

## Программный комплекс для решения задач математического моделирования процесса изотермической вулканизации

Сергей Г. Тихомиров, <sup>1</sup>	tikhomirov_57@mail.ru
Ольга В. Карманова, <sup>2</sup>	karolga@mail.ru
Юрий В. Пятаков, <sup>1</sup>	pyatakovjv@mail.ru
Александр А. Маслов <sup>1</sup>	imasslove@mail.ru

<sup>1</sup> кафедра информационных и управляющих систем, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup> кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Ленинский, 14, г. Воронеж, Россия

**Реферат.** На основе общих закономерности серной вулканизации диеновых каучуков рассмотрены принципы эффективного проведения процесса с использованием многокомпонентных структурирующих систем. Отмечается, что описание механизма действия комплексных сшивающих систем осложняется многообразием взаимодействий компонентов и влиянием каждого из них на кинетику вулканизации, что приводит к различным рецептурно-технологическим усложнениям реальной технологии и сказывается на качестве и технико-экономических показателях производства резинотехнических изделий. Системный анализ процесса изотермической вулканизации выполнен на основе известных теоретических подходов и включал интегрирование различных методов и приемов исследования в единую взаимосвязанную совокупность методов. В ходе анализа кинетики вулканизации установлено, что параметры образования пространственной сетки вулканизатов зависят от множества факторов, для оценки которых требуется специальное математическое и алгоритмическое обеспечение. В результате проведенной стратификации изучаемого объекта выделены основные подсистемы. Разработан программный комплекс для решения прямой и обратной кинетических задач процесса изотермической вулканизации. Информационное обеспечение «Изотермическая вулканизация» разработано в виде прикладных программ математического моделирования процесса изотермической вулканизации и направлено на решение прямой и обратной кинетических задач. При решении задачи уточнения общей схемы химических превращений использовался универсальный механизм, включающий побочные химические реакции. Программный продукт включает в себя численные алгоритмы решения системы дифференциальных уравнений. Для решения обратной кинетической задачи используются алгоритмы минимизации функционала, при наличии ограничений на искомые параметры. Для описания работы с данным продуктом приведена логическая блок-схема программы. Приведен пример решения обратной кинетической задачи с помощью программы. Разработанное информационное обеспечение, реализовано на языке программирования C++. Для определения начальной концентрации действительного агента вулканизации использована универсальная зависимость, позволяющая использовать модель с различными свойствами многокомпонентных структурирующих систем.

**Ключевые слова:** изотермическая вулканизация, математическое моделирование, схема кинетики вулканизации, информационное обеспечение

## The software package for solving problems of mathematical modeling of isothermal curing process

Sergei G. Tikhomirov, <sup>1</sup>	tikhomirov_57@mail.ru
Ol'ga V. Karmanova, <sup>2</sup>	karolga@mail.ru
Yurii V. Pyatakov, <sup>1</sup>	pyatakovjv@mail.ru
Aleksandr A. Maslov <sup>1</sup>	imasslove@mail.ru

<sup>1</sup> information and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, Russia

<sup>2</sup> chemistry and chemical technology of organic compounds and polymers processing department, Voronezh state university of engineering technologies, Leninsky Av., 14 Voronezh, Russia

**Summary.** On the basis of the general laws of sulfur vulcanization diene rubbers the principles of the effective cross-linking using a multi-component agents was discussed. It is noted that the description of the mechanism of action of the complex cross-linking systems are complicated by the diversity of interactions of components and the influence of each of them on the curing kinetics, leading to a variety technological complications of real technology and affects on the quality and technical and economic indicators of the production of rubber goods. Based on the known theoretical approaches the system analysis of isothermal curing process was performed. It included the integration of different techniques and methods into a single set of. During the analysis of the kinetics of vulcanization it was found that the formation of the spatial grid parameters vulcanizates depend on many factors, to assess which requires special mathematical and algorithmic support. As a result of the stratification of the object were identified the following major subsystems. A software package for solving direct and inverse kinetic problems isothermal curing process was developed. Information support "Isothermal vulcanization" is a set of applications of mathematical modeling of isothermal curing. It is intended for direct and inverse kinetic problems. When solving the problem of clarifying the general scheme of chemical transformations used universal mechanism including secondary chemical reactions. Functional minimization algorithm with constraints on the unknown parameters was used for solving the inverse kinetic problem. Shows a flowchart of the program. An example of solving the inverse kinetic problem with the program was introduced. Dataware was implemented in the programming language C++. Universal dependence to determine the initial concentration of the curing agent was applied. It allowing the use of a model with different properties of multicomponent curing systems. informed decisions.

