau_2)]} .$$

Затем, используя статистические данные по режимам отверждения углепластиковых заготовок, составляется уравнение регрессии вида (5). Коэффициенты данного уравнения  $A_i (i = 0, n)$  определяются методами математической статистики [5]. Используя значение указанных коэффициентов, вычисляются неизвестные параметры  $A(P)$ ,  $B(P)$  и  $K$  модели (1).

Для соотношений, входящих в уравнение (4), можно записать

$$A(P) = \frac{A_0}{T_a(t_3)} ; \tag{6}$$

$$B(P) = A_2 \cdot K ; \tag{7}$$

$$K = - \frac{\ln\left(\frac{A_4}{A_2}\right)}{t_3 - \tau_2} . \tag{8}$$

Вычисления коэффициентов аппроксимации осуществляются по формулам

$$b_0 = 0 ; \tag{9}$$

$$b_i = \frac{T_0(\tau_i) - T_a(\tau_{i-1})}{\tau_i - \tau_{i-1}} - b_{i-1} , \tag{10}$$

где  $T_a(\tau_n)$  – экспериментальные значения температуры в рабочем объеме автоклава на момент времени  $\tau_n$ .

Следовательно, имея результаты экспериментов по изучению процесса отверждения углепластиковых заготовок при различных значениях давления рабочего газа  $P$  в объеме автоклава и вычисляя коэффициенты модели по формулам (6)-(8), несложно получить соотношения для записи эмпирических зависимостей  $A(P)$  и  $B(P)$ .

Энергетическое обеспечение процесса автоклавного отверждения углепластиковых заготовок определяется как значениями подаваемого напряжения, так и силы электрического тока, подводимого к роторному нагревателю автоклава. В этой связи определение необходимого уровня мощности  $W_a(\tau)$ , позволяющего обеспечить в рабочем объеме автоклава заданное значение температуры  $T_a(\tau)$ , можно осуществлять с использованием соотношения, аналогичного уравнению (1):

$$W_a(t) = D \cdot T_a(t) + \int_0^t R(\tau - \tau_0) \frac{dT_a(\tau_0)}{d\tau_0} d\tau_0 , \tag{11}$$

где  $R(\tau - \tau_0) = R \cdot \exp[-\theta \cdot (\tau - \tau_0)]$ ;  $D$ ,  $R$ ,  $\theta$  – эмпирические константы.

Вычисление параметров  $D$ ,  $R$  и  $\theta$  уравнения (11) выполняют по методике, аналогичной определению коэффициентов  $A(P)$ ,  $B(P)$  и  $K$  уравнения (1).

Модель процесса нагрева углепластиковой заготовки (4) при отверждении предоставляет возможность нахождения температуры в рабочем объеме автоклава по заданной кривой изменения температуры заготовки. Для вычисления температуры в рабочем объеме автоклава необходимо и достаточно определить значения коэффициентов  $a_n$  и  $b_n$  (3).

Используя уравнение (4), после алгебраических преобразований можно получить соотношения для расчетов вышеуказанных коэффициентов:

$$a_n = T_a(\tau_{n-1}) - b_n \cdot \tau_{n-1} - a_{n-1} ; \tag{12}$$

$$b_n = \frac{T_\varphi(t) - A(P) \cdot \left[ \sum_{i=1}^N a_i + \sum_{i=1}^N b_i \cdot \tau_n \right] - \frac{B(P)}{K} \cdot \langle b_{i-1} \cdot \exp[-K \cdot (\tau_n - \tau_{n-1})] \rangle}{A(P) \cdot \tau_n + \frac{B(P)}{K} \cdot \langle 1 - \exp[-K \cdot (\tau_n - \tau_{n-1})] \rangle} .$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (b_{i-1} - b_i) \cdot \langle \exp[-K \cdot (\tau_n - \tau_{n-1})] \rangle}{A(P) \cdot \tau_n + \frac{B(P)}{K} \cdot \langle 1 - \exp[-K \cdot (\tau_n - \tau_{n-1})] \rangle} \quad (13)$$

После определения значений коэффициентов  $a_n$  и  $b_n$  по формуле (3) определяется температура в рабочем объеме автоклава  $T_a(t)$  на момент времени  $t_n$ . С использованием соотношения (11) по данной температуре вычисляют мощность  $W_a(t)$ , обеспечивающую температуру в рабочем объеме автоклава  $T_a^p(t_n)$  и в отверждаемой заготовке  $T_c^p(t_n)$ .

В случае постоянства параметров, обуславливающих баланс теплоты в автоклаве, расчетная температура углепластиковой заготовки  $T_c^p(t_n)$  соответствует его заданной величине. При нарушении условий баланса теплоты в рабочем объеме автоклава (например, при изменении температуры в производственном помещении или температуры подаваемого рабочего газа) происходит отклонение расчетной величины температуры углепластиковой заготовки от заданного значения:

$$\Delta T(t_n) = T_c^p(t_n) - T_c(t_n) \quad (14)$$

При превышении величины отклонения  $\Delta T(t_n)$  допустимого уровня погрешности необходимо выполнить ее компенсацию. Для этого предлагается алгоритм адаптивного управления [5], который основан на уточнении значений коэффициента модели  $A(P)$ , величину которого вычисляют по формуле

$$A(P)|_{\tau_{n+1}} = A(P)|_{\tau_n} + \frac{\Delta T(t_n)}{T_a(t_n)} \quad (15)$$

