

Синтез структуры и параметрическая идентификация математической модели процесса сшивки активных сополимеров при получении древоподобного термоэластопласта

Сергей Г. Тихомиров¹ malish.1365@yandex.ru
Игорь А. Хаустов¹
Сергей С. Рылев¹
Елена С. Дурова¹

¹ кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. Термоэластопласты представляют собой перспективный класс полимерных материалов, свойства которых близки к свойствам обычных резин, но в отличие от них перерабатываются высокопроизводительными методами, применяемыми при переработке пластмасс, исключают стадию вулканизации из технологической схемы и способны к многократной переработке. Поставлена и решена задача моделирования кинетики процесса сшивки при получении термоэластопласта с древоподобной молекулярной структурой. При сшивке двухблочника для получения термоэластопласта с древоподобной молекулярной структурой в качестве сшивающего агента применяется полифункциональный сочетающий агент. На основании имеющихся экспериментальных данных о молекулярно-массовом распределении термоэластопластов и анализе различных комбинаций молекул полимера предложена кинетическая схема процесса сочетания. Схема учитывает возможность присоединения активного двухблочника к каждой функциональной группе молекулы сочетающего агента различной структуры. Математическая модель процесса, протекающего в реакторе идеального смешения периодического действия, представлена в виде системы дифференциальных уравнений при моделировании процесса принято допущение, что скорость реакции сочетания зависит от подвижности молекул, вступающих в реакцию. При решении задачи параметрической идентификации в качестве критерия оптимальности принята сумма квадратов невязки экспериментально определенных и теоретически предсказанных концентраций молекул термоэластопластов каждой структуры. Вычислительный эксперимент показал, что сочетающий агент реагирует с активным двухблочником в основном по двум и трем функциональным группам. Синтезированная модель позволяет осуществлять оценку концентрации сочетающего агента, полистирол-полибутадиенлития и термоэластопласта с различной молекулярной массой в непрерывной временной области. Относительная погрешность полученных результатов составляет 9,3%. Анализ полученных в ходе моделирования результатов исследования позволяет сделать вывод о том, что предложенная модель качественно верно описывает процесс сочетания.

Ключевые слова: термоэластопласты, полимер древоподобной структуры, сочетающий агент, материальный баланс реактора смешения периодического действия, математическое моделирование, идентификация, прогноз.

The synthesis of structure and parametrical identification of mathematical model of process of a stitching of active copolymers when receiving a treelike thermoelastolayers

Sergei G. Tikhomirov¹ malish.1365@yandex.ru
Igor' A. Khaustov¹
Sergei S. Rylev¹
Elena S. Durova¹

¹ informational and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Summary. Thermoplastic elastomers are a promising class of polymeric materials whose properties are close to those of conventional rubbers. Thermoplastic elastomers are recycled by high-performance methods used to process plastics in contrast to ordinary rubbers. Also thermoplastic elastomers exclude the stage of vulcanization from the technological scheme and they are capable of multiple processing. The problem of modeling of the kinetics of the crosslinking process in the preparation of a thermal elastoplast with a treelike structures was formulated and solved. The polyfunctional coupling agent used as crosslinking agent for crosslinking of diblock to produce thermoplastic elastomers with a treelike structures. A kinetic scheme of the coupling process is proposed. It based on the available experimental data on the molecular weight distribution of thermoplastic elastomers and the analysis of various combinations of polymer molecules. The scheme takes into account the possibility of attaching the active diblock to each functional group of the combining agent molecule of different structures. The mathematical model of the process taking place in the reactor of an ideal mixing of a periodic action is represented of the system in the form of differential equations. Modeling the process, it is assumed that the rate of the coupling reaction depends on the mobility of the molecules which enter into the reaction. The sum of the squares of the discrepancy of experimentally determined and theoretically predicted concentrations of thermoplastic elastomers of each structure is adopted as an optimality criterion for solving the problem of parametric identification. The computational experiment showed that the combining agent reacts with the active diblock mainly in two and three functional groups. The synthesized model allows to evaluate the concentration of the coupling agent, polystyrene-polybutadiene-lithium and thermoplastic elastomer with different molecular weight in a continuous time domain. The relative error in the results is 9.3%. The analysis results obtained allows us to conclude that the proposed model qualitatively correctly describes the coupling process.

