

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 678.026.2:678.067.2

Методика выбора режимов баротермической обработки в автоклаве теплозащиты спускаемых космических аппаратов

В.А. Тарасов¹, В.А. Романенков², М.А. Комков¹, Р.В. Боярская¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, 141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация, Ленина ул., д. 4а

The Methodology of Selection of an Autoclave Barothermal Processing Mode for the Heat-Shield of Re-Entering Spacecraft

V.A. Tarasov¹, V.A. Romanenkov², M.A. Komkov¹, R.V. Boyarskaya¹

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² JSC S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, 141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 4a



e-mail: tarasov_va@mail.ru, Vladimir.Romanenkov@rsce.ru, m_komkov@list.ru, brv152@mail.ru



Рассмотрен актуальный вопрос организации автоклавной обработки композитной конструкции теплозащиты — теоретическое согласование закона изменения температуры изделия и ступенчатого изменения давления азота, который используется в качестве технологической среды. Проведен анализ данных, полученных контрольно-измерительными приборами системы управления автоклава. Установлена математическая взаимосвязь между потребляемой мощностью термоэлектрических нагревателей и изменением температуры изделия, учитывающая индивидуальные особенности конструкции технологического оборудования. Предложена методика расчета потребляемой массы азота и электроэнергии, необходимой для получения и нагрева азота, на базе рассмотрения газодинамических и теплофизических процессов в автоклаве. Показано, что для согласования момента дополнительной подачи азота и амплитуды изменения давления целесообразно использовать критерий минимума затрат электроэнергии на получение и нагрев азота в системе автоклава. Сравнение рекомендаций предложенной методики с результатами опытной отработки режимов технологического процесса показало высокую эффективность применения методики.

Ключевые слова: автоклав, теплозащита, композитная конструкция, полимеризация связующего, вязкость связующего, температура изделия, давление азота.



The article presents a topical issue of organization of autoclave processing for a heat shield of composite design. It explores the theoretical relationship between the law of the temperature change of the product and the step change of the pressure of nitrogen, which is used as

the technological medium. The data obtained by the control and measuring instruments of the autoclave control system is analyzed, and a mathematical relationship is established between the consumption power of the thermoelectrical heaters and the product temperature. This relationship takes into account specific design features of the technological equipment. The authors propose a method for calculating the consumed mass of nitrogen and the consumed power required to generate and heat the nitrogen from the point of view the gas-dynamic and thermophysical processes in the autoclave. It is shown that to coordinate the moment of additional nitrogen supply and the amplitude of the pressure change it is appropriate to use the criterion of minimum power consumption required to generate and heat the nitrogen in the autoclave. The comparison of the proposed method with the experimental testing of the modes of the technological process has shown the high efficiency of the method.

Keywords: autoclave, heat-shielding, composite design, polymerization and viscosity binding, relationship between the continuous temperature change of a product and step change of the nitrogen pressure.

Успех возвращения спускаемого космического аппарата (СКА) определяется качеством изготовления его теплозащиты [1] — крупногабаритной композитной конструкции с оптимальным соотношением объемов наполнителя и связующего. По сравнению с наиболее прогрессивными способами изготовления полимерных композитных конструкций [2, 3] применение автоклавной обработки теплозащиты СКА позволяет:

- повысить качество изделия за счет возможности управления технологическими режимами процесса с помощью автоматизированной системы управления;
- снизить пожарную опасность обработки за счет использования азота в качестве технологической среды;
- сократить время обработки за счет совмещения операций термической обработки и удаления излишков связующего, присутствующих в композиционной структуре заготовки, а в случае применения специальной технологической оснастки и операции пропитки заготовки связующим.

Вместе с тем совмещение технологических операций существенно усложняет физическую основу автоклавной обработки.

Особенности процесса нагрева содержимого реакционной камеры автоклава обусловлены требованиями обеспечения минимального колебания температуры в различных точках стенки в целях снижения коробления изделия. В первую очередь необходимо обеспечить допустимую скорость роста температуры изделия с учетом толщины его стенки. Технологической средой является азот. Он исключает пожарную опасность термообработки связующего с большим содержанием спирта, который добавляют, чтобы снизить его вязкость. Азот добывают из

воздуха на азотной станции автоклава и сжимают компрессором до давления $p = 35$ бар хранения его в ресивере объемом $V = 327$ м³. Технологическая мощность азотной станции составляет 307 кВт, время производства азота — 11,1 ч. При необходимости азот из ресивера подают в реакционную камеру, создавая требуемое давление. Изменение температуры содержимого реакционной камеры осуществляется путем нагрева азота термоэлектрическими нагревателями (ТЭН), мощность которых может изменяться ступенчато.

На рис. 1 представлена схема теплопереноса в заполненной азотом реакционной камере 2 автоклава. Заготовка 3 теплозащиты СКА размещена на технологической оправке.

