

УДК 678.065:678.028

М.В. Шаптала, В.А. Ищенко

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ВУЛКАНИЗАЦИИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН С УЧЕТОМ ТРЕХМЕРНОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Введение

Технология изготовления пневматических шин предусматривает сборку конструкций шин на специальных сборочных станках из предварительно изготовленных сырых, не обладающих упругими свойствами, резиновых деталей и последующей вулканизацией собранной шины в пресс форме. В процессе вулканизации заготовка шины прогревается до необходимой температуры, при которой происходит химическая реакция серы и каучука [1], в процессе которой молекулы каучука сшиваются в единую пространственную сетку, и резина приобретает требуемые упругие характеристики. Это наиболее энергоемкий процесс, который в зависимости от габаритов шины может длиться от нескольких десятков минут до десяти и более часов.

Выделяют четыре стадии процесса вулканизации (рис. 1). Индукционный период (I) – первая стадия, при которой происходит подача теплоносителя при высоком давлении во внутреннюю полость шины и к наружной поверхности пресс формы, на которых устанавливается заданная температура. Химическая реакция на этой стадии отсутствует. Период вулканизации (II) – вторая стадия, во время которой происходит прогрев конструкции, по мере которого свойства резины достигают требуемых значений. В силу малой теплопроводности резины время прогрева зависит от толщины конструкции. В виду неравномерности прогрева в отдельных зонах шины, расположенных вблизи поверхностей нагрева реакция вулканизации может быть завершена. А в трудно прогреваемых зонах, их называют холодные точки, реакция, возможно, еще и не началась. Плато вулканизации (III) – третья стадия, реакция вулканизации уже завершена на отдельных участках и свойства резин достигли нужных значений и сохраняются на требуемом уровне. Реверсия (IV) – четвертая стадия, свойства участков резин,

где реакция вулканизации завершена, ухудшаются. Прекращение подачи теплоносителя и начало охлаждения может быть начато на третьей или четвертой стадиях. Таким образом, для получения высокого качества изделия при минимальных затратах тепла, необходимо разработать такой режим вулканизации, т.е. подачу и смену теплоносителей [1,2], при котором за наименьшее время во всем изделии получится наиболее лучшее сочетание основных свойств готового изделия.

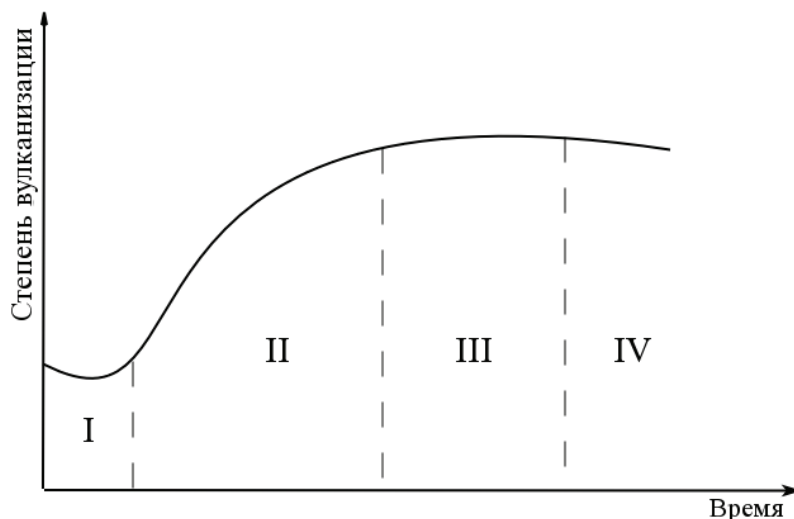


Рисунок 1 – Кинетическая кривая процесса вулканизации

Для построения режимов вулканизации необходимо знать, как изменяется температура в изделии во время процесса вулканизации и последующего охлаждения.