**Keywords:** isothermal curing, mathematical modeling, the scheme of the curing kinetics, informational software

Для цитирования

Тихомиров С.Г., Карманова О.В., Пятаков Ю.В., Маслов А.А. Программный комплекс для решения задач математического моделирования процесса изотермической вулканизации // Вестник ВГУИТ. 2016. № 3. С 93–99. doi:10.20914/2310-1202-2016-3-93-99

For citation

Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Pyatakov Yu.V., Maslov A.A. The software package for solving problems of mathematical modeling of isothermal curing process. *Vestnik VSUET* [Proceedings of VSUET]. 2016. no 3 pp. 93–99 (in Russ.). doi:10.20914/2310-1202-2016-3-93-99

## Введение

К настоящему времени установлены общие закономерности серной вулканизации диеновых каучуков, основанные на существовании в композициях действительных агентов вулканизации эластомеров (ДАВ). Однако принципы эффективного проведения процесса с использованием многокомпонентных структурирующих систем изучены недостаточно. Описание механизма их действия осложняется многообразием взаимодействий компонентов и влиянием каждого из них на кинетику вулканизации. Это приводит к различным рецептурно-технологическим усложнениям реальной технологии и сказывается на качестве и технико-экономических показателях производства резинотехнических изделий. Анализ кинетики вулканизации показал, что существующие подходы к ее описанию основываются на химических реакциях макромолекул с вулканизирующими агентами, а параметры образования пространственной сетки вулканизаторов зависят от множества факторов, влияние которых можно оценить только с помощью специального математического и алгоритмического обеспечения [1]. Для повышения эффективности исследования, выявления причин, приводящих к получению продукции, не отвечающей нормативным требованиям, прогноза протекания процесса необходимо создание специального программного обеспечения (ПО).

Целью настоящей работы является разработка программного комплекса для решения прямой и обратной кинетических задач процесса изотермической вулканизации.

### Системный анализ процесса вулканизации

Анализ известных теоретических подходов к описанию вулканизации, а также других процессов в химической промышленности [2–4] и аспектов их практической реализации с учетом особенностей отдельных стадий позволил выявить общие системные свойства и основные закономерности процессов и определить направление исследований для получения новой информации по оптимизации режимов вулканизации и свойств готовых изделий [5].

Системный анализ включает интегрирование различных методов и приемов исследования (математических, эвристических), разработанных в рамках различных научных направлений в единую взаимосвязанную совокупность методов.

Многофакторный анализ процесса позволил разработать общую структуру исследования (рисунок 1). Объект исследования является слабоструктурированным, поскольку содержит как качественные элементы (эластомеры, наполнители, условия проведения процесса) так и малоизученные (многокомпонентные структурирующие системы, неконтролируемые возмущения), которые имеют тенденцию доминировать. В состав общей структуры входят элементы, которые необходимо теоретически обосновать (кинетическая модель, процессы тепломассопереноса, оптимизация режимов, процессы переработки). Таким образом, для оценки способов решения необходимо определить все существующие взаимосвязи и установить их влияние с учетом взаимодействий на поведение всей системы в целом.

Анализ общей структуры показал, что механические свойства вулканизатов определяются химическими реакциями макромолекул с вулканизирующими агентами, а для оценки параметров пространственной сетки вулканизатов необходимо разработать специальное математическое и алгоритмическое обеспечение.

В результате проведенной стратификации изучаемого объекта выделены следующие основные подсистемы:

- 1) анализ и учет термофлуктуационных явлений, обеспечивающих ускорение протекания химических реакций;
- 2) кинетическая модель вулканизации;
- 3) оптимизация режимов вулканизации, обеспечивающая получение требуемых механических свойств.

### Математическое моделирование процесса изотермической вулканизации

Получение достоверной информации о протекании процессов сшивания эластомеров комплексными структурирующими системами, тесно связано с проблемами проектирования, оптимизации и управления режимами вулканизации в промышленности. Известно, что одним из традиционных способов описания формальной кинетики вулканизации является использование кусочно-определенных функций для отдельных стадий процесса: индукционного периода, структурирования и реверсии. Описание процесса в целом и расчет кинетических констант в настоящее время выполнен только для отдельных типов каучуков и вулканизирующих систем [6]. Основные заключения о кинетике процесса основываются на модельных системах с низкомолекулярными аналогами эластомеров. В то же время полученные количественные данные не всегда возможно распространять на производственные процессы.

