

3) любой другой температурный режим – изменение температуры насадки во времени с любым начальным значением при возрастании времени приближается к периодическому режиму;

4) коэффициенты энергоэффективности можно явно находить, если известны максимальное и минимальное значения периодического режима;

5) на основе экспериментальных данных о максимальном и минимальном значениях периодического режима можно находить коэффициенты энергоэффективности для конкретных материалов насадки.

Результаты работы дают ясное представление о процессе аккумуляции и регенерации тепловой энергии в регенеративном теплообменнике; их можно взять за основу при построении и исследовании сложных математических моделей регенеративного теплообменника.

Литература

1. Васильев В.А. Методы расчета тепловых процессов в стационарном переключающемся регенеративном теплоутилизаторе: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. 136 с.
2. Гудков С.В., Филатова Е.Ю., Туголуков Е.Н., Алексеев С.Ю., Романенко А.В. Выбор рациональной конструкции регенеративного теплообменника для использования в системе автоматизированного проектирования индивидуальных дыхательных аппаратов // Вопросы Современной науки и техники. Университет им. В.И. Вернадского. 2006. № 2(4). С. 69–76.
3. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. М. 1967. 472 с.
4. Монаркин Н.Н., Наимов А.Н., Синицын А.А., Рогulina Т.В. Математическая модель процесса аккумуляции тепловой энергии в стационарном переключающемся ре-

генеративном теплоутилизаторе // Фундаментальные исследования. 2014. №11. Ч. 4. С. 759–764.

5. Находкин В.П. Разработка средств индивидуальной защиты органов дыхания и методических рекомендаций по их применению в условиях отрицательных температур: дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2005. 135 с.

References

1. Vasil'ev V.A. *Metody rascheta teplovykh processov v stacionarnom perekliuchaiushchemsya regenerativnom teploutilizatore* [Methods of calculating the thermal processes in the stationary switches the regenerative flow heat recovery. Dr. dis.]. St. Petersburg, 2010.
2. Gudkov S.V., Filatova E.Ju., Tugolukov E.N., Alekseev S.Ju., Romanenko A.V. *Vybor racional'noi konstrukcii regenerativnogo teplotobmennika dlia ispol'zovaniia v sisteme avtomatizirovannogo proektirovaniia individual'nykh dyhatel'nykh apparatov* [Selecting the rational design of a regenerative heat exchanger for use in computer-aided design of individual SCBA]. *Voprosy Sovremennoi nauki i tekhniki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Issues of Modern Science and Technology. University V.I. Vernadsky], 2006, № 2(4), pp. 69–76.
3. Demidovich B.P. *Lekcii po matematicheskoi teorii ustoi-chivosti* [Lectures on the mathematical theory of stability]. Moscow, 1967.
4. Monarkin N.N., Naimov A.N., Sinicyn A.A., Rogulina T.V. *Matematicheskaiia model' processa akkumuliatsii teplovoi energii v stacionarnom perekliuchaiushchemsya regenerativnom teploutilizatore* [The mathematical model of heat accumulation in the stationary switches the regenerative flow heat recovery]. *Fundamental'nye issledovaniia* [Fundamental research], 2014, №11, Vol. 4, pp. 759–764.
5. Nahodkin V.P. *Razrabotka sredstv individual'noi zashchity organov dyhaniia i metodi-cheskikh rekomendacii po ih primeneniiu v usloviiah otricatel'nykh temperatur* [Development of personal respiratory protection and guidelines for their use in subzero temperatures. Dr. dis.]. Yakutsk, 2005.

УДК 536.2

С.Ю. Осипов

Тверской государственный технический университет,

Ю.Р. Осипов, Д.А. Богданов

Вологодский государственный университет

МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ПОКРЫТИЙ ГУММИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ. ОБЗОР

Получены и исследованы математические модели процесса тепломассопереноса при вулканизации покрытий гуммированных объектов, которые позволяют повысить эффективность производственных процессов, повысить качество продукции, уменьшить энергозатраты. Получены соотношения, которые позволяют аналитически описать распределение температуры и вулканизирующего агента практически во всех возможных случаях конструкций многослойного гуммированного изделия при предварительной термообработке и вулканизации.