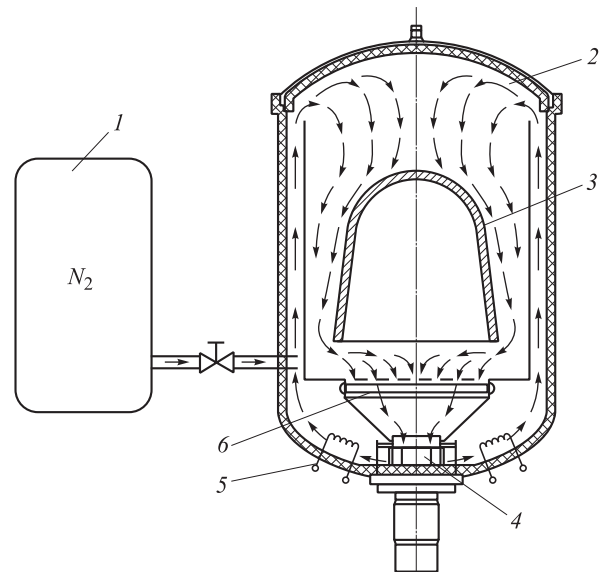


Рис. 1. Схема нагрева и движения азота в реакционной камере автоклава:
1 — ресивер; 2 — реакционная камера; 3 — заготовка теплозащиты СКА; 4 — вентилятор; 5 — ТЭН; 6 — теплообменник

Автоклав имеет пять контуров ТЭНов (мощность каждого 264 кВт), которые допускают ступенчатое управление мощностью электрического тока. Вентилятор 4, находящийся в нижней части реакционной камеры, создает поток нагреваемого азота между ее стенками. У крышки в верхней части реакционной камеры поток разворачивается в сторону изделия, расположенного в центральной ее части.

Таким образом, в камере обеспечивается минимальный перепад температур, но одновременно с этим получается задержка во времени (инерционность процесса) поступления теплоты от ТЭНов к изделию. Одновременно с нагревом в камере ступенчато увеличивается давление азота, которое используется для удаления излишков связующего в заготовке.

Создание математической модели и методики выбора режимов автоклавной обработки теплозащиты СКА [4–7], позволяющей назначать закон изменения во времени мощности ТЭНов, а также величину и момент времени приращения давления азота в реакционной камере, является целью представленной статьи.

В методике выбора режимов подачи азота и его нагрева в реакционной камере необходимо учесть следующие факторы:

- адиабатическое заполнение камеры поступающим из ресивера азотом и его нагрев таким образом, чтобы нормальное давление в конце процесса соответствовало нормальной температуре (этот момент автоклавной обработки принимается за исходный);
- ступенчатый характер изменения давления за счет подачи азота из ресивера, момент и амплитуда изменения давления в котором должны быть увязаны с изменением вязкости связующего в процессе нагрева и полимеризации;
- нагрев изделия с постоянной скоростью изменения температуры при постоянном давлении на каждой ступени его изменения;
- выдержка изделия во времени при максимальных значениях давления и температуры.

В основу выбора закона изменения мощности ТЭНов при автоклавной обработке положен практический опыт обеспечения качества изделия. Системой управления автоклава осуществлена запись мощности ТЭНов и температуры изделия, расшифровка которой позволила учесть индивидуальные особенности применяемого автоклава.

При анализе нагревания объектов, расположенных в реакционной камере, использовано

допущение о том, что изменения суммарной внутренней энергии этих объектов

$$\int_0^{\Delta T} \sum_i m_i c_{Vi} d\Delta T$$

и выделившейся на ТЭНах электроэнергии

$$\int_0^t W dt$$

пропорциональны:

$$\chi = \frac{\int_0^{\Delta T} \sum_i m_i c_{Vi} d\Delta T}{\int_0^t W dt} \approx \frac{\sum_i m_i c_{Vi} \dot{T}_{cp}}{W_{cp}},$$

где χ — коэффициент пропорциональности; $\sum m_i c_{Vi}$ — суммарная теплоемкость объектов, которая является функцией температуры T ; ΔT — изменение температуры при нагревании изделия за время t ; W — мощность ТЭНов; \dot{T}_{cp} — средняя скорость увеличения температуры (определяется для стационарного участка зависимости $T(t)$); W_{cp} — средняя мощность электрического тока для этого интервала времени.

Учет инерционности реакционной камеры и объектов термообработки осуществим с помощью уравнения

$$\frac{dT}{dt} + \mu T = \chi W,$$

где μ — показатель инерционности процесса теплопередачи от ТЭНов к изделию.

Определение коэффициентов χ и μ представляет собой важный этап создания методики согласования режимов подачи азота в автоклав и изменения температуры композитного изделия в процессе отверждения матрицы. На основе совместного анализа данных с контрольно-измерительных приборов системы управления автоклава, который проводился на четырех участках нагрева для условий ступенчатого управления подключением контуров ТЭНов, установлены следующие значения коэффициентов: $\chi = 0,0972$ и $\mu = 0,0745$.