Расчет температурных полей шин при вулканизации в настоящее время основан на разработанных ранее методах приведенной пластины [4] и плоского сечения [5]. Эти методы основаны на эмпирическом выборе самого трудно прогреваемого плоского сечения, которое выбирается в окружном направлении шины. При выборе такого сечения необходимо учитывать рисунок протектора, изменение толщины резины по поперечному сечению шины. Обоснованность такого выбора зависит от опыта и интуиции специалистов. В методе [4] поперечное сечение шины приводят к пластине определенной толщины, температурное поле которой одномерное, и для которой можно получить аналитическое решение [6].

В методе [5] температурное поле является двумерным. Ввиду того, что конфигурация плоского сечения сложная, а конструкция шины состоит из нескольких слоев с различными теплофизическими

характеристиками, то решение выполняется численными методами. Реальные трехмерные тепловые потоки, которые зависят от геометрии рисунка протектора и конфигурации шины, в этих методах не учитываются. Основными причинами, по которым были разработаны описанные методы, является сложность аналитического описания трехмерной геометрии изделия.

По существующей практике на шинных заводах режим, определяемый по одному из описанных выше методов, проверяется экспериментально. Для этого изготовленную шину подвергают исследованиям, при которых измеряются упругие характеристики всех типов резин и по их значениям судят о режиме вулканизации. Для определенного ассортимента шин данный подход оправдан ввиду сравнительно низкой стоимости единицы изделия. Однако для крупногабаритных, сверх крупногабаритных шин или массивных шин, стоимость которых достигает нескольких тысяч долларов, этот метод весьма дорогостоящий.

Вышеописанные методы не дают полной картины распределения температурного поля во всем изделии, кроме отдельно выбранного сечения. Поэтому с целью разработки рациональных режимов вулканизации следует отказаться от методов, построенных на упрощении расчетной модели и использовать максимально приближенные к реальной конструкции трехмерные модели.

В настоящее время созданы предпосылки для реализации данного подхода. На шинных заводах используются САПР шин, в которых создаются твердотельные трехмерные модели [7], которые можно использовать при решении задачи теплопроводности для разработки режимов вулканизации шин.

Математическая модель процесса вулканизации

Для построения режима вулканизации необходимо рассчитать нестационарное температурное поле в шине, на базе которого построить кинетику неизотермической вулканизации во время процесса. Для этого необходимо решить начально-краевую задачу

теплопроводности [8] в области $\Omega = \sum_{i=1}^m \Omega_i + \sum_{i=1}^{m+1} \Gamma_i$:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda_i(T_i)}{c_i(T_i)\rho_i} \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda_i(T_i)}{c_i(T_i)\rho_i} \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda_i(T_i)}{c_i(T_i)\rho_i} \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + q_i(\tau), \quad (1)$$

$$M(x, y, z) \in \Omega_i, \tau > 0, i = 1, 2, \dots, m,$$

В уравнении (1) точка $M(x, y, z)$ принадлежит области Ω_i , m – число слоев (с учетом варочной камеры), с различными теплофизическими характеристиками; T_i – температура в точке M ; λ_i , c_i , ρ_i – соответственно теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность материала i -го слоя; q_i – внутренние источники теплоты.

Теплофизические характеристики рассчитываются исходя из состава резиновой смеси. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности и плотности резиновой смеси незначительна. Коэффициент теплопроводности определяется [9] по формуле:

$$\lambda = \lambda_e + 0,00214C_1 + 0,00163C_2, \quad (2)$$

где C_2 – дозировка саж типа канальной в вес. ч. на 100 вес. ч. каучука;

C_1 – дозировка всех остальных саж.

Объемы ингредиентов резиновых смесей в достаточном приближении аддитивны, т.е. плотность можно вычислить по формуле:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2} + \dots + \frac{\omega_n}{\rho_n}, \quad (3)$$

где ω_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) – весовые доли ингредиентов;

ρ_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) – плотность ингредиентов.

Удельная теплоемкость резиновой смеси может быть найдена аналогично [9]:

$$c = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2 + \dots + \omega_n c_n, \quad (4)$$

где c_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) – удельные теплоемкости ингредиентов.

В соответствии с [10] теплоемкость смеси с повышением температуры увеличивается по линейной зависимости.