Модели теплотеноса, модели массопереноса, вулканизация, охлаждение, технологические режимы, теплообмен, гуммировочные покрытия, термообработка, эластомерные покрытия.

Mathematical models of heat-and-mass transfer process during vulcanization of rubberized objects, which allows to enhance the effectiveness of production processes, improve the quality of the product and reduce power inputs, are obtained and studied. Ratios, which allow to describe analytically temperature and vulcanizing agent distribution in almost every possible type of sandwiched rubberized product during preliminary thermal treatment and vulcanization, are obtained.

Models of heat transfer, models of mass transfer, curing, cooling, technological modes, heat exchange, gummed cover, heat treatment, elastomeric coverings.

Введение

Результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что при выборе тепловых режимов вулканизации покрытий необходимо руководствоваться следующими основными требованиями:

1. Режим термообработки (виды теплоносителей, последовательность и продолжительность их применения, изменение параметров по времени) должен обеспечивать высокие прочностные и антикоррозионные показатели готовых покрытий.

2. Циклы термообработки необходимо по возможности интенсифицировать, чтобы достичь высокой производительности вулканизационного оборудования (минимальной продолжительности процесса).

3. При осуществлении полной механизации и автоматизации процесса получения гуммированных объектов надо принимать во внимание безопасность работы, удобство обслуживания оборудования и его экономичность (окупаемость стоимости средств контроля и управления, оборудования, теплоносителей).

Необходимое качество гуммировочных покрытий обеспечивают подбором такого сочетания параметров процесса термообработки, при котором возможна равномерность вулканизации покрытий. Она осуществляется выбором рациональных условий теплообмена и теплопередачи, а также за счет конструкции вулканизационных аппаратов, варьирования характеристик резин и конструкций самих покрытий (число слоев и т.п.), если это отражается на эксплуатационных свойствах покрытий [1]–[6], [9]. Параметры теплоносителей выбирают так, чтобы в процессе термообработки не ухудшались свойства слоев покрытия из-за их деструкции под действием высоких температур. Необходимо найти оптимальные уровни температур, давлений и продолжительности их действия с учетом свойств материала слоев, условий их течения и взаимодиффузии на границах слоев и элементов покрытия [5], [8].

Для оценки выбранного ориентировочного режима вулканизации гуммировочных покрытий определяют температуры во времени на определенных участках внутри покрытия. Этот режим выбирают на основании накопленного опыта по проведению технологического процесса с учетом конструкции (слоистости покрытия, состава слоев и клеевых швов и их характеристик). Из полученных кинетических кривых $T = f(\tau)$ рассчитывают эффекты и эквивалентное время вулканизации. Затем делают вывод о равномерности температурного поля и степени вулканизации покрытия в зависимости от продолжительности процесса [6].

Основная часть

Задачи теплопереноса. Повышение температуры теплоносителя интенсифицирует процесс, но при этом следует опасаться недовулканизации внутренних слоев или перевулканизации наружных слоев в зависимости от общей его продолжительности.

Процесс конвективного теплопереноса в многослойном резинометаллическом изделии при вулканизации или предварительной термообработке описы-

вается системой дифференциальных уравнений (1) с начальным условием (2) и граничными условиями (3)–(6) (краевая задача в общем виде):

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i(x, \tau) \frac{\partial^2 T_i(x, \tau)}{\partial x^2} + Q_i(x, \tau), \quad (1)$$

$$\delta_{i-1} \leq x \leq \delta_i, \quad \delta_0 = 0, \quad \delta_n = \delta, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \tau > 0,$$

где T – температура, К; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; x – пространственная координата, м; Q – функция внутреннего источника теплоты, Дж/кг; δ – толщина покрытия, м.

$$T_i(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0 = \text{const}, \quad \delta_0 \leq x \leq \delta_n, \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура, К.