Для изменения мощности ТЭНов на 1-м участке выбрана аппроксимация

$$W = W_0 + \Delta W \exp\left(-\frac{t}{\Theta}\right),$$

где $W_0 = 75$ кВт; $\Delta W = 40$ кВт; $\Theta = 2,67$ ч — коэффициенты аппроксимации. При этом изменение температуры описывается соотношением

$$T = T_0 \exp(-\mu t) + \frac{\chi W_0}{\mu} [1 - \exp(-\mu t)] + \frac{\chi \Delta W}{\mu - t/\Theta} \left[\exp\left(-\frac{t}{\Theta}\right) - \exp(-\mu t) \right].$$

Для 2, 3 и 4-го участков применим уравнение

$$W = \frac{1}{\chi} (\dot{T} + \mu T),$$

где \dot{T} соответственно равны 10; 1,67 и 3,33 °/ч.

Скорости \dot{T} на 1-м и 3-м участках выбраны увеличенными по сравнению с рекомендуемой скоростью на 2-м участке, чтобы сократить время термообработки без существенного снижения качества изделия.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных представлено на рис. 2.

Если связать скорость \dot{T} изменения температуры с толщиной δ стенки изделия и со временем \dot{t} подъема температуры на один градус, отнесенным к единице толщины стенки, соотношением

$$\dot{T} = \frac{1}{\dot{t}\delta},$$

то предложенные рекомендации по выбору мощности ТЭНов можно распространить на разнообразные элементы конструкции теплозащиты СКА, где $\dot{t} = \text{const}$.

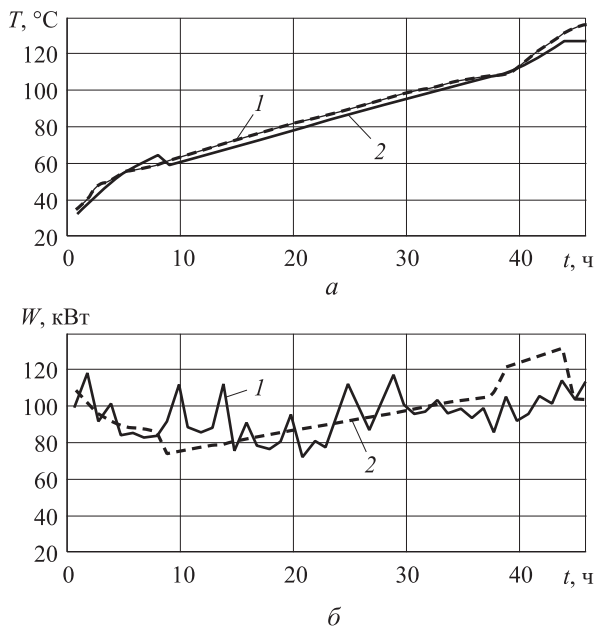


Рис. 2. Изменение температуры (а) и мощности ТЭНов (б) при термообработке изделия: 1 — экспериментальные; 2 — расчетные данные

При создании методики выбора технологических режимов автоклавной обработки важно описать изменение вязкости [8–11] в процессе нагрева. В модели поведения вязкости будем учитывать известные факты:

- снижение отношения вязкости жидкости η^* к начальному значению вязкости η_0^* (назовем это отношение безразмерной вязкостью η) при нагревании описывается соотношением

$$\eta = \frac{\eta^*}{\eta_0^*} = \exp\left(-\beta_T \frac{\Delta T}{\Delta T_m}\right),$$

где ΔT_m — максимальный перепад температур при автоклавной обработке;

- по мере монотонного увеличения температуры изделия $\Delta T/\Delta T_m$ происходит полимеризация связующего и в соответствии с [1] его вязкость увеличивается.

Обработка данных, приведенных в [1], позволяет представить закон изменения безразмерной вязкости в виде

$$\eta = \frac{b \exp(-\beta_T x)}{(1 - ax)^n}, \quad (1)$$

где $x = \Delta T/\Delta T_m$; a, b, n — эмпирические коэффициенты.

Числитель в формуле (1) характеризует снижение вязкости при нагреве, а знаменатель — увеличение в результате полимеризации. Данное соотношение предполагает наличие минимума вязкости на координате x_0 , которая связана со значениями эмпирических коэффициентов условием

$$-\beta_T + \frac{na}{1 - ax_0} = 0.$$

Предложенный подход можно применить для любого связующего. В частности, для эпоксидного связующего ЭНФБ/3692 в процессе подбора эмпирических коэффициентов как функции x_0 получены следующие значения констант: $a = 0,997$; $b = 0,3$; $n = 1$; $\beta_T = 4,8283$.

Результаты расчета вязкости с помощью формулы (1) представлены на рис. 3. Они удо-

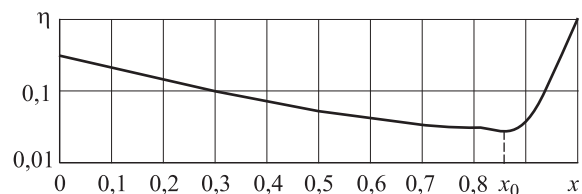


Рис. 3. Зависимость безразмерной вязкости η от значения относительной температуры x

влетворительно отражают основные тенденции, описанные в [1].