Внутренние источники обусловлены тепловыделениями в результате протекания химической реакции вулканизации и значительно влияют на температурное поле массивных изделий [11, 12]. Тепловые эффекты вулканизации пропорциональны массе присоединенного агента вулканизации и индивидуальны для различных слоев шины. Расчет внутренних источников производится по формуле [12]:

$$q(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_0, \tau > \tau_9; \\ q_{\text{сум}} \left[1 - e^{-k(\tau - \tau_0)} \right], & \tau_9 > \tau \geq \tau_0 \end{cases}, \quad (5)$$

где τ_0 – индукционный период вулканизации, с;

τ_9 – эквивалентное время, рассчитываемое по формуле (10), с;

$q_{\text{сум}}$ – суммарный тепловой эффект реакции за время ее протекания $\tau_y - \tau_0$ [13], Вт/м³;

$k = k_0 \exp\left(-\frac{U}{RT}\right)$ – константа скорости реакции вулканизации [1];

U – энергия активации процесса вулканизации, Дж/кмоль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль К).

Начальные условия задают начальную температуру T_0 во всей расчетной модели:

$$T(M, \tau) = T_0, \quad M(x, y, z) \in \Omega, \quad \tau = 0. \quad (6)$$

При расчетах режимов вулканизации резинотехнических изделий принимают [2] температуру поверхности пресс-формы и диафрагмы (варочной камеры), равной температуре теплоносителя. Ввиду этого во время подачи теплоносителя τ_1 по поверхности диафрагмы Γ_1 и поверхности модели, которая находится в контакте с пресс-формой Γ_{m+1} , задаются граничные условия первого рода:

$$\begin{aligned} T(M, \tau) &= \varphi_1(M, \tau), \quad M(x, y, z) \in \Gamma_1, \quad \tau_1 > \tau > 0; \\ T(M, \tau) &= \varphi_2(M, \tau), \quad M(x, y, z) \in \Gamma_{m+1}, \quad \tau_1 > \tau > 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Во время остывания покрышки $\tau_2 - \tau_1$ вне вулканизационного оборудования происходит вулканизация холодных зон изделия, поэтому для построения рационального режима вулканизации шин необходимо рассчитать изменение температурного поля в период их охлаждения. Процесс теплообмена между горячей поверхностью покрышки и окружающей средой задается граничными условиями третьего рода:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial n} \right|_{\Gamma_1} + \alpha T|_{\Gamma_1} &= \gamma_1(\tau), \quad M(x, y, z) \in \Gamma_1, \quad \tau_2 > \tau > \tau_1; \\ \left. \frac{\partial T(M, \tau)}{\partial n} \right|_{\Gamma_{m+1}} + \beta T|_{\Gamma_{m+1}} &= \gamma_2(\tau), \quad M(x, y, z) \in \Gamma_{m+1}, \quad \tau_2 > \tau > \tau_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Температура в точке соприкосновения разнородных слоев, составляющих конструкцию покрышки, а также внутренней полости

и диафрагмы принимается одинаковой, т.е. задаются граничные условия четвертого рода:

$$T|_{\Gamma_i} = T|_{\Gamma_{i+1}}, \quad \lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_i} = \lambda_{i+1}(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{i+1}}, \quad M(x, y, z) \in \Gamma_i, \quad \tau > 0, \quad i = 2, \dots, m. \quad (9)$$

В уравнении (9) Γ_i – поверхность i -го слоя, которая соприкасается с поверхностью Γ_{i+1} слоя $i+1$.

Для решения дифференциального уравнение теплопроводности (1) применяется метод конечных элементов, который представляет собой эффективный численный метод решения физических задач для расчетной области сложной конфигурации [15,16].