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\delta_0, \tau)}{\partial x} - \alpha [T_1(\delta_0, \tau) - T_c] = 0, \quad (3)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_n(\delta_n, \tau)}{\partial x} - \alpha [T_c - T_n(\delta_n, \tau)] = 0, \quad (4)$$

где T_c – температура окружающей среды, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; α – коэффициент теплообмена, Вт/м²·К.

$$T_i(x, \tau) = T_{i+1}(x, \tau), \quad \lambda_i \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x, \tau)}{\partial x} \quad \text{при } x = \delta_i. \quad (5, 6)$$

В зависимости от сочетания, чередования, числа слоев и используемых материалов обкладки и металлической основы из общей краевой задачи теплопереноса в многослойных объектах выделены следующие задачи теплопереноса:

1) при предварительном нагреве в однослойном покрытии (несколько слоев из одного материала рассматриваются как единая система);

2) при предварительной термообработке двухслойного гуммировочного покрытия (резина + эбонит) и вулканизации двухслойного резинометаллического объекта (подложка – сталь, обкладка – эбонит или резина);

3) при предварительной термообработке симметричного трехслойного гуммировочного покрытия (металлическая подложка + эластомерное покрытие + металлическая подложка; эластомерное покрытие + металлическая подложка + эластомерное покрытие; резина + эбонит + резина);

4) при вулканизации многослойного гуммировочного покрытия (несимметричного) и многослойного резинометаллического объекта.

Решение приведенных краевых задач в работе было получено с помощью операционного метода. Можно также использовать метод конечных интегральных преобразований или метод разделения переменных [3], [6], [7].

Задача 1. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке однослойных гуммировочных покрытий.

Решение краевой задачи (1–6) ($i = 1$) имеет вид:

$$\frac{T_0 - T(x, \tau)}{T_0 - T_c} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)} \cdot \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \quad (7)$$

где μ_n – корни характеристического уравнения $\text{ctg } \mu = \mu / Bi$; Fo – число Фурье тепловое; Bi – критерий Био тепловой.

Оптимальная скорость воздуха газового потока $v_{\text{опт}}$, которая наряду с размером твердых частиц инертного зернистого теплоносителя является важным фактором, влияющим на интенсивность теплообмена между поверхностью изделия и псевдоожиженным слоем, может быть найдена из уравнения критерия Рейнольдса [6]:

$$Re_{\text{опт}} = 0,12 Ar^{0,58}, \quad (500 < Ar < 183000),$$

где Ar – критерий Архимеда.

Для расчета максимальных коэффициентов теплоотдачи использовано уравнение [6]

$$\alpha_{\text{max}} = 1,23 \rho_{\text{ТВ}}^{0,22} \lambda_{\text{Г}}^{0,67} d^{-0,34} \left[\frac{c_{\text{Г}}^{0,33} \rho_{\text{Г}}^{0,11}}{\nu_{\text{Г}}^{0,11}} \right],$$

где $\rho_{\text{ТВ}}$ – плотность твердых частиц инертного зернистого теплоносителя, кг/м^3 ; $\lambda_{\text{Г}}$ – коэффициент теплопроводности газа, $\text{Вт/м} \cdot \text{К}$; d – диаметр твердых частиц инертного зернистого теплоносителя, мм ; $c_{\text{Г}}$ – теплоемкость газа, $\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$; $\rho_{\text{Г}}$ – плотность твердых газа, кг/м^3 ; $\nu_{\text{Г}}$ – кинематическая вязкость газа, $\text{м}^2/\text{с}$.

Задача 2. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке двухслойных гуммировочных покрытий и вулканизации двухслойных резинометаллических объектов.

Решение приведенной краевой задачи (1–6) ($i = 2$) имеет вид:

$$T_1(x, \tau) = T_c - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ [-\theta_0 Bi_1 Bi_2 \left(\cos \mu_n \sin \nu \mu_n \frac{x}{\delta_1} - K_{\varepsilon} \sin \mu_n \cos \nu \mu_n \frac{x}{\delta_1} \right) + \theta_0 Bi_1 \mu_n \left(\sin \mu_n \sin \nu \mu_n \frac{x}{\delta_1} + K_{\varepsilon} \cos \mu_n \cos \nu \mu_n \frac{x}{\delta_1} \right) + \theta_0 Bi_2 \nu \mu_n \cos \nu \mu_n \left(1 + \frac{x}{\delta_1} \right) + \right.$$

$$+ \theta_0 Bi_1 Bi_2 \sin \nu \mu_n \left(1 + \frac{x}{\delta_1} \right) \left. \right\} \exp(-\nu^2 \mu_n^2 \cdot Fo_1) \cdot \varphi^{-1},$$

