УДК 004.9

DOI: 10.15827/0236-235X.123.514-520

Дата подачи статьи: 26.04.18

2018. Т. 31. № 3. С. 514–520

Алгоритмическое обеспечение обработки данных процесса структурирования эластомерного композита с целью решения задачи управления

А.С. Кузнецов¹, к.т.н., старший преподаватель, askuznetsov@mitht.ru

В.Ф. Корнюшко¹, д.т.н., профессор, vfk256@mail.ru

¹ Московский технологический университет (МИРЭА), г. Москва, 119454, Россия

Структурирование является важнейшим этапом переработки многокомпонентного эластомерного материала в готовый продукт – изделие с заданным на этапе рецептуростроения комплексом эксплуатационных свойств. Оно представляет собой сочетание двух процессов – химического взаимодействия различных компонентов, входящих в его состав, а также технологического процесса закрепления требуемых свойств и функций будущего изделия. Для успешного протекания данной финальной технологической процедуры необходим строгий контроль за соблюдением заданной последовательности всех технологических стадий и подготовительных операций, в процессе которых получается полуфабрикат – промежуточный продукт. Повышению качества готового продукта в значительной степени способствует применение методов экспресс-контроля на основе виброреометрии для оценки характеристик исходного сырья, а также параметров полуфабриката и готовой продукции.

В работе рассматриваются химико-технологические процессы смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов как составляющие химико-технологической системы. Предложено алгоритмическое обеспечение обработки данных виброреометрии с целью повышения эффективности управления сложными химико-технологическими процессами смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

Построена процессная модель управления структурированием эластомерных композиционных систем. Выделены четыре группы процессов, отвечающих за показатели качества структурирования. Построены блок-схемы алгоритмов управления сложными химико-технологическими процессами смешения и структурирования эластомерных систем. Приведены приемы обработки основной реометрической информации с использованием современных программных продуктов. Показаны приемы визуализации реометрических данных в программах Table curve 2d и Table curve 3d.

Построены пространственные изображения в виде поверхностей отклика для основных рецептурно-технологических факторов и показателей качества процесса, приведен алгоритм расчета коэффициентов математических моделей. Построен набор диаграмм состав–свойство, наглядно характеризующих влияние изменения уровней рецептурно-технологических факторов на кинетику процесса структурирования.

Показано, что визуализация реометрических данных с применением современных программных продуктов предоставляет возможности для более гибкого и адаптивного управления процессом структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

Ключевые слова: алгоритмическое обеспечение, процесс структурирования, управление процессом структурирования, эластомерный композит, визуализация реометрических данных.

Получению готового продукта – изделия из многокомпонентного эластомерного композита с комплексом заданных свойств – предшествует большое количество подготовительных операций и технологических стадий, наиболее сложными из которых с точки зрения организации управления являются смешение и структурирование эластомерных систем [1].

Известно, что возмущения, приводящие к отклонению параметров качества, являются рецептурно-технологическим фактором [2, 3].

Цель данной работы – разработка алгоритмов обработки данных виброреометрии для построения математических моделей и визуализации результатов, что позволяет повысить эффективность и качество управления сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

Для описания основных процессов производства продукции из эластомерных композитов была построена процессная модель управления структурированием эластомерных систем (рис. 1).

Для операций смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов предложены алгоритмы управления, которые в виде блок-схем представлены на рисунках 2 и 3.

На стадии смешения контролируются следующие параметры: пластичность каучука и смеси, температура смеси, время смешения, порядок введения ингредиентов. Данные параметры установлены в паспортах смеси и каучука. Для накопления статистической информации по работе со смесью предусмотрено занесение всех параметров и характеристик в информационную БД. При несовпадении показателей полуфабриката с заданными осуществляется доработка смеси до заданных величин или снижение ее класса вплоть до забраковки [4].

На стадию структурирования попадает только полуфабрикат, отвечающий всем показателям качества. Параметрами переработки смеси в изделие являются температура процесса структурирования, время обработки и давление среды.

После получения готового изделия осуществляются испытания на уровень оценки физико-меха-

нических эластических свойств, а также таких эксплуатационных свойств, как твердость и истираемость.