Keywords: thermoplastic elastomers, polymer tree-like structure, coupling agent, of the reactor material balance mixing batch

Для цитирования

Тихомиров С.Г., Хаустов И.А., Рылев С.С., Дурова Е.С. Синтез структуры и параметрическая идентификация математической модели процесса сшивки активных сополимеров при получении древоподобного термоэластопласта // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1. С. 90–94. doi:10.20914/2310-1202-2017-1-90-94

For citation

Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Rylev S.S., Durova E. S. The synthesis of structure and parametrical identification of mathematical model of process of a stitching of active copolymers when receiving a treelike thermoelastolayers. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. Vol. 79. no. 1. pp. 90–94. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-1-90-94

Введение

Термоэластопласты (ТЭП) представляют собой перспективный класс полимерных материалов, свойства которых близки к свойствам обычных резин, но в отличие от них перерабатываются высокопроизводительными методами, применяемыми при переработке пластмасс, исключают стадию вулканизации из технологической схемы, и способны к многократной переработке [1, 2]. Благодаря этому ТЭП находят все большее применение в самых различных отраслях промышленности.

Одной из последних разработок в области термоэластопластов является дивинил-стирольный полимер с древоподобной структурой ДСТ 30 ДР [3]. Данная марка термоэластопласта отличается улучшенными прочностными и технологическими (литьевыми) свойствами.

На сегодняшний день изучение процессов синтеза термоэластопластов на основе математического моделирования достаточно широко освещено в ряде работ [4–7]. В [8–10] предложены и обоснованы способы и алгоритмы управления рассматриваемыми процессами на основе математических моделей. Однако, точный количественный и качественный расчет, а также прогнозирование параметров качества при получении полимеров древоподобной структуры затруднено в связи с отличиями в процессе их производства, связанного с применением полифункциональных сочетающих агентов на этапе сшивки двухблочных сополимеров. Поскольку процессы синтеза двухблочных сополимеров достаточно хорошо изучены, научный и практический интерес представляет изучение кинетики процесса сшивки с использованием полифункционального сшивающего агента, в том числе на основе математического описания кинетики этого процесса.

Постановка задачи и вывод основных уравнений

Получение термоэластопластов методом сшивки активных двухблочных сополимеров состоит из трех основных стадий:

1. На первом этапе проводят иницирование, т. е. формирование активных центров полимерных молекул путем присоединения к молекуле стирола молекулы литийорганического соединения (бутиллития) и полимеризацию стирола до образования активного полистирольного блока.

2. На втором этапе проводят полимеризацию бутадиена с полистирольным блоком – происходит образование активного двухблочника – полистиролполибутадиенлития.

3. На третьем этапе происходит сшивка полученных молекул полистирол-полибутадиенлития полифункциональным сочетающим агентом: $h(R-Li) + (B-Cl)_h \rightarrow (B-R_h) + hLiCl$, где $(R-Li)$ – макромолекула полистиролполибутадиенлития, $(B-Cl)_h$ – молекула полифункционального сочетающего агента, $(B-R_h)$ – макромолекула сшитого термоэластопласта, h – максимально возможное число функциональных групп сочетающего агента.

Эксперименты проводились на опытном заводе Воронежского филиала НИИСК. В качестве сшивающего агента использовался хлорциклопропановый полибутадиен, число функциональных групп которого достигает 40. Это дает возможность получать блоксополимеры разветвленного строения. Опытным путем установлено, что доля молекул ТЭП содержащих более 12-и присоединенных двухблочников, составляет менее 1% от общей массы. В этой связи для получения структуры математического описания процесса сшивки максимальное количество функциональных групп ограничено до $h = 12$.

Одной из важнейших характеристик термоэластопластов, во многом определяющих их физико-химические свойства, является молекулярно-массовое распределение (ММР). Достижение необходимой прочности и эластичности требует получение термоэластопластов с определенной в стандартном диапазоне средней молекулярной массой и узким ММР [1].

Сложность достижения этих требований состоит в том, что молекулярные массы получаемых макромолекул термоэластопласта различны, поскольку полистиролполибутадиеновый двухблочник имеет некоторое ММР, а молекулы сочетающего агента отличаются количеством активных функциональных групп, позволяющих присоединять к себе различное число активных макромолекул двухблочника.