Для процесса вулканизации основное значение имеют не сами температуры, а связанные с ними степень вулканизации, по которой судят о степени завершенности процесса. В настоящее время в шинной промышленности степень вулканизации оценивают по эквивалентному времени [1,14]. Эквивалентное время вулканизации $\tau_{\text{э}}$ считается такое время [1], которое при температуре $T_{\text{э}} = \text{const}$ приведет к тем же свойствам резины, что и при переменных температурах. Оно рассчитывается как функция температуры и фактических свойств резин, формируемых в процессе вулканизации:

$$\tau_{\text{э}} = \begin{cases} 0, & \tau < \tau_0; \\ \int_0^{\tau} \exp \left[\frac{U}{RT(\tau)T_{\text{э}}} (T(\tau) - T_{\text{э}}) \right] d\tau, & \tau \geq \tau_0 \end{cases}, \quad (10)$$

где $T_{\text{э}}$ – температура эквивалентного режима вулканизации, К.

Достижение оптимальных свойств находится из отношения $\tau_{\text{э}}/\tau_{\text{э,опт}}$, где $\tau_{\text{э,опт}}$ – эквивалентное оптимальное время вулканизации, определяемое при испытаниях смесей [17].

Пример расчета

По описанной выше методике шины был выполнен расчет шины 27.00–49 (рис. 2), которая имеет наружный диаметр 2,7 м, посадочный диаметр 1,2 м, массу около 2 т. и предназначена для автосамосвала БелАЗ и его зарубежных аналогов грузоподъемностью 75–80 т.



Рисунок 2 – Сверхкрупногабаритная шина 27.00-49

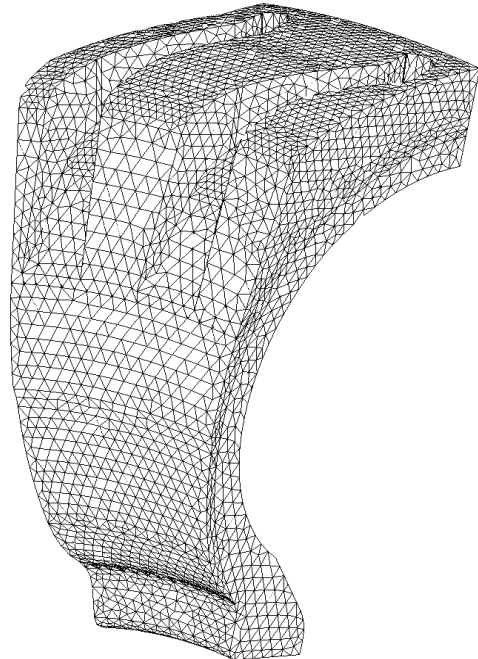


Рисунок 3 – Конечно-элементная трехмерная модель шины 27.00-49

Исходная трехмерная модель покрышки была построена в САПР SolidWorks™. Ввиду повторяемости рисунка протектора, а также с целью сокращения времени счета, для расчета была выбрана половина сектора покрышки. На рис. 3 представлена конечно-элементная трехмерная расчетная модель шины. В качестве конечного элемента используется четырех узловой тетраэдр. Число узлов 9825, элементов 41443.

При заданных начальных и граничных условиях было получено решение в виде изменения температурного поля и степени вулканизации во времени.

Аналогичный расчет был выполнен по методу плоского сечения. Сечение выбрано в плечевой зоне, в соответствии с методом [5]. На рис. 4 представлена конечно-элементная сетка двумерной расчетной модели. Число узлов 2241, треугольных симплекс элементов 4205.

На рис. 5 представлены графики изменения температуры и эквивалентного времени в наиболее холодной точке изделия для двумерной и трехмерной модели. Видно, что холодная точка двумерной модели прогревается на 5 град. меньше, чем холодная точка трехмерной модели. Анализ результатов расчета трехмерной модели показал, что ее холодная точка не находится в том сечении,

которое было выбрано по методу плоского сечения, а смещена в сторону центра протектора.

В связи с тем, что температура холодной точки в плоском сечении ниже, чем в трехмерной модели, то время вулканизации, рассчитанное по методу плоского сечения будет больше на 34 мин., следовательно и затраты теплоносителей будут на 6% выше.

Однако данные количественные результаты не следует распространять на другие типы шин ввиду существенного влияния рисунка протектора и конструкции шины в целом, начальных и граничных условий, состава резин и других факторов.