В результате выполнения алгоритма текущие показатели процесса сравниваются со стандартными, в случае отклонения происходит их корректировка путем доработки смеси или рецептуры.

Путем контроля и управления качеством проведения промежуточных стадий и стадий получения готовой продукции можно добиться более строгого соответствия показателей полуфабриката и готового продукта нормам, установленным в паспорте изделия и карте смеси.

В ходе процессов смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов, кроме контроля основных параметров управления процессом, целесообразно анализировать графические зависимости, отражающие основные характеристики процесса [2, 5]. Использование приемов визуализации основных данных процесса структурирования позволяет более наглядно рассмотреть зависимости между данными величинами и организовать оперативное управление процессом. Для визуализации данных реометрии предложено использовать современные программные продукты – комплексы программ Table curve 2d и 3d, а также Matlab 2010.

Программа Table curve 2d предназначена для построения двумерных графиков. Ввод данных осуществляется в двух режимах: импорт из файла с

использованием стандартной кодировки ASCII и ручной ввод в режиме Editor (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-3/2018-3-dop/22.jpg>).

Программа позволяет подобрать уравнение, наилучшим образом описывающее данную зависимость с расчетом основных критериев качества, проводить структурную и параметрическую идентификацию, а также ранжировать различные математические модели по разным критериям качества (рис. 4) [2]. Такими критериями могут выступать

величины стандартной ошибки, критерия Фишера, коэффициента детерминации.

Модель 8092 по каталогу программы Table curve 2d имеет следующий вид:

$$M = a + b \cdot \left(1 - \left(1 + \exp \left(\frac{t + d \cdot \ln(2^{1/e} - 1) - c}{d} \right) \right)^{-e} \right).$$

Эта модель представляет собой аналитическое выражение функции распределения случайных величин. Параметр a с учетом воспроизводимости реограмм можно рассматривать как минимальный крутящий момент $M_{\min}$. Параметр b соответствует приращению крутящего момента $\Delta M = M_{\max} - M_{\min}$. Параметр c равен вулканизационной характеристике $t_{C(50)}$. Параметры d и e характеризуют форму реометрической кривой.

Критерии качества и параметры модели 8092: коэффициент детерминации – 0.9987404917, скорректированный коэффициент детерминации – 0.9974809834, стандартная ошибка – 0.1370291176, критерий Фишера – 1189.4409199.

Программный продукт Table curve 2d позволяет сразу изобразить на графике производную от исходной зависимости и совместить это в одном окне. В данном случае (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2018-3/2018-3-dop/23.jpg>) была получена графическая характеристика скорости процесса структурирования, имеющая важное значение при анализе и контроле процесса, так как зачастую оказывается более чувствительной к изменению уровней рецептурно-технологических факторов [5].

Программа Table curve 3d была использована для построения трехмерных пространственных изображений, описывающих зависимости функции-отклика от двух факторов (рис. 5, 6). Данный программный продукт позволяет аппроксимировать поверхность отклика произвольной физической природы различными математическими моделями, в том числе включающими в себя эффекты взаимодействия. Данный подход позволяет количественно охарактеризовать совместное влияние двух и более факторов на отклик материала, а также учитывает вклад каждого из факторов в формирование функции-отклика.

Критерии качества и параметры модели 514 вида $z = a + bx + cy + dy^2$: коэффициент детерминации – 0.9800641228, скорректированный коэффициент детерминации – 0.9667735379, стандартная ошибка – 0.5047270969, критерий Фишера – 114.70858582.

Для принятий решений по контролю и управлению процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов зачастую необходимо принимать во внимание влияние нескольких факторов разного характера. Для визуализации зависимости отклика от трех факторов применяются диаграммы состав-свойство. Блок визуализации

Рис. 6. Обработка реометрических данных в системе Table curve 3d

Fig. 6. Processing of rheometric data in Table curve 3d

ции реометрических данных является неотъемлемой частью интеллектуальной информационной системы управления сложными химико-технологическими процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов [6, 7].