Суть адаптивного управления заключается в том, что в память ПЭВМ вводят температурный график отверждения углепластиковой заготовки, значения температуры в производственном помещении и величину допустимого отклонения измеренной температуры заготовки от заданной величины. Далее вычисляют коэффициенты  $b_i^k$  и  $a_i^k$ , определяющие температуру в рабочем объеме автоклава  $T_a^p(t)$  для  $k$ -того агрегата (при управлении работой одного автоклава  $k = 1$ ) и необходимую мощность  $W_a^k(t)$ , обеспечивающую заданную температуру в рабочем объеме автоклава  $T_a(t)$ . Система управления работой автоклава реализует сформированный сигнал. Далее генератор опроса открывает линию контроля температуры углепластиковой заготовки в  $k$ -ом автоклаве и определяет величину отклонения  $\Delta T_c(t)$ . Если значение параметра  $\Delta T_c(t)$  превышает допустимую величину, то выполняют адаптивное изменение параметров модели с последующим вычислением температуры в рабочем объеме автоклава, а также необходимой мощности для реализации данной температуры процесса отверждения. Таким образом, используя описанную процедуру, для всех участков времени исследуемого процесса строят полный процесс управления автоклавным отверждением.

Практическую реализацию предложенного алгоритма управления процессом нагрева углепластиковой заготовки при автоклавном отверждении, основанного на соотношениях (1)-(4), выполняли в виде программы на алгоритмическом языке TURBO PASKAL для ПЭВМ.

Начальными данными для проведения практических расчетов служат:

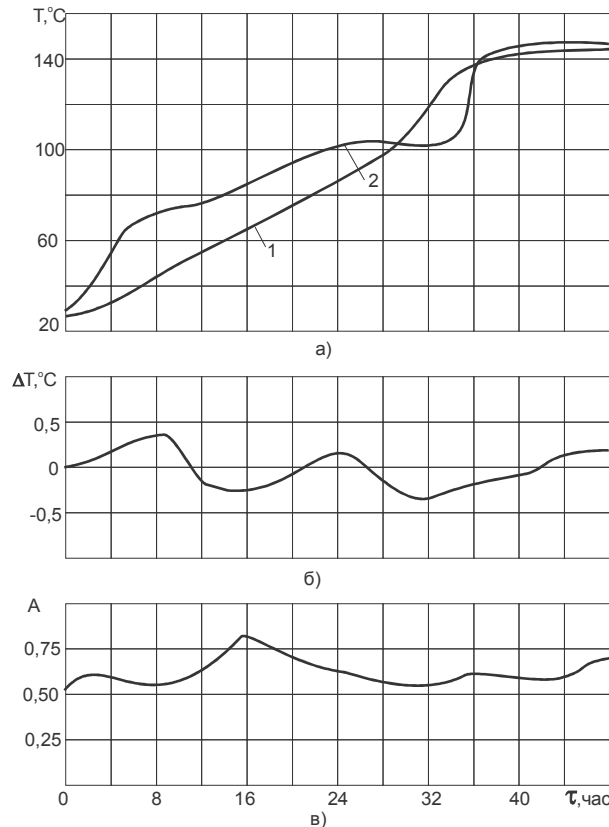
- давление в рабочем объеме автоклава;
- точность задания температуры углепластиковой заготовки;
- температура заготовки и температура в рабочем объеме автоклава на каждом временном участке;
- количество временных участков на графике нагрева заготовки и их длительность;
- коэффициенты модели.

Выходными параметрами программы являются:

- величина мощности, подводимой к каждому автоклаву;
- значение отклонения температуры отверждаемой заготовки от заданной величины на каждом временном интервале.

В качестве иллюстрации работы алгоритма представлены экспериментальные и расчетные кривые изменения температуры автоклава и отверждаемой углепластиковой заготовки (рис. 1). На

этом же рисунке приведено прогнозируемое отклонение температуры автоклава, от температуры, практически полученной при отверждении заготовки. Изменение внутренних или внешних факторов, которые обеспечивают соблюдение теплового баланса автоклава, приводит к необходимости коррекции модели путем уточнения значений коэффициента  $A(P)$  по уравнению (1). На данном рисунке также представлена кривая изменения коэффициента  $A(P)$  при нагреве автоклава. Следует отметить, что изменение значений данного коэффициента в пределах  $0,1 \dots 0,8$  обеспечивает отклонение расчетной температуры автоклава от ее экспериментального значения в пределах  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .



**Рис. 1. Режим отверждения углепластиковой заготовки в автоклаве: 1 - заданный график нагрева заготовки; 2 - расчетный график температуры автоклава (а); отклонение реализованной температуры в объеме заготовки от заданной графиком нагрева б); изменение адаптивного коэффициента  $A(P)$  модели (1) в)**

**Выводы.** Разработана математическая модель процесса нагрева углепластиковых заготовок при их автоклавном отверждении, а также предложен алгоритм адаптивного управления указанным процессом.

1. Афанасьев Ю. А. Оптимизационные задачи в управлении технологическими процессами термообработки изделий из композитных материалов / Ю. А. Афанасьев, В. И. Муравьев // Механика композитных материалов. – 1986. – № 1. – С. 103–117.
2. Бабаевский П. Г. Отверждающиеся связующие композиционных пластиков / П. Г. Бабаевский // Пластики конструкционного назначения. – М.: Химия, 1974. – С. 75–119.
3. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
4. Иванов М. Ю. Сжатие многокомпонентной среды под влиянием внешнего переменного давления / М. Ю. Иванов, В. К. Коробов, В. М. Николаенко // Прикладная механика и математика. – 1986. – Т. 50, Вып. 4. – С. 684–688.
5. Исследование процессов отверждения углеродных композитов на основе феноло-формаль-дегидных связующих / В. А. Скачков, О. Р. Бережная, В. И. Иванов и др. // Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2006. – Вип. 14. – С. 132–138.
6. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов экспериментов / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2015.