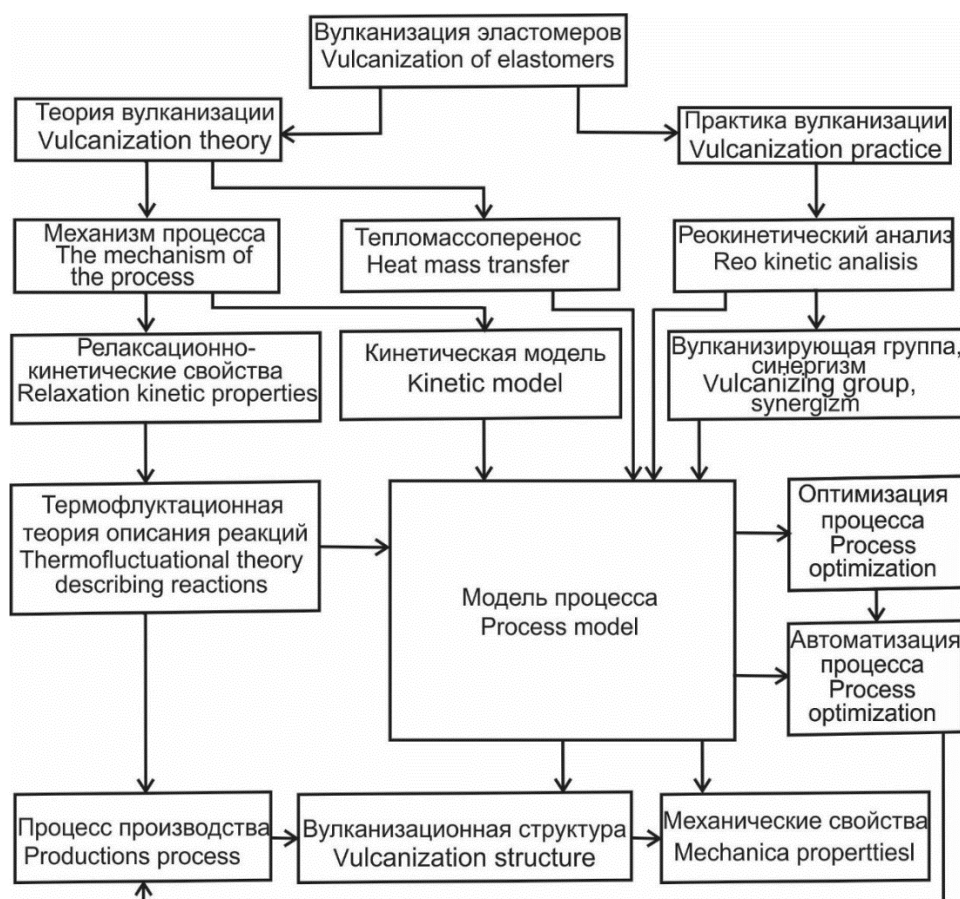


Рисунок 1. Схема исследования процесса вулканизации эластомеров

Figure 1. Scheme of study process of vulcanization of elastomers

Оценка физико-механических свойств производственных резин, по данным, полученным на предприятии, является, безусловно, прогрессивным методом в решении задачи моделирования процесса вулканизации, но требует строгого внутреннего единства физико-химического подхода на каждом этапе исследования и разработки вычислительных алгоритмов и программ.

Ответить на этот вопрос можно, только тщательно выполнив эксперименты [7, 8] по плану, соответствующему предполагаемой кинетической модели и рассчитав несколько альтернативных вариантов модели. Для этого требуется независимым методом установить число формальных механизмов реакций, ответственных за структурирование эластомерной композиции.

Традиционные методики анализа процессов во временной области не дают возможности четко разделять процессы с синергическим взаимодействием, что, в свою очередь, не позволяет использовать их для анализа производственных резин.