Для согласования амплитуды и момента скачкообразного изменения давления азота на стенку изделия с помощью уравнения Дарси определим объем q связующего, истекающего через единицу площади стенки изделия при избыточном давлении Δp [12–13]:

$$q = \frac{K_K}{\eta^*} \frac{\Delta p}{l},$$

где K_K — коэффициент Козени,

$$K_K = \frac{C_D}{\tilde{l}} \frac{d_n^2}{16} \frac{\Pi^3}{(1-\Pi)^2}$$

($C_D = 0,5$ — коэффициент Дарси; $\tilde{l} = 1,20 \dots 1,25$ — поправка на непрямолинейность траекторий течения связующего между слоями стеклоткани; $d_n = 0,2$ мм — диаметр нитей стеклоткани; Π — доля связующего в объеме заготовки); l — максимальная длина пути истечения связующего.

Доли наполнителя в изделии и заготовке α_0, α_3 , доли связующего соответственно $\Pi_0 = 1 - \alpha_0, \Pi_3 = 1 - \alpha_3$.

Толщина заготовки связана с толщиной изделия соотношением

$$\delta_3 = \delta_0 \frac{\alpha_0}{\alpha_3}.$$

Если предположить, что изделие имеет радиус R и высоту H , то поток связующего через торцы

$$\begin{aligned} q_\Sigma &= (\pi R^2 + 2\pi RH) \frac{d\delta}{dt} = \\ &= -2\pi\delta K_K^* \frac{\Delta p}{\eta_0^* \eta(t, T)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где K_K^* — коэффициент, учитывающий криволинейность боковой поверхности изделия,

$$K_K^* = K_K \frac{R}{R+H};$$

$\eta(t, T)$ — безразмерная вязкость в момент времени t при температуре T .

В соответствии с (2) уравнение, описывающее уменьшение толщины стенки изделия, примет вид

$$\frac{d \ln \delta}{dt} = - \frac{2K_K^*}{R^2 + 2RH} \frac{\Delta p}{\eta_0^* \eta(t, T)}.$$

С учетом ранее введенных обозначений и принимая $\Delta T = \dot{T}t$, представим это уравнение в виде

$$\frac{d \ln \delta}{dx} = - \frac{2K_K^*}{R^2 + 2RH} \frac{\Delta T_m}{\dot{T}} \frac{\Delta p}{\eta_0^* \eta(x)}.$$

Для автоклавной обработки характерно ступенчатое изменение избыточного давления азота, поэтому выражение для давления в интегральной форме запишется как

$$\Delta p = \frac{\ln(\delta_3/\delta_0)}{\int_{\theta}^1 \frac{2K_K^* \Delta T_m}{(R^2 + 2RH) \dot{T} \eta_0^* \eta(x)} dx},$$

где θ — параметр, соответствующий началу дополнительной подачи азота в реакционную камеру с изделием.

После интегрирования получим

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{\ln(\alpha_0/\alpha_3)}{2K_K^* \Delta T_m} \times \\ &\times \left\{ \frac{\exp \beta_T}{\beta_T b} \left[1 - \frac{a}{\beta_T} (\beta_T - 1) \right] - \right. \\ &\left. - \frac{\exp(\beta_T \theta)}{\beta_T b} \left[1 - \frac{a}{\beta_T} (\beta_T \theta - 1) \right] \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Кривая изменения давления как функция параметра θ представлена на рис. 4 (здесь t_k — момент достижения требуемого отношения долей наполнителя и связующего в полуфабрикате на момент окончания термической обработки). Выражение (3) следует рассматривать как установленную связь остаточной доли связующего композиционного материала, температурного режима нагревания изделия, значения избыточного давления и времени его подачи к изделию.

В разрабатываемой методике выбора режимов обработки необходимо учитывать падение температуры азота на стадиях его адиабатической подачи в автоклав, которое следует компенсировать подогревом азота. Это обстоятель-

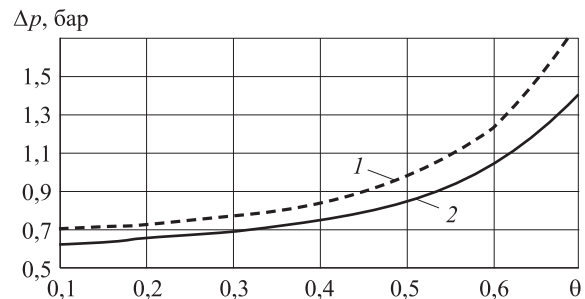


Рис. 4. Зависимости амплитуды изменения давления азота от момента времени его подачи при $t_k = 0,9$ (кривая 1) и $t_k = 1$ (кривая 2)

ство является основой при определении необходимой массы подаваемого азота и электроэнергии для его подогрева.

Так, начальную стадию заполнения азотом реакционной камеры можно осуществить с помощью двух алгоритмов.

Алгоритм 1 (экономичный). В алгоритме 1, условно названном экономичным, заполнение проводится в три этапа, после завершения которых давление и температура в автоклаве примут нормальные значения p_n и $T_n = T_R$ (где T_R — температура азота в ресивере). Первый этап — это вакуумирование камеры.