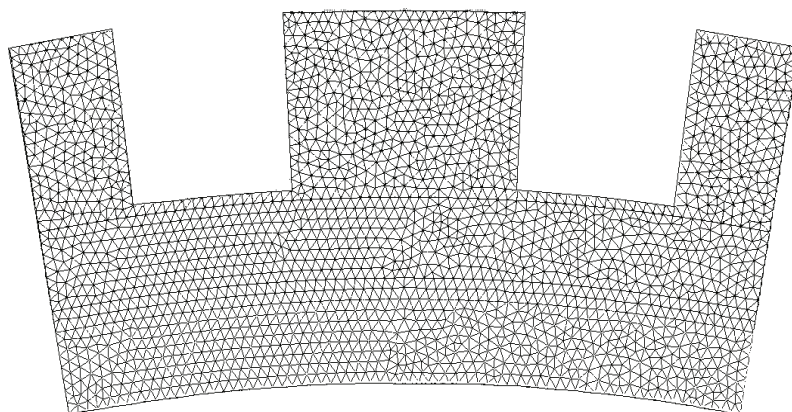


Рисунок 4 – Конечно-элементная двумерная модель

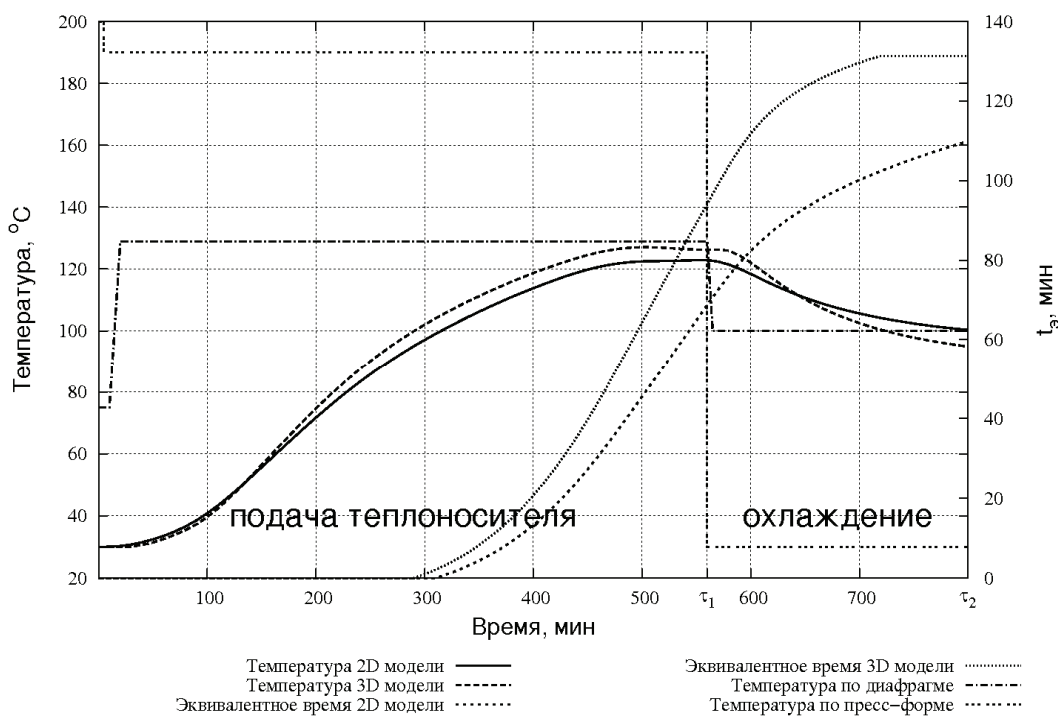


Рисунок 5 – Изменение температуры и эквивалентного времени в «холодной» точке для двумерной и трехмерных моделей

Сравнение расчета с экспериментом

При проведении эксперимента на стадии сборки в покрышку были заложены термопары, показания которых были использованы для оценки точности расчетного метода. Положение некоторых датчиков представлены на рис. 6.