при $\delta_1 \leq x \leq 0$, (8)

$$T_2(x, \tau) = T_c - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\theta_0 Bi_2 \nu \mu_n \left(\cos \nu \mu_n \cos \mu_n \frac{x}{\delta_2} - K_{\varepsilon} \sin \nu \mu_n \sin \mu_n \frac{x}{\delta_2} \right) + \theta_0 Bi_1 Bi_2 \left(\sin \nu \mu_n \cos \nu \mu_n \frac{x}{\delta_2} + K_{\varepsilon} \cos \nu \mu_n \sin \mu_n \frac{x}{\delta_2} \right) - \right. \right.$$

$$\left. \left. - K_{\varepsilon} \theta_0 Bi_1 Bi_2 \sin \mu_n \left(1 - \frac{x}{\delta_2} \right) - K_{\varepsilon} \theta_0 Bi_1 \cos \mu_n \left(1 - \frac{x}{\delta_2} \right) \right] \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_2) \right\} \cdot \varphi^{-1}(\mu_n),$$

при $0 \leq x \leq \delta_2$, (9)

где

$$\varphi(\mu_n) = \mu_n^2 (Bi_2 \nu + K_{\varepsilon} Bi_1) \times$$

$$\times (\nu \sin \nu \mu_n \cos \mu_n + \cos \nu \mu_n \sin \mu_n) + \mu_n^2 (Bi_1 + K_{\varepsilon} \nu Bi_2) \times$$

$$\times (\nu \cos \nu \mu_n \sin \mu_n + \sin \nu \mu_n \cos \mu_n) +$$

$$+ \nu \mu_n^2 (\cos \nu \mu_n \sin \mu_n + K_{\varepsilon} \sin \nu \mu_n \cos \mu_n) +$$

$$+ \mu_n (\nu \mu_n^2 + K_{\varepsilon} Bi_1 Bi_2) (\cos \nu \mu_n \cos \mu_n - \nu \sin \nu \mu_n \sin \mu_n) +$$

$$+ Bi_1 Bi_2 (\sin \nu \mu_n \cos \mu_n +$$

$$+ K_{\varepsilon} \cos \nu \mu_n \sin \mu_n) + \mu_n (K_{\varepsilon} \nu \mu_n^2 - Bi_1 Bi_2) \times$$

$$\times (\nu \cos \nu \mu_n \cos \mu_n - \sin \nu \mu_n \sin \mu_n),$$

$$K_{\lambda} = \lambda_1 / \lambda_2; \quad K_{\delta} = \delta_1 / \delta_2; \quad K_a = (a_1 / a_2)^{1/2}; \quad \nu = K_{\delta} K_a; \quad K_{\varepsilon} = K_{\lambda} / K_a; \quad \theta_0 = T_c - T_0.$$

Задача 3. Математическое моделирование процесса теплопереноса при предварительной термообработке симметричных трехслойных гуммировочных покрытий.

Решение приведенной краевой задачи (1–6) имеет вид:

$$\frac{T_1(x, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos\left(\mu_n K_a^{1/2} \frac{x}{\delta_2}\right)}{\varphi_n \mu_n} \times \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_1 K_{\delta}^2 K_a), \quad (10)$$

$$\frac{T_2(x, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} 2 \left\{ \cos\left(\mu_n \frac{x - \delta_1}{\delta_2}\right) \cos(\mu_n K_a^{1/2} K_{\delta}) - K_{\varepsilon} \sin\left(\mu_n \frac{x - \delta_1}{\delta_2}\right) \sin(\mu_n K_a^{1/2} K_{\delta}) \right\} \cdot \varphi^{-1}(\mu_n) \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_2), \quad (11)$$