Для определения остаточного давления после откачки получим условие

$$\frac{p_{\text{ост}}}{p_n} = \frac{\rho_{\text{в ост}}}{\rho_{\text{в н}}} = \frac{K_{\text{O}_2}^{\text{доп}}}{K_{\text{O}_2}^0},$$

где $\rho_{\text{в ост}}$ — остаточная плотность воздуха; $\rho_{\text{в н}}$ — плотность воздуха при нормальном давлении; $K_{\text{O}_2}^{\text{доп}}$ — допустимая концентрация кислорода в реакционной камере после заполнения ее азотом; $K_{\text{O}_2}^0$ — исходная концентрация кислорода в воздухе.

На втором этапе в камеру добавляется азот массой m_0

$$m_0 = \rho_n \vartheta^*.$$

Здесь $\rho_n = \rho_R (p_0/p_R)^{1/k}$ — плотность азота после заполнения им камеры, определяемая в соответствии с законом адиабатического расширения и уравнением Клайперона—Менделеева (ρ_R — плотность азота в ресивере; p_0, p_R — давления в камере после заполнения и в ресивере; k — показатель адиабаты); $\vartheta^* = \vartheta(1 - K_{\text{O}_2}^{\text{доп}}/K_{\text{O}_2}^0)$ (ϑ — объем реакционной камеры).

При этом температура азота в камере

$$T_N = T_R \left(\frac{p_0}{p_R} \right)^{(k-1)/k}.$$

Затраты электроэнергии на получение массы m_0 азота из воздуха и его сжатие до давления в ресивере

$$E_{00} = m_0 E_{N_2}, \quad (4)$$

где $E_{N_2} = 0,2461$ кВт·ч/кг — стоимость подачи в ресивер 1 кг азота для азотной станции используемого автоклава.

Третий этап — подогрев азота до температуры $T_n = T_R$. Расход электроэнергии на нагрев массы азота m_0

$$E_0 = m_0 c_{VN} (T_R - T_N) / \chi.$$

Значение давления p_0 выбирается таким об-

разом, чтобы после подогрева газа в камере оно стало равным нормальному p_n .

В нашем случае $E_{00} = 72,81$ кВт·ч; $E_0 = 45,49$ кВт·ч.

Алгоритм 2 (прогрессивный). Алгоритм 2, условно названный прогрессивным, проводится в два этапа. На первом этапе осуществляется продувка камеры азотом при постоянном нормальном давлении p_n . При этом в каждый промежуток времени dt в камеру при нормальном давлении поступает масса dm азота и столько же удаляется воздуха. Концентрация азота в камере возрастает на $dK_N = [(1 - K_N)/\rho_{\text{в н}}] dm$. Интегрируя это соотношение, получим выражение для массы азота, затраченного на продувку камеры:

$$m_0 = \rho_n \vartheta \ln \frac{K_{\text{O}_2}^0}{K_{\text{O}_2}^{\text{доп}}},$$

в котором учитывается, что концентрации кислорода и азота связаны между собой соотношением $K_{\text{O}_2} = 1 - K_N$ (при проведении расчетов допустимая концентрация $K_{\text{O}_2}^{\text{доп}}$ кислорода по массе принята равной 2,45 %).

По аналогии с экономичным алгоритмом затраты электроэнергии на получение массы m_0 азота также рассчитывают по формуле (4). При этом на подогрев азота до нормальной температуры T_R расходуется электроэнергия

$$E_0 = \rho_n \vartheta c_{VN} (T_R - T_0),$$

где $T_0 = T_R (\rho_n/\rho_R)^{k-1}$ — температура азота в камере после продувки.

В нашем случае $E_{00} = 186,27$ кВт·ч; $E_0 = 45,49$ кВт·ч.

По аналогии исследуем стадию скачкообразного увеличения давления азота на Δp при его адиабатической подаче в реакционную камеру в момент θ . До этого момента рабочая атмосфера имеет температуру T_θ , плотность ρ_θ и давление p_0 . При подаче азота протекают два газодинамических процесса: давление подаваемого азота уменьшается со значения p_R до величины $p_0 + \Delta p$, и одновременно азот, ранее находившийся в реакционной камере, подвергается адиабатическому сжатию до такого же значения $p_0 + \Delta p$. При этом температуры оказываются неодинаковыми, и между двумя указанными массами азота происходит теплообмен.