При решении задачи уточнения общей схемы химических превращений целесообразно исходить из максимального в некотором смысле

механизма. Поэтому в кинетическую схему включены дополнительные реакции, описывающие образование и деструкцию лабильных полисульфидных связей ( $Vu_{lab}$ ), внутримолекулярную циклизацию и другие реакции, приводящие к модификации макромолекул, образование макрорадикала и его реакцию с подвесками ДАВ.

Система дифференциальных уравнений (ДУ) по стадиям процесса будет иметь следующий вид [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} dC_A / dt = -k_1 \cdot C_A - k_4 \cdot C_A \cdot C_{B^*}, \\ dC_B / dt = k_1 \cdot C_A - k_2 \cdot C_B + \\ + \beta \cdot k_4 \cdot C_A \cdot C_{B^*} + k'_8 \cdot C_{R^*}, \\ dC_{B^*} / dt = k_2 \cdot C_B - (k_3 + k_5 + k_7) \cdot C_{B^*} + \\ + k_6 \cdot C_{VuLab} - k_4 \cdot C_A \cdot C_{B^*}, \\ dC_{VuSt} / dt = \alpha \cdot k_3 \cdot C_{B^*}, \\ dC_{VuLab} / dt = \gamma \cdot k_5 \cdot C_B - k_6 \cdot C_{VuLab}, \\ dC_C / dt = \delta \cdot k_7 \cdot C_{B^*}, \\ dC_{R^*} / dt = k_8 \cdot C_R - k'_8 \cdot C_{R^*}, \\ dC_R / dt = -k_8 \cdot C_R. \end{array} \right. \quad (1)$$

Начальные условия:

$$C_A(0) = \varsigma \cdot [S_8] \cdot [A_C] \cdot [Akt]^\theta \cdot [C_R(0)]^\eta;$$

$$C_B(0) = 0; \quad C_{B^*}(0) = 0; \quad C_{VuSt}(0) = 0;$$

$$C_{VuLab}(0) = 0; \quad C_C(0) = 0; \quad C_R(0) = 4,95;$$

$$C_{R^*}(0) = C_R(0)^\eta,$$

где  $\varsigma$ ,  $\theta$ ,  $\eta$ , – коэффициенты,  $[S_8]$  – начальная концентрация серы,  $[A_C]$  – начальная концентрация ускорителя,  $[Akt]^\theta$  – начальная концентрация активатора (оксида цинка),  $[C_R(0)]^\eta$  – начальная концентрация макрорадикалов. Здесь А – действительный агент вулканизации; В – предшественник сшивания; В\* – его активная форма; С – внутримолекулярная связанная сера; VuSt, VuLab – стабильные и лабильные узлы вулканизационной сетки; R – каучук; R\* – макрорадикал каучука в результате термофлуктуационного распада;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  – стехиометрические коэффициенты,  $k_1$ ,  $k_2$ , ...,  $k_8$ ,  $k_9$  ( $k_8'$ ) – константы скорости реакции, относящиеся к соответствующим стадиям процесса.

Прямая задача кинетики (ПЗК) – задача нахождения концентрации вулканизационных узлов как функции времени. Решение ПЗК сводится к решению системы ДУ (1) при заданных начальных условиях. Кинетическая кривая процесса вулканизации определяется по величине крутящего момента  $M(t)$ . Обратная задача кинетики (ОЗК) – задача идентификации констант скорости реакций, стехиометрических коэффициентов и переменных в системе (1). Решение ОЗК осуществляется путем минимизации функционала:

$$\Phi(k_1, k_2, \dots, k_8, k_8', \alpha, \beta, \varsigma, \theta, \eta) =$$

$$= \int_0^{t_k} q^2(k_1, k_2, \dots, k_8, k_8', \alpha, \beta, \varsigma, \theta, \eta, t) dt \quad (2)$$

$$q(k_1, k_2, \dots, k_8, k_8', \alpha, \beta, \varsigma, \theta, \eta, t) =$$

$$= R \cdot [M(t) - M_{\min}] / (M_{\max} - M_{\min}) - C_{Vu}, \quad (3)$$

$M_{\max}$ ,  $M_{\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения  $M(t)$ ,  $R$  – масштабный коэффициент.

### Описание программного обеспечения

Программное обеспечение «Изотермическая вулканизация» разработано в качестве комплекса прикладных программ (КПП) для решения задач, связанных с математическим моделированием процесса изотермической вулканизации.

Для решения системы ДУ в пакете предусмотрены численные методы, включающие в себя:

- метод Рунге-Кутты четвертого порядка;
- метод Адамса.