где $\varphi(\mu_n) = \left\{ \left(1 + K_{\varepsilon} K_a^{1/2} K_{\delta} + \frac{1 + K_{\delta}}{Bi} \right) \sin \mu_n + \frac{\mu_n}{Bi} (1 + K_{\delta}) (1 + K_{\varepsilon} K_a^{1/2} K_{\delta}) \cos \mu_n \right\} \cdot \mu_n \cos(\mu_n K_a^{1/2} K_{\delta}) +$

$$+ \left\{ \left(1 + K_{\varepsilon}^{-1} K_a^{1/2} K_{\delta} + \frac{1 + K_{\delta}}{Bi} \right) \cos \mu_n + \right. \\ \left. + \frac{\mu_n}{Bi} (1 + K_{\delta}) (1 + K_{\varepsilon}^{-1} K_a^{1/2} K_{\delta}) \sin \mu_n \right\} \times \\ \times \mu_n K_{\varepsilon} \sin (\mu_n K_a^{1/2} K_{\delta});$$

$\delta = \delta_1 + \delta_2$; μ_n – корни уравнения

$$1 - \frac{\mu_n}{Bi} (1 + K_{\delta}) tg \mu - K_{\varepsilon} tg \mu \cdot tg (\mu K_a^{1/2} K_{\delta}) - \\ - K_{\varepsilon} \frac{\mu}{Bi} (1 + K_{\delta}) tg (\mu K_a^{1/2} K_{\delta}) = 0.$$

Задача 4. Математическое моделирование процесса теплопереноса при вулканизации многослойных гуммировочных покрытий и многослойных резинометаллических объектов.

Решение краевой задачи (1–6) получено с помощью метода конечных интегральных преобразований:

$$T_i(x_i, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U(\mu_k, \tau) \cdot W_i(x_i, \mu_k)}{S_k}, \quad (12)$$

где

$$U(\mu_k, \tau) = \exp(-\mu_k^2 \tau) \times \\ \times \left(U(\mu_k, 0) + \int_0^{\tau} (G(\mu_k, \tau) + F(\mu_k, \tau)) \exp(\mu_k^2 \tau) d\tau \right);$$

$U(\mu_k, 0) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{a_i} T_0 \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} W_i(x_i, \mu_k) dx_i$ – изображение начальных условий;

$G(\mu_k, \tau) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{a_i} \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} Q_i(x_i, \tau) W_i(x_i, \mu_k) dx_i$ – изображение функции источника теплоты;

$$F(\mu_k, \tau) = \frac{a}{\lambda_n} W_n(\delta_n, \mu_k) T_c - \frac{a}{\lambda_1} W_1(\delta_0, \mu_k) T_c;$$

$W_i(x_i, \mu_k) = C1_i \cos \sqrt{\frac{\mu_k}{a_i}} x_i + C2_i \sin \sqrt{\frac{\mu_k}{a_i}} x_i$ – ядро интегрального преобразования; коэффициенты $C1_i$, $C2_i$ и собственные числа μ_k определяются из однородных граничных условий:

$$\lambda_1 \frac{dW_1(\delta_0, \mu)}{dx_1} - aW_1(\delta_0, \mu) = 0; \\ \lambda_n \frac{dW_n(\delta_n, \mu)}{dx_n} - aW_n(\delta_n, \mu) = 0; \\ W_{i-1}(x_{i-1}, \mu) = W_i(x_{i-1}, \mu); \\ \lambda_{i-1} \frac{dW_{i-1}(x_{i-1}, \mu)}{dx_{i-1}} = \lambda_i \frac{dW_i(x_{i-1}, \mu)}{dx_{i-1}}; \\ S_k = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{a_i} T \int_{\delta_{i-1}}^{\delta_i} W_i^2(x_i, \mu_k) dx_i.$$

При термообработке обкладок из эбонитов наблюдали повышение температуры внутри обкладок выше температуры окружающей среды. Наличие внутреннего тепловыделения обусловлено повышенным содержанием серы в эластомере. В эбонитовых смесях выделяется при вулканизации до $920 \cdot 10^3$ Дж/кг каучука [3], [6].