Массу Δm следует выбирать таким образом, чтобы при нагреве рабочей атмосферы автоклава от температуры $T_{\theta 0}$, соответствующей моменту окончания подачи азота, до температуры T_θ при постоянной плотности $\rho_{\theta 0}$ давление в реакционной камере стало равным

$p_0 + \Delta p$. Проведя математические преобразования, получим соотношение для расчета подаваемой массы азота

$$\Delta m = \rho_\theta \overline{\Delta m}.$$

Здесь

$$\overline{\Delta m} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1},$$

где

$$a_1 = T_\theta p_R \frac{\rho_\theta}{\rho_R};$$

$$a_2 = T_\theta p_R \left[\left(\frac{p_0}{p_R} \right)^{1/k} + \frac{\rho_\theta}{\rho_R} \right] - T_R (p_0 + \Delta p);$$

$$a_3 = -T_\theta \left(\frac{p_R}{p_0} \right)^{(k-1)/k} \Delta p.$$

Средняя плотность и температура в камере

$$\rho_{\theta\theta} = \rho_\theta (1 + \overline{\Delta m}),$$

$$T_{\theta\theta} = \left[\left(\frac{p_0}{p_R} \right)^{1/k} + \frac{\rho_\theta \overline{\Delta m}}{\rho_R} \right]^{k-1} \times \frac{T_R \overline{\Delta m} + T_\theta (p_R/p_0)^{(k-1)/k}}{1 + \overline{\Delta m}}.$$

Оценить затраты электроэнергии на получение дополнительной массы азота Δm можно по формуле

$$\Delta E_1 = \Delta m E_{N_2}.$$

Кроме того, при нагреве должна быть затрачена дополнительная электроэнергия на изменение внутренней энергии рабочей атмосферы

$$\Delta E_2 = \Delta m c_{VN} (T_\theta - T_{\theta\theta}) / \chi.$$

Монотонное нагревание с помощью ТЭНов, расположенных в реакционной камере объектов, включая азот, происходит при постоянном давлении и сопровождается уменьшением его плотности. До момента θ подачи дополнительного азота давление имеет нормальное значение. При этом расход электроэнергии описывается соотношением

$$E_1 = \int_0^{\Delta T_{\Delta p}} \frac{\vartheta c_{VN} \rho_0 T_{01}}{\chi T_N} dT_N = \frac{\vartheta c_{VN} \rho_0 T_{01}}{\chi} \ln \left(1 + \frac{\Delta T_\theta}{T_R} \right),$$

где T_{01} — исходная для процесса нагревания температура азота, которая в зависимости от способа заполнения азотом может принимать

значения T_0 и T_R ; T_N — текущая температура азота в процессе нагревания; ΔT_θ — изменение температуры до момента создания избыточного давления Δp .

В изобарическом процессе плотность и температура в момент θ связаны уравнением

$$\rho_\theta = \rho_0 \frac{T_0}{T_R + \Delta T_\theta}.$$

Дальнейший расход электроэнергии после момента θ в процессе изобарического нагревания подчиняется интегральному соотношению

$$E_2 = \int_{T_R + \Delta T_\theta}^{T_m} \frac{\vartheta c_{VN} \rho_\theta^* T_\theta}{\chi T_N} dT_N = \frac{\vartheta c_{VN} \rho_\theta^*}{\chi} (T_R + \Delta T_\theta) \ln \left(\frac{T_m}{T_R + \Delta T_\theta} \right),$$

где T_θ, ρ_θ^* — температура и плотность азота в момент θ при автоклавной обработке; T_m — максимальная температура изделия при автоклавной обработке.

По завершении всех стадий автоклавной обработки теплозащиты СКА общий расход электроэнергии

$$E_\Sigma = E_{00} + E_0 + \Delta E_1 + \Delta E_2 + E_1 + E_2 + E_{т.о.о},$$

где $E_{т.о.о}$ — электроэнергия, затрачиваемая на нагрев теплозащиты и оснастки, а также на передачу оборудованию части выделившейся теплоты,

$$E_{т.о.о} = \frac{T_m - T_{01}}{\chi} \sum_i m_i c_{Vi}.$$

При этом из ресивера расходуется масса азота

$$m_\Sigma = m_0 + \Delta m.$$

Вариативная часть расходуемой электроэнергии

$$E_\Sigma^{var} = E_{00} + E_0 + \Delta E_1 + \Delta E_2 + E_1 + E_2.$$

Результаты расчета вариативной части расходуемой электроэнергии в случае применения экономичного и прогрессивного алгоритмов управления давлением и температурой представлены на рис. 5.

Анализ результатов расчета показывает, что на уровне $\theta = 0,4 \dots 0,5$ затраченная электроэнергия имеет минимум. В связи с этим подачу избыточного давления следует осуществлять после $\theta > 0,5 \dots 0,6$. Сравнение рекомендаций предложенной методики и опытной отработки ступенчатого закона изменения давления представлено на рис. 6.

