

DOI 10.23859/1994-0637-2017-1-76-1
УДК 662.289:678.063

© Аваев А.А., Осипов Ю.Р., 2017

Аваев Александр Алексеевич

Кандидат технических наук, доцент,
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: iur.osipov2011@yandex.ru

Avaev Alexander Alexeevich

PhD (Technology), Associate professor,
Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: iur.osipov2011@yandex.ru

Осипов Юрий Романович

Доктор технических наук, профессор,
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: iur.osipov2011@yandex.ru

Osipov Yuriy Romanovich

Doctor of technical sciences, professor,
Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: iur.osipov2011@yandex.ru

**О РАСЧЕТЕ ВРЕМЕНИ ПРОГРЕВА
ЭЛАСТОМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ
НА ТКАНИ**

**ABOUT WARM-UP TIME
CALCULATION FOR ELASTOMERIC
COATING ON FABRIC**

Аннотация. Работа посвящена расчету времени прогрева эластомерного покрытия на ткани. Предлагаемый метод основан на аналитической математической модели внутреннего теплопереноса в эластомерном покрытии. Математическая модель построена на линейном уравнении теплопроводности применительно к симметричным граничным условиям III рода. Результаты расчетов проиллюстрированы графически. Сравнение расчетов с данными опытов свидетельствует о возможности применения математической модели в инженерной практике. Представленный метод может быть использован для совершенствования технологии термической вулканизации.

Abstract. This work is focused on the warm-up time calculation for the elastomeric coating on fabric. Suggested method is based on analytic mathematic model of inside heat transfer in the elastomeric coating. Mathematic model is built on linear equation of heat transfer for symmetric boundary conditions of III type. The calculation results are illustrated by graphs. The comparison of the calculations and the experiment data testify to possibility of analytic model application in engineering practice. The method presented in the paper may be used for the improvement of thermal vulcanization technology.

Ключевые слова. Аналитическая модель, внутренний перенос тепла, эластомерное покрытие на ткани, линейное уравнение теплопроводности, граничные условия, термическая вулканизация.

Keywords. Analytic model, inside heat transfer, elastomeric coating on fabric, linear equation of heat transfer, boundary conditions, thermal vulcanization.

Введение

Процесс термической вулканизации эластомерных покрытий на тканевой основе представляет собой один из самых сложных тепловых процессов, протекающих при изменяющихся во времени тепловых потоках и тепловых эффектах, которые приводят к изменению теплофизических свойств эластомера. Процесс вулканизации, кро-

ме того, зависит от организации и режима теплообмена между объектом и внешней средой.

При вулканизации в индукционный период происходит течение эластомера, а при нагреве покрытия с большим содержанием вулканизирующего агента выделяется теплота вследствие экзотермической реакции вулканизации. В ходе вулканизации необходимо обеспечить такое распределение и изменение температуры во времени, при котором для данного типа эластомера свойства готового продукта оказались бы наилучшими при оптимальной организации всего технологического процесса [4].

Выбор режима вулканизации основан на анализе температурных полей в эластомерном покрытии и на объективной оценке результатов их воздействия на процесс вулканизации. При этом важно правильно спрогнозировать период предварительного нагрева вулканизуемого объекта, предшествующего фазе течения эластомера, в частности: продолжительность этого периода и распределение температуры эластомера на момент его окончания. Возможность подобного прогнозирования может быть обеспечена путем математического моделирования этапа прогрева системы «ткань – эластомер».

Основная часть

Так как в рассматриваемом случае эластомер полностью пропитывает тканевую основу, на которую он наносится, следовательно, система «ткань – эластомер» имеет практически одинаковые теплофизические свойства [1], [2], то в качестве модели такой системы может быть предложена однородная бесконечная пластина, а ее теплообмен с внешней средой осуществляется по закону Ньютона.

В данном случае внутренний перенос тепла в системе «ткань – эластомер» описывается известным линейным уравнением теплопроводности [1]:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (0 < x < l) \quad (1)$$

где $t(x, \tau)$ – температура точки пластины толщины l с координатой x в момент времени τ ; a – коэффициент температуропроводности системы «ткань – эластомер», $\text{м}^2/\text{с}$.

При решении уравнения (1) использованы следующие краевые условия

$$t(x, 0) = f(x); \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c(\tau) - t(0, \tau)] = 0; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c(\tau) - t(l, \tau)] = 0, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности системы «ткань – эластомер», $\text{Вт}/(\text{м}^\circ\text{C})$; α – коэффициент теплоотдачи от внешней среды с температурой $t_c(\tau)$, в общем случае зависящей от времени τ , к поверхностям $x = 0$ и $x = l$ системы, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{C})$.