Суммарное количество теплоты Q_i , выделенное за период вулканизации от τ_0 до τ_m при температуре $T(x, \tau)$ в единице объема, может быть рассчитано методом численного интегрирования:

$$Q_i \approx \frac{2\lambda_i}{\delta_i^2} \int_{\tau_0}^{\tau_m} \Delta T d\tau.$$

Таким образом, полученные соотношения (7)–(12) позволяют аналитически описать распределение температуры практически во всех возможных случаях конструкций многослойного гуммированного изделия при предварительной термообработке и вулканизации. Они были проверены экспериментально на установках периодического и непрерывного действия и доказана их адекватность опытным данным. Кроме того, построенные модели использованы в дальнейшем для анализа влияния параметров тепло- и массопередачи на качество получаемых гуммировочных покрытий при создании инженерной методики расчета вулканизационных аппаратов. Исследования по определению времени прогрева показали, что время достижения установившегося теплового состояния обкладок растет с увеличением толщины эластомерного покрытия и металлической основы и уменьшается с увеличением коэффициента теплоотдачи от среды к поверхности объекта [6].

Задачи массопереноса. Вулканизация как кинетический процесс состоит в связывании между собой макромолекул каучука поперечными химическими связями с образованием единой пространственной сетки вулканизата и вступлении в реакции с вулканизующими агентами, ускорителями, активаторами, наполнителями [5], [7]. В связи с этим была сделана попытка учесть влияние переноса массы на термообработку гуммировочных покрытий.

Массоперенос вулканизующего агента, в частности серы, в многослойных обкладках обуславливается неоднородностью распределения его концентраций по всему объему, а также разностью температур и давлений.

Динамика процесса вулканизации эластомерных покрытий может быть прослежена по распределению и содержанию вулканизующего агента, не вступившего в реакцию с каучуком. Зная распределение концентрации свободной серы в слоях покрытия в течение всего процесса структурирования каучука, можно варьировать параметры термообработки, а следовательно, разработать рациональный тепловой режим вулканизации.

Процесс массопереноса вулканизующего агента в однослойном эластомерном покрытии при предварительной термообработке описывается дифференциальным уравнением (13) с начальным (14) и граничными условиями (15)–(16):

$$\frac{\partial C_s}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C_s}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (13)$$

где C_s – концентрация вулканизирующего агента в пластине, %.

$$C_s(x, \tau) = \text{const} = C_0 \quad \text{при} \quad \tau = 0, \quad (14)$$

где C_0 – начальная концентрация вулканизирующего агента в пластине, %.

$$\frac{\partial C_s(0, \tau)}{\partial x} = h[C_s(0, \tau) - C_p], \quad (15)$$

где C_p – равновесная концентрация, соответствующая концентрации распределяемого вещества в ядре потока внешней фазы по обеим сторонам пластины; концентрация вулканизирующего агента в пластине, %; $h = \beta / (A_p D)$; β – коэффициент массоотдачи, м/с; A_p – коэффициент распределения; D – коэффициент диффузии, м²/с.

$$\frac{\partial C_s(\delta, \tau)}{\partial x} = -h[C_s(\delta, \tau) - C_p]. \quad (16)$$

Решение краевой задачи (13)–(16) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{C(x, \tau) - C_0}{C_c - C_0} = 1 - 2Bi_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n] \psi_n(\mu_n)}{\mu_n (\mu_n^2 + Bi_m^2 + 2Bi_m)} \times \\ \times \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m) + C_p - 2h\delta \times \\ \times C_p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\mu_n \cos \mu_n \frac{x}{\delta} + h\delta \sin \mu_n \frac{x}{\delta} \right) \cdot [1 - (-1)^n]}{\mu_n (\mu_n^2 + h^2 \delta^2 + 2h\delta)}, \quad (17) \end{aligned}$$

где $\mu_n > 0$ – корни уравнения $\text{ctg} \mu = \frac{\mu^2 - Bi_m^2}{2\mu \cdot Bi_m}$;

$$\psi_n(\mu_n) = \mu_n \cos \mu_n \frac{x}{\delta} + Bi_m \sin \mu_n \frac{x}{\delta}.$$

Так как в резинометаллическом изделии процесс массопереноса вулканизирующего агента происходит только в эластомерном слое, то, соответственно, рассмотрим однослойную пластину при отсутствии потока вещества с поверхности металла.