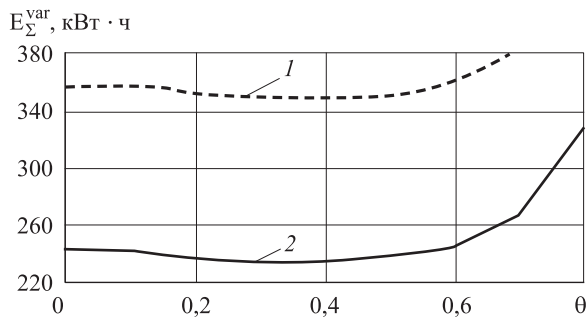


Рис. 5. Зависимости затрат электроэнергии на получение потребной массы азота и изменение его температуры в процессе термообработки теплозащиты СКА при использовании экономичного (1) и прогрессивного (2) алгоритмов заполнения реакционной камеры

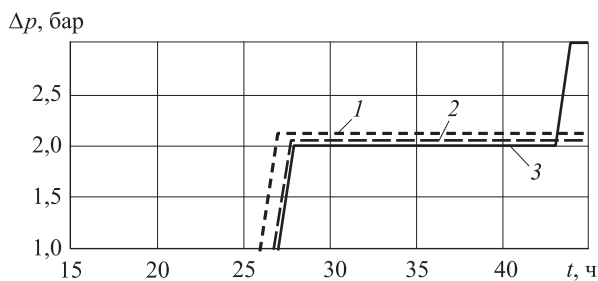


Рис. 6. Сравнение теоретических и опытных рекомендаций изменения давления:
1 — $t_k = 0,9$; 2 — $t_k = 1$; 3 — опыт

Наблюдается удовлетворительная согласованность времени дополнительной подачи азота и амплитуды изменения давления азота.

Выводы

1. На базе анализа данных, полученных контрольно-измерительными приборами системы управления автоклава, установлена математическая взаимосвязь между потребляемой мощностью ТЭНов и изменением температуры изделия, учитывающая индивидуальные особенности конструкции технологического оборудования.

2. На основе анализа газодинамических и теплофизических процессов подачи и нагрева азота в автоклаве предложена методика расчета потребляемой массы азота и электроэнергии, необходимой для получения и нагрева азота.

3. Показано, что для согласования момента дополнительной подачи азота и амплитуды изменения давления целесообразно использовать критерий минимума затрат электроэнергии на получение и нагрева азота в системе автоклава.

4. Сравнение рекомендаций предложенной методики с результатами опытной отработки режимов технологического процесса показало высокую эффективность применения методики.

Литература

- [1] Тарасов В.А., Романенков В.А., Комков М.А. Технологические основы снижения длительности цикла и повышения безопасности изготовления тепловой защиты спускаемых космических аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 8, с. 35–43.
- [2] Стрекалов А.Ф., Пащенко В.А., Романенков В.А., Морокова Е.В., Базанов В. В., Зимовский А.В., Андриянов В.С., Старостин В.В., Тарасов В.А., Филимонов А.С. *Термовакuumная установка для обработки изделия(ий)*. Пат. № 2439455, РФ, 2010, бюл. № 26, 9 с.
- [3] Стрекалов А.Ф., Пащенко В.А., Романенков В.А., Морокова Е.В., Базанов В.В., Зимовский А.В., Андриянов В.С., Старостин В.В., Тарасов В.А., Филимонов А.С. *Способ изготовления многослойных изделий*. Пат. № 2450921, РФ, 2012, бюл. № 26, 9 с.
- [4] Тарасов В.А., Беляков Е.В. Математическое моделирование процесса неизотермического отверждения полимерных композитных конструкций РКТ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Машиностроение*, 2011, № 1(82), с. 106–116.
- [5] Тюков Н.И., Даутов А.И., Закурдаева Е.А. Математическая модель процесса формования деталей вертолета из композиционных материалов. *Вестник УГАТУ*, 2007, т. 9, № 7(25), с. 97–101.
- [6] Senoguz M.T., Dungan F.D., Sastry A.M., Klamo J.T. Simulations and Experiments on Low-Pressure Permeation of Fabrics: Part II. The Variable Gap Model and Prediction of Permeability. *Journal of composite materials*, 2001, vol. 35, no. 14, pp. 1285–1322.
- [7] Мищенко С.В., Дмитриев О.С., Шаповалов А.В., Кириллов В.Н. Математическое моделирование процесса отверждения изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумного автоклавного формования в технологическом пакете. *Вестник ТГТУ*, 2001, т. 7, № 1, с. 7–19.

- [8] Комков М.А., Тарасов В.А., Кузнецов В.М. Исследование влияния вязкости эпоксидных связующих на степень пропитки волокнистых наполнителей. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2015, № 4, с. 24–27.
- [9] Komkov M.A. Rheological Properties of Polymer Binders Used in the Windings of Products of Composite Materials. *Polymer Science Series D*, 2013, vol. 6, iss. 1, pp. 26–30. Doi: 10.1134/S1995421212040089.<http://link.springer.com/article>.
- [10] Комков М. А., Тарасов В. А. Влияние вязкости связующего в пропиточной ванне на пористость композита при мокром способе намотке. *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12, с. 192–199. Doi: 10.7463/1214.0745284.
- [11] Коллинз Р. *Течение жидкости через пористые материалы*. Москва, Мир, 1964. 284 с.
- [12] Campbell F.C. *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier Science, 2004. 532 p.
- [13] Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.