Решение обратной кинетической задачи сводится к оценке констант скоростей реакций, стехиометрических коэффициентов и переменных в системе ДУ (1).

Для минимизации функционала (2) в пакете программ на усмотрения пользователя могут использоваться следующие методы: покоординатного спуска, Хука-Дживса, Розенброка, Пауэлла, Нелдера-Мида, усреднения координат (с использованием элементов случайного поиска). Градиентные методы (первого порядка): наискорейшего спуска, сопряженных направлений (Флетчера-Ривса), переменной метрики (Давидона-Флетчера-Пауэлла), параллельных градиентов (Зангвилла).

На рисунке 2 изображена структурная схема, разработанного программного обеспечения.

Процесс идентификации констант скорости реакций, коэффициентов уравнений и стехиометрических коэффициентов осуществляется в несколько этапов:

- оцифровка реограмм;
- перевод крутящих моментов в концентрации;
- определение начальных концентраций;
- определение значений искомых параметров констант обеспечивающих минимум функционала (2).

Оцифровка реограмм может происходить вручную или же в автоматическом режиме с помощью, интегрированной в пакет, программы Gr2Digit.

Обработка экспериментальных данных может осуществляться как для одного измерения, так и набора (до 6 реограмм).

Перевод крутящих моментов в концентрации узлов вулканизационной сетки осуществляется следующим образом:

- значения крутящих моментов переводятся в условные единицы:

$$M_{\text{усл}} = (M_{\text{тек}} - M_{\min}) / (M_{\max} - M_{\min}) \quad (4)$$

– затем условные единицы переводят в (моль/кг), путем умножения  $M_{\text{усл}}$  на масштабный коэффициент  $R$ .

Определение начальной концентраций  $C_A(0)$  ДАВ осуществляется по формуле:

$$C_A(0) = \varsigma \cdot [S_8] \cdot [A_C] \cdot [Akt]^\theta \cdot [C_R(0)]^\eta \quad (5)$$

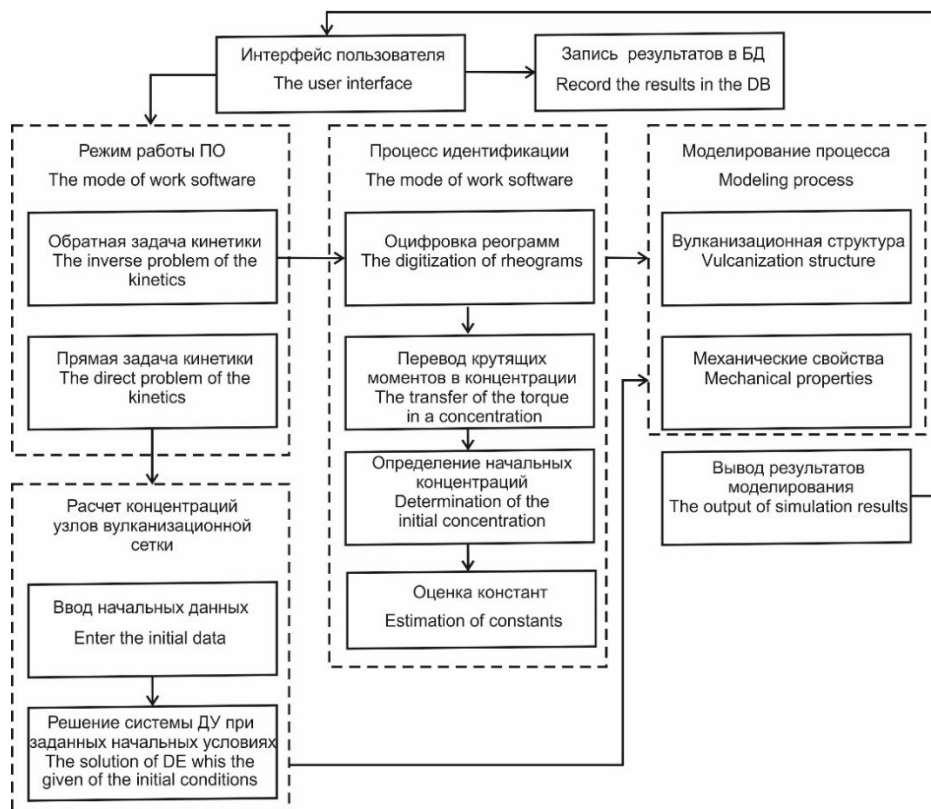


Рисунок 2. Структурная схема программного обеспечения

Figure 2. Structural software scheme

### Апробация разработанного программного обеспечения

В качестве исходных данных использованы реометрические кривые, полученные при следующих начальных условиях:

1. Значение концентрации серы в смеси:  $[S_8] = 0,0078$  моль/кг.
2. Концентрация ускорителя:  $[A_c] = 0,0019$  моль/кг.
3. Концентрация активатора:  $[Akt]^0 = 0,0012$  моль/кг.