Процесс массопереноса вулканизирующего агента в эластомерной обкладке резинометаллического изделия при вулканизации описывается дифференциальным уравнением (13) с начальным (14), как и в предыдущем случае, но с несимметричными граничными условиями (18)–(19):

$$\frac{\partial C_s(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_s(\delta, \tau)}{\partial x} = -h[C_s(\delta, \tau) - C_p]. \quad (19)$$

Решение краевой задачи (13), (14), (18), (19) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_s}{\partial \tau} = \frac{2}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 + h^2 \delta^2}{(\mu_n^2 + h^2 \delta^2) + h\delta} \times \\ \times \cos \frac{\mu_n x}{\delta} \left[C_0 \frac{\mu_n}{\delta} \sin \mu_n \exp\left(-\frac{D\mu_n^2}{\delta^2} \tau\right) \right] - \\ - \frac{C_p \delta^2}{\mu_n^2} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{D\mu_n^2}{\delta^2} \tau\right) \right) + \frac{(-1)^{n+1} C_p h^2 \delta^2}{\sqrt{\mu_n^2 + h^2 \delta^2}}, \quad (20) \end{aligned}$$

где $\mu_n > 0$ – корни уравнения $\text{ctg} \mu = \mu / (h\delta)$.

Решения приведенных краевых задач массопереносности получены с помощью метода конечных интегральных преобразований с последующей доработкой с целью улучшения сходимости рядов и были проверены экспериментально на установках периодического и непрерывного действия, а также доказана их адекватность опытным данным [2].

Выводы

После расчета температурных полей оценивают их действие, для чего желательнее непосредственное измерение кинетики вулканизации покрытий при переменных температурах по программам, задаваемым по расчетам температур во времени для интересующих участков покрытия [3], [6].

Чем точнее определены условия теплообмена и учтены основные факторы, влияющие на тепловой процесс, чем правильнее модель воссоздает моделируемый объект, тем эффективнее метод проектирования теплового режима вулканизации гуммировочных покрытий [8].

Так как точные расчеты, проводимые с учетом всех факторов (внутренние источники теплоты, подвижность границ и др.), достаточно трудоемки, целесообразно разделять проектирование режимов вулканизации на несколько периодов. Сначала на упрощенных моделях нужно исследовать необходимое число вариантов режимов и сделать предварительный выбор наиболее подходящих из них, а затем применить уточненные расчеты с целью выбора оптимального варианта.

Обычно нагрев покрытий гуммированных объектов производят до тех пор, пока не будет получена минимальная степень вулканизаций, при которой можно снижать давление при гарантии отсутствия пористости, расслоений и отслоений.

Целесообразность дальнейшего нагрева покрытия гуммируемого изделия до достижения более высоких степеней вулканизации определяют в зависимости от требуемого комплекса свойств покрытия и возможности последующей довулканизации обкладки после выхода ее из реакционной камеры вулканизационного аппарата. В случаях, когда обкладка имеет большую толщину, есть опасность перевулканизации некоторых слоев при длительном их охлаждении на воздухе.

Охлаждение влияет на последующую довулканизацию покрытия на воздухе. Очевидно, что охлаж-

денное гуммировочное покрытие практически не довулканизуется на воздухе.

Исходя из рассмотренных выше особенностей теплопередачи при горячем креплении покрытий к металлическим поверхностям, можно выделить основные способы интенсификации тепловых режимов процесса. При этом следует учитывать, что большинство способов взаимосвязано между собой: изменение одного из факторов влияния неизбежно вызывает изменение других. В некоторых случаях такое изменение приводит к противоположному результату, и приходится выбирать компромиссное решение. Так, повышение температуры вулканизации, а следовательно, и скорости термообработки сокращает индукционный период и уменьшает плато вулканизации.