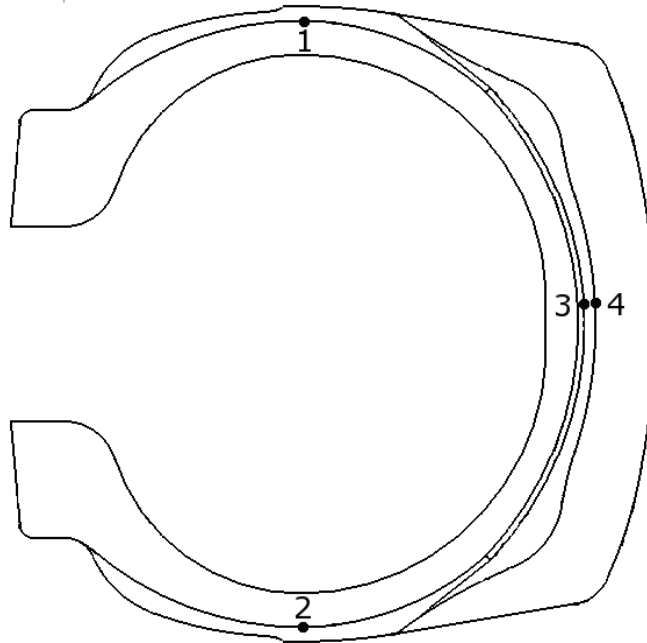


Рисунок 6 – Положения термопар в меридиональном сечении покрышки
1, 2 – каркас-боковина (верх, низ); 3 – брекер-подканавка; 4 – подканавка-беговая

На рис. 7 приведены графики изменения температуры во время вулканизации в точке каркас-боковина, брекер-подканавка, подканавка-беговая полученных при расчете и определенных экспериментально.

Таким образом, расчет по предлагаемой методике дает удовлетворительные результаты по сравнению с экспериментом. Стоит отметить, что при проведении эксперимента во время прессования, горячие спаи термопар смещаются; термоэлектроды могут попадать на неизотермические поверхности, что может приводить к погрешностям измерения температуры.

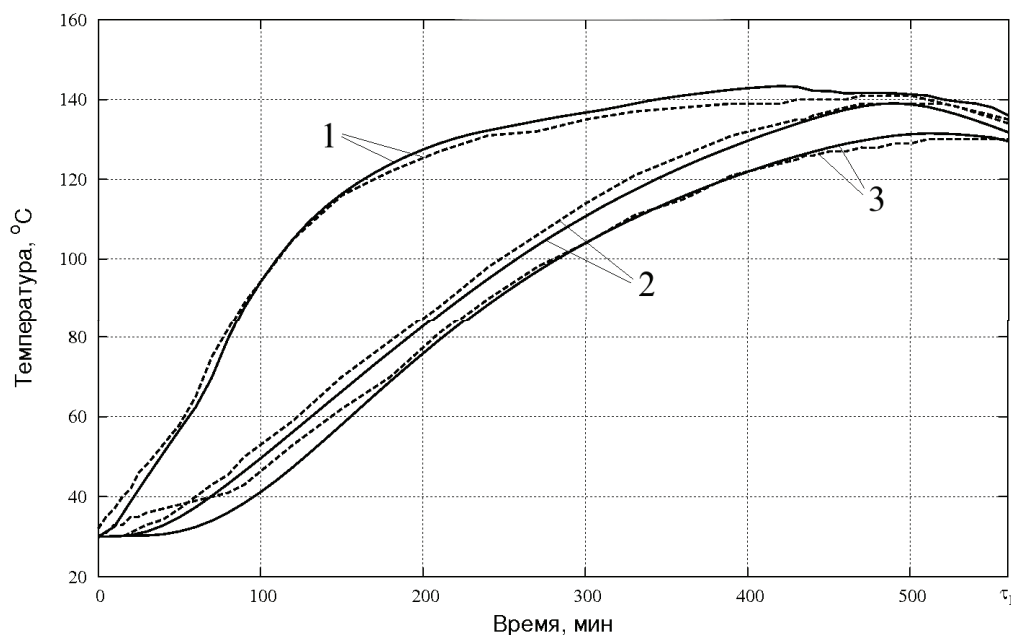


Рисунок 7 – Изменение температуры в точках 1 - каркас-боковина, 2 - бреккер-подканавка, 3 - подканавка-беговая;