Условие (2) является начальным, оно соответствует распределению температуры в системе «ткань – эластомер» в начальный момент времени $\tau = 0$ и является в общем случае функцией координаты x .

Условия (3), (4) относятся к числу граничных условий, они отвечают теплообмену по закону Ньютона на поверхностях $x = 0$, $x = l$ системы (граничные условия III рода).

Решение уравнения (1) при краевых условиях (2)–(4) получено с помощью конечных интегральных преобразований [3] и может быть представлено в следующем виде [2]:

$$t(X, \tau) = t_c(\tau) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{p_m(\tau)}{l} - \frac{Bi}{\mu_m} \cdot \left[1 + (-1)^{m+1} \right] \cdot t_c(\tau) \right\} \cdot \frac{\mu_m \cdot \cos(\mu_m \cdot X) + Bi \cdot \sin(\mu_m \cdot X)}{\mu_m^2 + 2Bi + Bi^2}, \quad (5)$$

где

$$p_m(\tau) = F_m(\tau) + \left\{ \int_0^l f(x) \cdot \left[\mu_m \cdot \cos\left(\mu_m \cdot \frac{x}{l}\right) + Bi \cdot \sin\left(\mu_m \cdot \frac{x}{l}\right) \right] \cdot dx \right\} \cdot e^{-a \cdot \left(\frac{\mu_m}{l}\right)^2 \cdot \tau};$$

$$F_m(\tau) = \frac{a}{l} \cdot \left[\int_0^l Bi \cdot \mu_m + \frac{1}{2} \cdot (\mu_m^2 + Bi^2) \cdot \sin \mu_m \right] \cdot t_c(\omega) \cdot e^{-a \cdot \left(\frac{\mu_m}{l}\right)^2 \cdot (\tau - \omega)} d\omega;$$

$Bi = \alpha \cdot \lambda / l$ – критерий Био; $X = x/l$ – безразмерная координата точки пластины; ω – переменная интегрирования; $\mu_m > 0$ ($m = 1, 2, \dots$) – корни характеристического уравнения

$$ctg \mu = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{Bi} - \frac{Bi}{\mu} \right).$$

На рис. 1 представлены результаты расчета нестационарного температурного поля системы «ткань – эластомер», произведенные в соответствии с решением (5). Расчеты проводились применительно к условиям прогрева системы для эластомера марки 2566 (НК+СКБ) в аппарате непрерывного действия с псевдоожиженным слоем инертного зернистого теплоносителя при следующих параметрах [1]: $l = 0,001$ м; $a = 0,71 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $\lambda = 0,705$ Вт/(м²°C); $\alpha = 100$ Вт/(м²°C); $t_c(\tau) = 150$ °C; $f(x) = 30$ °C.

Линии с номерами 1, 2, 3, 4 соответствуют следующим значениям текущего времени τ : 1 – 0,1 с; 2 – 40 с; 3 – 80 с; 4 – 120 с. Из рис. 1 следует, что линии нестационарного температурного поля с течением времени становятся короче, превращаясь в итоге (т.е. при выходе на стационарный режим) в отрезок прямой линии, который параллелен оси абсцисс. Длина отрезка прямой при этом равна 1.

На этом принципе строится зависимость длин L линий поля от безразмерного критерия времени Фурье – $Fo = a \cdot \tau / l^2$, т.е. $L = L(Fo)$. Пример такой зависимости представлен на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что стационарный режим нагрева системы «ткань – эластомер» наступает при значении критерия Фурье, составляющем примерно 4,0. Конечно же, прогрев рассматриваемой системы следует рассматривать не обязательно до наступления стационарного режима, а, например, до начала периода фазовых превращений, когда при дальнейшем расчете линий нестационарных температурных полей следует учитывать появление источников (стоков) тепла [1], [2].

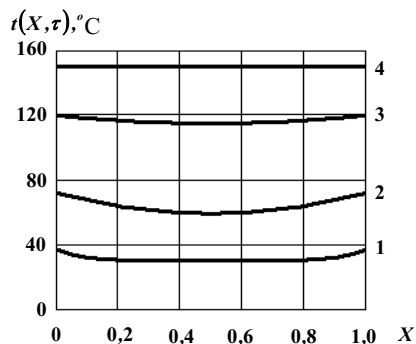


Рис. 1. Пример расчета температурного поля системы «ткань – эластомер» в соответствии с решением (5)

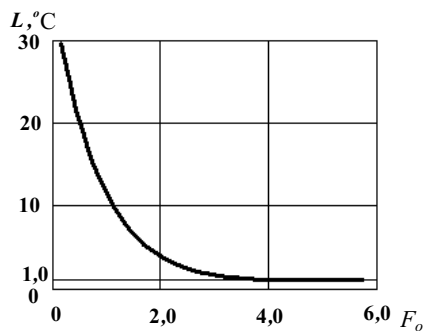


Рис. 2. Пример расчетной зависимости длин линий нестационарного температурного поля от критерия Фурье

Предположим, что нас интересует значение критерия Фурье, соответствующее достижению максимального (среднего интегрального или минимального) значения температуры, составляющего, например, 120 °С. Это также может быть получено расчетным путем (см. рис. 3).