Литература

1. Аваев А.А., Осипов Ю.Р. Аналитические модели теплопереноса в резиноталлических системах в процессах термической вулканизации резиновых обкладок при малой концентрации вулканизующего агента // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. №5(66). С. 5–9.
2. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости. М., 2002.
3. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеperша Л.М. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий. М., 1984.
4. Осипов С.Ю., Осипов Ю.Р., Шлыков А.А. Влияние послевулканизационного охлаждения и технологических режимов термообработки на качественные показатели эластомерных композиционных материалов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. № 5(66). С. 30–34.
5. Осипов С.Ю., Осипов Ю.Р., Панфилова О.А., Сеичев В.П., Шлыков С.А. Диффузия и процессы нестационарной теплопроводности при изготовлении композиционных материалов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. № 1. С. 17–20.
6. Осипов Ю.Р. Термообработка и работоспособность покрытий гуммированных объектов. М., 1995.
7. Осипов Ю.Р., Осипов С.Ю., Панфилова О.А. Математическое моделирование процесса массопереноса вулканизующего агента при вулканизации гуммировочного многослойного покрытия // Конструкции из композиционных материалов. М., 2007. Вып. 4. С. 37–47.
8. Осипов Ю.Р., Осипов С.Ю., Панфилова О.А. Оценка экономической эффективности и оптимизация управления производственными процессами // Организатор производства. Воронеж, 2014. №1. С. 50–53.
9. Осипов Ю.Р., Осипов С.Ю., Панфилова О.А. Автоматизированное проектирование оптимальной теплообменной системы на основе решения задачи процесса теп-

лопереноса // Вестник Череповецкого государственного университета. 2014. №4(57). С. 15–20.

References

1. Avaev A.A., Osipov Ju.R. Analiticheskie modeli teploperenosa v rezinometallicheskih sistemah v processah termicheskoi vulkanizacii rezinovykh obkladok pri maloi koncentracii vulkanizuiushhego agenta [Analytical models of heat transfer in the rubber system during heat curing rubber plates at low concentration of the curing agent]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2015, №5(66), pp. 5–9.
2. Kartashov E.M., Kudinov V.A. *Analiticheskaya teoriya teploprovodnosti i prikladnoi termouprugosti* [Analytical theory of heat conduction and Applied thermoelasticity]. Moscow, 2002.
3. Lukomskaia A.I., Badenkov P.F., Kopersha L.M. *Teplovye osnovy vulkanizacii rezinovykh izdelii* [Heat bases of vulcanization of rubber products]. Moscow, 1984.
4. Osipov S.Yu., Osipov Yu.R., Shlykov A.A. Vliianie poslevulkanizacionnogo ohlazhdeniia i tehnologicheskikh rezhimov termoobrabotki na kachestvennye pokazateli elastomernykh kompozitsionnykh materialov [Influence of poslevulkanizatsionnogo cooling and process heat treatment regimes on the quality of indicators of elastomeric composite materials]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2015, № 5(66), pp. 30–34.
5. Osipov S.Yu., Osipov Yu.R., Panfilova O.A., Senichev V.P., Shlykov S.A. Diffuziia i processy nestacionarnoi massoprovodnosti pri izgotovlenii kompozitsionnykh materialov [Diffusion processes and unsteady mass conductivity in the manufacture of composite materials]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2015, № 1, pp. 17–20.
6. Osipov Yu.R. *Termoobrabotka i rabotosposobnost' pokrytii gummirovannykh ob"ektov* [Heat treatment and operation facilities for rubberized coating]. Moscow, 1995.
7. Osipov Yu.R., Osipov S. Yu., Panfilova O.A. Matematicheskoe modelirovanie processa massopere-nosa vulkanizuiushhego agenta pri vulkanizacii gummirovochnogo mnogosloinogo pokrytiia [Mathematical modeling of the mass transfer of the curing agent in the vulcanization rubberized multilayer coating]. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov* [Construction of composite materials]. Moscow, 2007, Vol. 4, pp. 37–47.
8. Osipov Yu.R., Osipov S. Yu., Panfilova O.A. Ocenka ekonomicheskoi effektivnosti i optimizaciia upravleniia proizvodstvennymi processami [Cost-effectiveness and optimization of industrial process control]. *Organizator proizvodstva* [Production Organizer]. Voronezh, 2014, №1, pp. 50–53.
9. Osipov Yu.R., Osipov S. Yu., Panfilova O.A. Avtomatizirovannoe proektirovanie optimal'noi teploobmennoi sistemy na osnove resheniia zadachi processa teploperenosa [Computer-aided design of optimal heat exchange system based on the heat transfer process of problem]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2014, №4(57), pp. 15–20.