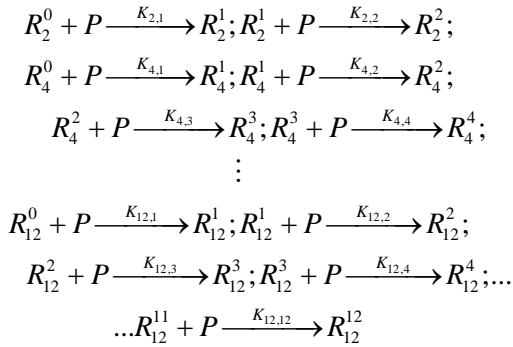
Для описания кинетики процесса сшивки с использованием полифункционального сшивающего агента на основании имеющихся экспериментальных данных о ММР термоэластопластов, необходимо решить следующие задачи:

- разработать и обосновать кинетическую схему реакций сшивки активных двухблочников полистиролполибутадиенлития;
- провести структурную и параметрическую идентификацию математической модели процесса сшивки;
- оценить погрешность полученного математического описания.

1.1 Кинетическая схема и моделирование процесса сочетания

В результате анализа различных вариантов сшивки макромолекул полимера предложена кинетическая схема процесса.

Схема учитывает возможность присоединения молекул активного двухблочника к каждой функциональной группе сшивающего агента различной структуры:



где R_{ij} – молекула сочетающего агента, содержащая j функциональных групп, i из них прореагировавших; P – молекула полистирол-полибутадиенлития; $K_{j,i}$ – константа скорости химической реакции.

С учетом предложенной кинетической схемы составлены уравнения материального баланса реактора идеального смешения периодического действия:

$$\begin{aligned}
 \frac{dR_{2,0}}{dt} &= -K_{2,1}R_{2,0}P; \\
 \frac{dR_{2,1}}{dt} &= K_{2,1}R_{2,0}P - K_{2,2}R_{2,1}P; \\
 \frac{dR_{2,2}}{dt} &= K_{2,2}R_{2,1}P; \\
 \frac{dR_{4,0}}{dt} &= -K_{4,1}R_{4,0}P; \\
 \frac{dR_{4,1}}{dt} &= K_{4,1}R_{4,0}P - K_{4,2}R_{4,1}P; \\
 \frac{dR_{4,2}}{dt} &= K_{4,2}R_{4,1}P - K_{4,3}R_{4,2}P; \\
 \frac{dR_{4,3}}{dt} &= K_{4,3}R_{4,2}P - K_{4,4}R_{4,3}P; \\
 \frac{dR_{4,4}}{dt} &= K_{4,4}R_{4,3}P; \dots \\
 \frac{dR_{12,0}}{dt} &= -K_{12,1}R_{12,0}P;
 \end{aligned}$$

$$\frac{dR_{12,1}}{dt} = K_{12,1}R_{12,0}P - K_{12,2}R_{12,1}P; \dots$$

$$\frac{dR_{12,11}}{dt} = K_{12,11}R_{12,10}P - K_{12,12}R_{12,11}P;$$

$$\frac{dR_{12,12}}{dt} = K_{12,12}R_{12,11}P;$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dP}{dt} &= -K_{2,1}R_{2,0}P - K_{2,2}R_{2,1}P - \\
 &- K_{4,1}R_{4,0}P - K_{4,2}R_{4,1}P - K_{4,3}R_{4,2}P - K_{4,4}R_{4,3}P - \\
 &- K_{i,1}R_{i,0}P - K_{i,2}R_{i,1}P - \dots - K_{i,j}R_{i,j-1}P - \dots \\
 &- K_{i,i}R_{i,i-1}P - K_{12,1}R_{12,0}P - K_{12,2}R_{12,1}P - \dots \\
 &- K_{12,j}R_{12,j-1}P - \dots - K_{12,12}R_{12,11}P,
 \end{aligned}$$

где $R_{j,i}$ – концентрация молекул сочетающего агента, содержащих i функциональных групп, в их составе и j прореагировавших с полистирол-полибутадиенлитием, л/моль; P – концентрация молекул полистирол-полибутадиенлития, л/моль; $K_{i,j}$ – константа скорости химической реакции, моль/(л·мин).

Неизвестные константы скоростей химических реакций образуют матрицу содержащую 42 константы.

Известно, что скорость реакции сочетания зависит от подвижности молекул, вступающих в реакцию [11]. В этой связи введем допущение, что скорость присоединения полистиролполибутадиенлития к сочетающему агенту зависит от массы молекулы ТЭП, т. е. от количества сшитых (присоединенных к сшивающему агенту) двухблочников. Температура в ходе эксперимента не менялась, поэтому влияние ее на скорость реакции не учитывается.