— расчет; - - - эксперимент

Выводы

- предложена методика расчета температурных полей, с учетом трехмерности, предназначенная для разработки режимов вулканизации пневматических шин и др. РТИ сложной конфигурации;
- расчеты, по предложенной методике, удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными;
- применение предложенной методики, позволит разрабатывать новые или уточнить существующие режимы вулканизации РТИ, что позволит сократить расход дорогостоящих энергоносителей без значительных материальных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукомская А.И. и др. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий / А.И. Лукомская, П.Ф. Баденков, Л.М. Кеperша. - М.:Химия, 1972. - 358 с.
2. Температурные режимы шин в процессе их производства и эксплуатации / под общ. ред. Лукомской А. И // Материалы к научно-техническому семинару. - Красноярск, 1970. - 371 с.
3. Лукомская А. И., Пороцкий В. Г. Автоматическое управление технологическими процессами в резиновой промышленности. - М.:Химия, 1984. - 160 с.
4. Расчет продолжительности вулканизации покрышек сельскохозяйственных и крупногабаритных автомобильных шин

- методом приведенной пластины / Аранович Ф. Д., Ищенко В.А., Никитина Л.Б., Свердел М.И. // Каучук и резина. – 1976 - № 6. – С. 28-32.
5. Программно-методическое обеспечение проектирования режимов вулканизации покрышек пневматических шин / Свердел М. И., Зимин А. В., Дзюра Е. А. // Каучук и резина. – 2003. -№ 5. – С. 17-22.
 6. В.О. Фогель Аналитические методы расчета температур в вулканизуемых резиновых изделиях // Труды МИТХТ –1955. Выпуск 5. – С. 66-83.
 7. Методология построения трехмерных моделей пресс-форм для шин и анализ их работоспособности в системе SolidWorks / Керножицкий Е. В., Пономарев В. В. и Наратовский А. Н. // Тезисы докладов 5-й международной научно-технической конференции “Эластомеры: материалы, технология, оборудование, изделия”. - Днепропетровск, 2004. - С. 96.
 8. Лыков А. В. Теория теплопроводности. - М.:Высшая школа, 1967. - 600с.
 9. Влияние состава резин на их тепловые свойства / Беляева В. А. // Автореф. дисс. канд. техн. наук. - М.: НИИШП, 1977.
 10. Теплофизические основы и тепловые режимы процесса вулканизации резин / Фогель В. О. // Автореф. дисс. канд. док. наук. - М. МИТХТ:, 1963, 31 с.
 11. О влиянии тепловых эффектов вулканизации на температурное поле в вулканизуемых покрышках / Лукомская А. И., Евстратов В. Ф., Борисевич Г. М., Новоселова Н. А. // Каучук и резина. - 1967. – С.29-31.
 12. Расчеты и прогнозирование режимов вулканизации резиновых изделий / Лукомская А. И., Баденков П. Ф., Кеперша Л. М. - М.:Химия, 1987.-280 с.
 13. Моделирование теплопроводности резинометаллокордных систем и тепловых эффектов при расчетной разработке эффектов при расчетной разработке режимов вулканизации шин / Точилова Т. Г. // Дисс. канд. техн. наук. - М.:НИИШП, 1987.
 14. Примеры и задачи по технологии переработки эластомеров / Красовский В. Н., Воскресенский А. М., Харчевников В. М.. - Л.: Химия, 1984. -240 с.
 15. Конечные элементы и аппроксимация / Зенкевич О. и Морган К.. - М. : Мир, 1986. - 318 с.
 16. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. - М.:Мир, 1979. - 393 с.
 17. ГОСТ 12535-84 «Смеси резиновые. Метод определения вулканизационных характеристик на вулканометре»

Получено 10.01.2008 г.