Частным случаем решения задачи описания почти стационарной области является построение регрессионных моделей для систем, представляющих собой смеси трех компонентов. Переменные x_i в такой системе являются пропорциями (относительным содержанием) трех компонентов и удовлетворяют условию нормировки: $\sum x_i = x_1 + x_2 + x_3 = 1$.

Геометрическое место сумм переменных представляет собой двумерный симплекс (треугольник). Любой комбинации в содержании компонентов соответствует определенная точка симплекса.

В рассматриваемой ситуации вершины симплекса соответствуют 100 %-му содержанию каждого компонента, лежащие напротив этих вершин стороны треугольника соответствуют нулевому содержанию данного компонента, а относительное

содержание каждого компонента откладывается вдоль соответствующей стороны треугольника состава [8–10].

Для построения диаграммы состав–свойство на симплексе была использована модель $y = y(x_1, x_2, x_3)$ (y – отклик) в форме приведенного полинома. Полином для неполной кубической модели, описывающей почти стационарную область по 7 значениям отклика (рис. 7), будет следующим: $y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3$.

Рис. 7. Графическая интерпретация расположения точек в факторном пространстве: а) – плоское изображение, б) – пространственное изображение

Fig. 7. Graphical interpretation of trend in points in a factor space: a) is a flat image, б) is a spatial image

План для неполной кубической модели запишем следующим образом:

От-клик	Координаты точек			От-клик	Координаты точек		
	x_1	x_2	x_3		x_1	x_2	x_3
y_1	1	0	0	y_{12}	1/2	1/2	0
y_2	0	1	0	y_{13}	1/2	0	1/2
y_3	0	0	1	y_{23}	0	1/2	1/2
				y_{123}	1/3	1/3	1/3

Параметры неполной кубической модели вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= y_1; \beta_2 = y_2; \beta_3 = y_3; \beta_{12} = 4y_{12} - 2y_1 - 2y_2; \\ \beta_{13} &= 4y_{13} - 2y_1 - 2y_3; \beta_{23} = 4y_{23} - 2y_2 - 2y_3; \\ \beta_{123} &= 27y_{123} - 12(y_{12} + y_{13} + y_{23}) + 3(y_1 + y_2 + y_3).\end{aligned}$$

На рисунке 8 представлена блок-схема алгоритма расчета параметров математической модели и координат точек, необходимых для построения диаграммы состав–свойство.

На основе разработанной модели были построены симплексные диаграммы состав–свойство, позволяющие оценить формирование прочности эластомерного композита.

Полученные в ходе выполнения действий данного алгоритма диаграммы состав–свойство представлены на рисунке 9. Данные графические зави-

симости наглядно отображают влияние комбинации рецептурных и технологических факторов на формирование прочности соединения резины, определяемой степенью структурирования клеевого шва, учитывая формирование прочности во времени (через 24, 48 и 76 часов после получения соединения).

Рис. 9. Диаграмма состав–свойство для формирования прочности связи эластомерного композита: а) $\tau = 24$ часа, б) $\tau = 48$ часов, в) $\tau = 72$ часа

Fig. 9. A composition-property diagram to form elastomeric composite bond strength: а) $\tau = 24$ hours, б) $\tau = 48$ hours, в) $\tau = 72$ hours

Выводы

Разработанная процессная модель позволяет структурировать алгоритмы контроля и управления химико-технологическими процессами смешения и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

Авторы разработали блок-схемы алгоритмов управления процессами смешения и структурирования эластомерных композитов. Для визуализации разработанных моделей управления использованы программные продукты Table curve 2d/3d (Systat Software). С их помощью на одном графике совмещены кривые степени структурирования, дифференциальные кривые скорости процесса, а также построены поверхности отклика, отражающие динамику изменения характеристик процесса структурирования при варьировании уровней факторов, имеющих рецептурно-технологический характер.

Построенные симплекс-модели для переменных оценивают влияние рецептурно-технологических факторов. Диаграммы состав–свойство построены на основе программного продукта Matlab 2010. Они позволяют найти параметры управления на основе анализа взаимного влияния уровней рецептурно-технологических факторов. Это дает возможность оператору процесса выбрать наиболее эффективный режим управления за счет комплексного анализа показателей качества процесса структурирования многокомпонентных эластомерных композитов.