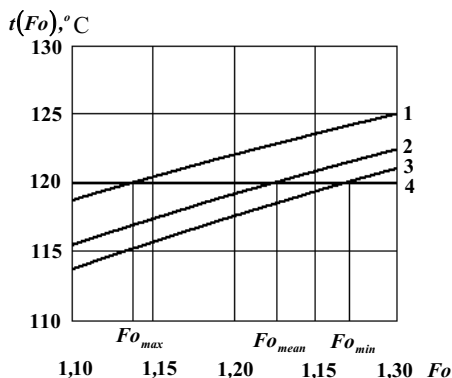


Рис. 3. Пример расчетов значений $Fo_{\max}$, Fo_{mean} , $Fo_{\min}$ при заданной температуре, составляющей 120 °С

На рис. 3 кривыми 1–3 представлены графики зависимостей от критерия Фурье, соответственно, максимального, среднего интегрального и минимального значений температуры для линий нестационарного температурного поля. Прямая линия 4, параллельная оси абсцисс, соответствует интересующему нас значению температуры – 120 °С. Абсциссы точек пересечения этой прямой с линиями 1–3 представляют собой значения критерия Фурье, соответствующие моменту достижения максимального ($Fo_{\max}$), среднего интегрального (Fo_{mean}) и минимального ($Fo_{\min}$) значений температуры на одной из линий температурного поля. Следует особо отметить, что все зависимости, представленные на рис. 2 и 3, могут быть автоматически рассчитаны при минимальной затрате времени. Так, в частности, расчет и построение графиков

таких зависимостей при работе с Windows-приложением MathCAD составляет всего лишь доли секунды.

Представленные расчеты апробированы экспериментально, а предлагаемый метод может быть рекомендован для применения в инженерной практике при разработке оптимальных методов организации технологического процесса термической вулканизации эластомерных покрытий на тканевой основе.

Выводы

Необходимое качество эластомерных покрытий на тканевой основе обеспечивается подбором такого сочетания параметров процесса термообработки, при котором возможна равномерность вулканизации покрытий. Она осуществляется выбором рациональных условий внутреннего и внешнего теплообмена, а также за счет конструкций вулканизационных аппаратов и варьирования характеристик эластомеров.

Особое внимание следует уделять первому этапу вулканизации – процессу прогрева эластомерного покрытия до момента начала фазы изменения агрегатного состояния эластомера, что, как правило, сопряжено с изменением его теплофизических свойств.

Литература

1. Аваев А.А. Математическое моделирование нестационарной теплопроводности при вулканизации эластомерных покрытий на тканевых и металлических подложках. Череповец, 2008. 133 с.
2. Аваев А.А., Осипов Ю.Р., Павлов В.В. Математическая модель предварительного нагрева эластомерного покрытия на тканевой основе при его вулканизации // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. №12. С. 10–11.
3. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М., 1985. 480 с.
4. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеперша Л.М. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий. М., 1972. 360 с.

References

1. Avaev A.A. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnoi teploprovodnosti pri vulkanizatsii elastomernykh pokrytii na tkanevykh i metallicheskih podlozhkakh* [Mathematic models of the instationary heat conduction during the vulcanization of the elastomer coats on the fabric and metal bases]. Cherepovets, 2010, 133 p.
2. Avaev A.A., Osipov Yu.R., Pavlov V.V. *Matematicheskia molel' predvaritel'nogo nagreva elastomernogo pokrytiia na tkanevoi osnove pri ego vulkanizatsii* [Mathematic model of the elastomer coat on fabric base preliminary heating in it's vulcanization]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and oil-gas machine building], 2008, vol. 12, pp. 10–11.
3. Kartashov E.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytic methods in solid bodies heat conduction theory]. Moscow, 1985, 480 p.
4. Lukomskaia A.I., Badenkov P.F., Kpersha L.M. *Teplovyie osnovy vulkanizatsii rezinovykh izdelii* [Heat bases of the rubber articles vulcanization]. Moscow, 1972, 360 p.

Аваев А.А., Осипов Ю.Р. О расчете времени прогрева эластомерного покрытия на ткани // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №1. С. 9–13.

For citation: Avaev A.A., Osipov Y.R. About warm-up time calculation for elastomeric coating on fabric. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 1, pp. 9–13.