На рисунке 3 приведены экспериментальные и расчетные значения концентрации вулканизационных узлов, полученные в результате решения ОКЗ. В таблице 1 приведены рассчитанные значения констант скоростей реакций, в таблице 2 – оцененные значения стехиометрических коэффициентов и параметров модели.

Таблица 1  
Значение констант скоростей реакций

Table 1 The value of the reaction rate constants			
Константа Constant	Значения Values	Константа Constant	Значения Values
k1	0,12	k6	0,553
k2	0,1	k7	0,96
k3	$4,8 \times 10^{-20}$	k8	1,213
k4	1,213	k8'	0,21
k5	$1,89 \times 10^{-20}$	—	—

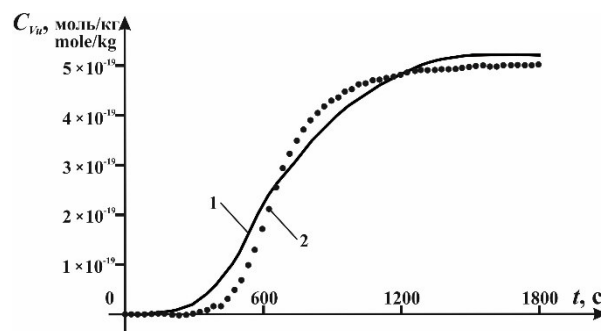


Рисунок 3. Изменения концентраций узлов вулканизационной сетки во времени.

Figure 3. Changes in the concentrations of the vulcanization grid points in time. 1 – the calculated values; 2 – experimental values.

Оцифрованные и обработанные экспериментальные данные заносятся в программу, определяются начальные приближения и диапазон поиска констант, после чего выбирается метод оптимизации.

Таблица 2  
Значения стехиометрических коэффициентов и параметров модели

Table 2 The values of stoichiometric coefficients and parameters of the model pas						
$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\xi$	$\theta$	$\eta$
1,21	1,4	1,02	1,9	$1,65 \times 10^8$	0,97	-4,11

### Заключение

На основе системного анализа теоретических подходов к описанию вулканизации усовершенствована общая структурная схема исследования данного процесса. Математическая модель процесса вулканизации дополнена начальными условиями, которые определены как функции исходных концентраций компонентов вулканизирующей группы. Для решения обратной кинетической задачи предложены дополнительные критерии качества модели. Разработан программный продукт, предназначенный для проведения научно-исследовательских работ при изучении процессов вулканизации резиновых смесей

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Тихомиров С.Г., Битюков В.К., Подкопаева С.В., Хромых Е.А. и др. Математическое моделирование объектов управления в химической промышленности. Воронеж: ВГУИТ, 2011. 196 с.
- 2 Хаустов И.А. Управление синтезом полимеров периодическим способом на основе дробной подачи компонентов реакции // Вестник ТГТУ. 2014. № 4 (20) С. 787–792.
- 3 Хаустов И.А. Управление процессом деструкции полимеров в растворе на основе дробной загрузки инициатора // Вестник ВГУИТ. 2014. № 4. С. 86–91.
- 4 Битюков В.К., Хаустов И.А., Хвостов А.А. и др. Системный анализ процесса термоокислительной деструкции полимеров в растворе как объекта управления // Вестник ВГУИТ. 2014. № 3 (61). С. 61–66.
- 5 Карманова О.В. Физико-химические основы и активирующие компоненты вулканизации полидиенов: дисс. д-ра техн. наук. Воронеж, 2012.
- 6 Молчанов В.И., Карманова О.В., Тихомиров С.Г. Моделирование кинетики вулканизации полидиенов // Вестник ВГУИТ. 2013. № 1. С. 142–145.
- 7 Hardis R., Jessop J.L.P., Peters F.E., Kessler M.R. Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA // Composite. 2013. Part A. V. 49. P. 100–108.
- 8 Javadi M., Moghiman M., Reza Erfanian M., Hosseini N. Numerical Investigation of Curing Process in Reaction Injection Molding of Rubber for Quality Improvements // Key Engineering Materials. 2011. V. 462–463. P. 1206–1211.