References

- [1] Tarasov V.A., Romanenkov V.A., Komkov M.A. Tekhnologicheskie osnovy snizheniya dlitel'nosti tsikla i povysheniya bezopasnosti izgotovleniya teplovoi zashchity spuskaemykh kosmicheskikh apparatov [Technological principles of reducing the cycle time and improving the manufacturing safety of the thermal protection system for spacecraft reentry]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2014, no. 8, pp. 35–43.
- [2] Strekalov A.F., Pashchenko V.A., Romanenkov V.A., Morokova E.V., Bazanov V.V., Zimovskii A.V., Andriianov V.S., Starostin V.V., Tarasov V.A., Filimonov A.S. *Termovakuumnaia ustanovka dlia obrabotki izdeliia(ii)* [Thermal vacuum unit for processing the product(s)]. Patent RF no. 2439455, 2010.
- [3] Strekalov A.F., Pashchenko V.A., Romanenkov V.A., Morokova E.V., Bazanov V.V., Zimovskii A.V., Andriianov V.S., Starostin V.V., Tarasov V.A., Filimonov A.S. *Sposob izgotovleniia mnogosloinykh izdelii* [Method of manufacturing multilayer products]. Patent RF no. 2450921, 2012.
- [4] Tarasov V.A., Beliakov E.V. Matematicheskoe modelirovaniye protsessa neizotermicheskogo otverzhdeniia polimernykh kompozitnykh konstruksii RKT [Mathematical Simulation of Nonisothermal Hardening of Polymeric Composite Structures of Rocket and Space Machinery]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2011, no. 1(82), pp. 106–116.
- [5] Tiukov N.I., Dautov A.I., E.A. Zakurdaeva E.A. Matematicheskaya model' protsessa formovaniia detalei vertoleta iz kompozitsionnykh materialov [Mathematical model of helicopter parts molding of composite materials]. *Vestnik UGATU* [Bulletin USATU]. 2007, vol. 9, no. 7(25), pp. 97–101.
- [6] Senoguz M.T., Dungan F.D., Sastry A.M., Klamo J.T. Simulations and Experiments on Low-Pressure Permeation of Fabrics: Part II. The Variable Gap Model and Prediction of Permeability. *Journal of composite materials*, 2001, vol. 35, iss. 14, pp. 1285–1322.
- [7] Mishchenko S.V., Dmitriev O.S., Shapovalov A.V. i dr. Matematicheskoe modelirovaniye protsessa otverzhdeniia izdelii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov metodom vakuumnogo avtoklavnogo formovaniia v tekhnologicheskoy pakete [Mathematical modeling of solidification products from polymeric composite materials by vacuum autoclave molding technology packages]. *Vestnik TGTU* [Bulletin TSTU]. 2001, vol. 7, no. 1, pp. 7–19.
- [8] Komkov M.A., Tarasov V.A., Kuznetsov V.M. Issledovaniye vliianiya v'язkosti epoksidnykh svyazuiushchikh na stepen' propitki voloknistykh napolnitelei [Viscosity influence investigation of epoxy binders on impregnation degree of fiber fillers]. *Kleii. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants]. 2015, no. 4, pp. 24–27.
- [9] Komkov M.A. Rheological Properties of Polymer Binders Used in the Windings of Products of Composite Materials. *Polymer Science Series D*, 2013, vol. 6, iss. 1, pp. 26–30. Doi: 10.1134/S1995421212040089.<http://link.springer.com/article>.

- [10] Komkov M. A., Tarasov V. A. Vliianie viazkosti sviazuiushchego v propitochnoi vanne na poristost' kompozita pri mokrom sposobe namotke [A binder viscosity effect on the wet-wounded composite porosity in the impregnating bath]. *Nauka i Obrazovanie. MG TU im. N.E. Baumana* [Science and Education. BMSTU]. 2014, no. 12, pp. 192–199. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/745284.html> (accessed 10 May 2015). Doi: 10.7463/1214.0745284.
- [11] Kollinz R. *Techenie zhidkosti cherez poristyie materialy* [Fluid flow through porous materials]. Moscow, Mir publ., 1964. 284 p.
- [12] Campbell F.C. *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier Science, 2004. 532 p.
- [13] Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruksii raket i sredstv porazheniia* [Technology winding composite structures missiles and weapons]. Moscow, Bauman Press, 2011. 431 p.

Статья поступила в редакцию 23.06.2015

Информация об авторах

ТАРАСОВ Владимир Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

РОМАНЕНКОВ Владимир Алексеевич (Московская область) — главный химик. ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация, Ленина ул., д. 4А, e-mail: Vladimir.Romanenkov@rsce.ru).

КОМКОВ Михаил Андреевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: m_komkov@list.ru).

БОЯРСКАЯ Раиса Владимировна (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: brv152@mail.ru).

Information about the authors

TARASOV Vladimir Alekseevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Technologies of Space-Rocket Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

ROMANENKOV Vladimir Alekseevich (Moscow region) — Chief Chemist. JSC S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Lenin St, Bldg. 4A, e-mail: Vladimir.Romanenkov@rsce.ru).

KOMKOV Mikhail Andreevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technologies of Space-Rocket Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: m_komkov@list.ru).

BOYARSKAYA Raisa Vladimirovna (Moscow) — Candidate of Science, Associate Professor, Department of Technologies of Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: brv152@mail.ru).