Литература

1. Уральский М.Л., Горелик Р.А., Буканов А.М. Контроль и регулирование технологических свойств резиновых смесей. М.: Химия, 1983. 128 с.
2. Сочнев А.Н. Автоматизированная система управления вулканизационными характеристиками резиновой смеси в производстве резинотехнических изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2008. 20 с.
3. Новаков И.А., Новопольцева О.М., Кракшин М.А. Ме-

тоды оценки и регулирования пластоэластических и вулканизационных свойств эластомеров и композиций на их основе. М.: Химия, 2000. 240 с.

4. Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф., Гончаров И.А., Агаянц И.М. Информационная поддержка системы управления технологическим процессом структурирования эластомерных систем с применением реометрических кривых // Прикладная информатика. 2016. № 2. С. 5–12.

5. Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф. Математические модели реограмм состояния в программах Tablecurve 2d/3d как основа интеллектуальной системы управления процессами структурирования многокомпонентных эластомерных композитов // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 4. С. 5–14.

6. Кузнецов А.С., Корнюшко В.Ф. Интеллектуальная система управления химико-технологическими процессами и структурирования многокомпонентных эластомерных композитов на основе производственной модели // Тонкие химические технологии. 2017. № 5. С. 101–109.

7. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М.: Высш. шк., 1978. 319 с.

8. Рузинов Л.П. Статистические методы оптимизации химических процессов. М.: Химия, 1972. 200 с.

9. Рузинов Л.П., Слободникова Р.И. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. М.: Химия, 1980. 280 с.

10. Корнюшко В.Ф., Костров А.В., Породникова П.А. Подход к развитию системы управления тестированием программных средств // Программные продукты и системы. 2015. № 4. С. 126–132.

11. Агаянц И.М. Азы статистики в мире химии: обработка экспериментальных данных. СПб: Изд-во НОТ, 2015. 614 с.

12. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов. М.: Академкнига, 2006. 416 с.

13. Анфилов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.

14. Дворецкий Д.С., Пешкова Е.В. Математическое моделирование и оптимизация процессов тонкого органического синтеза в условиях неопределенности // Вестн. ТГТУ. 2007. № 1. С. 119–129.

15. Тихомиров С.Г., Карманова О.В., Пятаков Ю.В., Маслов А.А. Программный комплекс для решения задач математического моделирования процесса изотермической вулканизации // Вестн. ВГУИТ. 2016. № 3. С. 93–99.

16. Осипов С.Ю., Осипов Ю.Р., Богданов Д.А., Ершов Е.В. Математическое моделирование и разработка системы автоматической корректировки режимов вулканизации эластомерных покрытий валов металлургических производств // Вестн. Череповец. гос. ун-та. 2017. № 3. С. 46–54.

Algorithmic ware of data processing for elastomer composite structuring to solve a control problem

A.S. Kuznechov¹, Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer, askuznetsov@mitht.ru

V.F. Korniyushko¹, Dr.Sc. (Engineering), Professor, vfk256@mail.ru

¹ Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation

Abstract. Structuring is the most important stage of processing multicomponent elastomeric material into a finished product that is a product with a set of operational properties specified at the stage of recipe building. It is a combination of two

processes: chemical interaction of various components in its composition, and the technological process of fixing the required properties and functions of the future product. Successful implementation of this final technological procedure requires strict control over compliance with a given sequence of all technological stages and preparatory operations that leads to production a semi-finished intermediate product. Improving the quality of the finished product is greatly facilitated by applying express-control methods based on vibroreometry to assess the characteristics of raw materials, as well as the parameters of the semi-finished and finished products.

The paper considers chemical-technological processes of mixing and structuring multicomponent elastomeric composites as components of a chemical-technological system. The authors propose algorithmic support of vibroreometry data processing to improve management efficiency of complex chemical-technological processes of mixing and structuring multicomponent elastomeric composites.