с использованием многокомпонентных структурирующих систем. КПП имеет блочно-модульную структуру, что позволяет осуществлять его расширение без потери функциональности. Направлениями его модернизации является включение в состав математического описания неізотермического режима вулканизации с дальнейшей интеграцией в контур АСУТП в качестве экспертной информационно-управляющей системы для выдачи рекомендаций по управлению процессом вулканизации и принятия решений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № 2014/22 (номер НИР 3041) по теме «Синтез многофункциональных систем контроля качества для пищевой и химической промышленности»*

### REFERENCES

- 1 Tikhomirov S.G., Bityukov V.K. Podkopaeva S.V., Khromykh E.A. et al. Matematicheskoe modelirovanie ob'ektov upravleniya v khimicheskoi promyshlennosti [Mathematical modeling of facilities management in the chemical industry] Voronezh, VSUET, 2011. 196 p. (in Russian).
- 2 Khaustov I.A. Management polymer synthesis batch process based on the fractional flow of the reaction components. *Vestnik TGTU* [Bulletin TSTU] 2014, no. 4 (20), pp. 787–792. (in Russian).
- 3 Khaustov I.A. Process control degradation of polymers in the solution based on the fractional loading of the initiator. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET] 2014, no. 4, pp. 86–91 (in Russian).
- 4 Bityukov V.K., Khaustov I.A., Khvostov A.A. System analysis of the thermo – oxidative degradation of polymers in solution as a control object. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET] 2014, no. 3 (61), pp. 61–66. (in Russian).
- 5 Karmanova O.V. Fiziko-khimicheskie osnovy i aktiviruyushchie komponenty vulknizatsii polidienov [Physical – chemical bases and activating components polydienes. Dis. dr. tech. sciences] Voronezh, 2012. (in Russian).
- 6 Molchanov V.I., Karmanova O.V., Tikhomirov S.G. Modeling the kinetics of vulcanization polydienes. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET] 2013, no. 1, pp. 142–145. (in Russian).
- 7 Hardis R., Jessop J.L.P., Peters F.E., Kessler M.R. Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA. Composite, 2013, part A, vol. 49, pp. 100–108.
- 8 Javadi M., Moghiman M., Reza Erfanian M., Hosseini N. Numerical Investigation of Curing Process in Reaction Injection Molding of Rubber for Quality Improvements. Key Engineering Materials. 2011, vol. 462–463, pp. 1206–1211.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сергей Т. Тихомиров** профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, Tikhomirov\_57@mail.ru

**Ольга В. Карманова** зав. кафедрой, профессор, кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Ленинский пр-т, 14, г. Воронеж, 394000, Россия, karolga@mail.ru

**Юрий В. Пятаков** доцент, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, pyatakovjv@mail.ru

**Александр А. Маслов** аспирант, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, imasslove@mail.ru

#### КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

**Сергей Т. Тихомиров** предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания  
**Александр А. Маслов** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчеты

**Ольга В. Карманова** консультация в ходе исследования

**Юрий В. Пятаков** написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 17.07.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 22.08.2016

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Sergei G. Tikhomirov** professor, department of information and control systems, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, Russia, Tikhomirov\_57@mail.ru

**Olga V. Karmanova** professor, head of department, department of chemistry and chemical technology of organic compounds and polymers processing, Voronezh state university of engineering technologies, Leninsky Av., 14 Voronezh, Russia, karolgs@mail.ru

**Yurii V. Pyatakov** associate professor, department of information and control systems, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, Russia, pyatakovjv@mail.ru

**Aleksandr A. Maslov** graduate student, department of information and control systems, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, Russia, imasslove@mail.ru

#### CONTRIBUTION

**Sergei G. Tikhomirov** proposed a scheme of the experiment and organized production trials

**Aleksandr A. Maslov** review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

**Olga V. Karmanova** consultation during the study

**Yurii V. Pyatakov** wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 7.17.2016

ACCEPTED 8.22.2016