The paper describes the constructed process model for controlling the structuring of elastomeric composite systems. There are 4 groups of processes responsible for quality indicators of structuring. There are also block diagrams of control algorithms for complex chemical-technological processes of mixing and structuring of elastomeric systems. The authors show the methods of processing the main rheometric information using modern software products, as well as the techniques for visualizing rheometric data in Table curve 2d and Table curve 3d.

Spatial images are constructed in the form of response surfaces for main recipe-technological factors and process quality indicators. There is also an algorithm for calculating coefficients of mathematical models. A set of composition-property diagrams visually characterizes the effect of changing levels of prescription and technological factors on the kinetics of the structuring process. It is shown that visualization of rheometric data using modern software products provides opportunities for more flexible and adaptive control of the process of structuring multicomponent elastomeric composites.

Keywords: algorithmic support, structuring process, structuring process control, elastomeric composite, rheometric data visualization.

References

1. Uralsky M.L., Gorelik R.A., Bukanov A.M. *Control and Regulation of Technological Properties of Rubber Blends*. Moscow, Khimiya Publ., 1983, 128 p.
2. Sochnev A.N. *An Automatized Control System of Rubber Cure Characteristics in Rubber-Technical Products Production*. PhD Thesis. Saratov, 2008, 20 p.
3. Novakov I.A., Volfson S.I., Novopoltseva O.M., Krakshin M.A. *Rheological and Vulcanization Properties of Elastomeric Compositions*. Moscow, Khimiya Publ., 2000, 240 p.
4. Kuznetsov A.S., Korniyushko V.F., Goncharov I.A., Agayants I.M. Information support of process structuring elastomeric systems control system using rheometer curves. *J. of Applied Informatics*. 2016, no. 2, pp. 5–12 (in Russ.).
5. Kuznetsov A.S., Korniyushko V.F. Mathematical models of rheograms of states in Table Curve 2d/3d programs as a basis of the intelligent system for managing structuring processes of multicomponent elastomer composites. *Software & Systems*. 2017, vol. 30, no. 4, pp. 770–777 (in Russ.).
6. Kuznetsov A.S., Korniyushko V.F. Intelligent system for control of chemical-technological processes of structuring of multicomponent elastomer composites based on the production model. *Fine Chemical Technologies*. 2017, no. 5, pp. 88–96.
7. Akhnazarova C.L., Kafarov V.V. *The Experiment Optimization in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1978, 319 p.
8. Ruzinov L.P. *Statistical Methods of Chemical Process Optimization*. Moscow, Khimiya Publ., 1972, 200 p.
9. Ruzinov L.P., Slobodchikova R.I. *The Experiment Planning in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Khimiya Publ., 1980, 280 p.
10. Korniyushko V.F., Kostrov A.V., Porodnikova P.A. An approach to software testing management system development. *Software & Systems*. 2015, no. 4, pp. 126–132 (in Russ.).
11. Agayants I.M. *The Basics of Statistics in the World of Chemistry: Processing Experimental Data*. St. Petersburg, NOT Publ., 2015, 614 p.
12. Gartman T.N., Klushin D.V. *Basics of Computer Modeling of Chemical and Technological Processes*. Moscow, Akademkniga Publ., 2006, 416 p.
13. Anfilatov V.S., Emelyanov A.A., Kukushkin A.A. *System Analysis in Management*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002, 368 p.
14. Dvoretzky D.S., Peshkova E.V. Mathematic Modeling and optimization of the processes of fine organic synthesis in terms of uncertainty. *Trans. of TSTU*. 2007, no. 1, pp. 119–129 (in Russ.).
15. 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. *Proc. of the Voronezh State Univ. of Engineering Technologies*. 2016, no. 3, pp. 93–99 (in Russ.).
16. Osipov S.Yu., Osipov Yu.R., Bogdanov D.A., Ershov E.V. Mathematical modeling and development of automatic correction system for vulcanization regimes of elastomeric coatings for shafts of metallurgical industries. *Cherepovets State Univ. Bulletin*. 2017, no. 3, pp. 46–54 (in Russ.).