Если оперировать средней массой полистиролполибутадиенлития $M_{ср}$ (т. е. считать, что все молекулы линейного активного полимера имеют фиксированную массу $M_{ср}$, учитывая, что его ММР узкое, а коэффициент полидисперсности близок к 1), можно предположить, что реакция присоединения молекул двухблочника к функциональной группе сшивающего агента любой структуры, имеющего одинаковое число уже прореагировавших групп, происходит с одинаковой скоростью. Это предположение позволяет сократить количество неизвестных констант с 42 до 12.

Для оценки значений констант химических реакций в качестве критерия использовано условие достижения минимума суммы квадратов невязки экспериментально определенных и теоретически предсказанных концентраций молекул ТЭП каждой структуры:

$$\begin{aligned}
 I = & \sum_{i=1}^{12} (R_{2,1_i} + R_{4,1_i} + \dots + R_{j,1_i} + \dots + R_{12,1_i} + P_i - R_i^*)^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^{12} (R_{2,2_i} + R_{4,2_i} + \dots + R_{j,2_i} + \dots + R_{12,2_i} - R_{2_i}^*)^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^{12} (R_{4,3_i} + R_{6,3_i} + \dots + R_{j,3_i} + \dots + R_{12,3_i} - R_{3_i}^*)^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^{12} (R_{4,4_i} + R_{6,4_i} + \dots + R_{j,4_i} + \dots + R_{12,4_i} - R_{4_i}^*)^2 + \\
 & \vdots \\
 & + \sum_{i=1}^{12} (R_{12,11_i} - R_{11_i}^*)^2 + \\
 & + \sum_{i=1}^{12} (R_{12,12_i} - R_{12_i}^*)^2 \xrightarrow{K} \min
 \end{aligned}$$

где R_{jk}^* – экспериментальное значение концентрации молекул ТЭП с j -ми функциональными группами, в их составе k прореагировавших.

Используя полученные оценки констант скоростей реакций в рассматриваемой модели, рассчитаны концентрации сочетающего агента, полистиролполибутадиенлития и молекул термоэластопласта с различной молекулярной массой в разные моменты времени. На основании полученных значений концентраций макромолекул с различной молекулярной массой произведена оценка ММР термоэластопласта с древоподобной молекулярной структурой в динамике. Графики рассчитанных концентраций (рисунок 1) представляют собой кривые в плоскостях сечения графика ММР по соответствующим молекулярным массам. Относительная погрешность полученных результатов составляет 9,3%.

Выводы

Анализ полученных в ходе моделирования результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Концентрация полистиролполибутадиенлития убывает до 5% практически за 30–40 мин. Далее процесс сочетания замедляется и через 40 мин. практически прекращается, что позволяет судить о времени процесса сочетания, определенного в диапазоне (30–40) мин.

2. Концентрация молекул сочетающего агента убывает за 8 минут. Дальнейший процесс сочетания идет за счет уже образовавшихся молекул полимера путем реакций по не прореагировавшим функциональным группам.

3. На графиках изменения концентраций ТЭП со среднечисленной молекулярной массой

$M_n = 27560$ д., наблюдается экстремум – максимальное значение в первые 2 минуты реакции сочетания. Скачок концентрации обусловлен высокой скоростью химической реакции присоединения первой молекулы полистиролполибутадиенлития к молекуле сочетающего агента. Плавный спад концентрации говорит об образовании на основе синтезированных молекул ТЭП с $M_n = 27560$ д. молекул ТЭП с более высокими молекулярными массами, причем этот процесс протекает с меньшей скоростью.

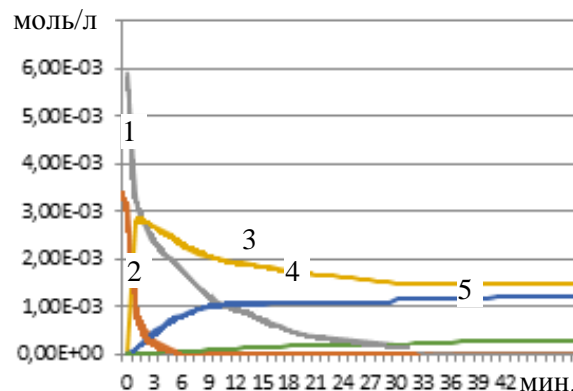


Рисунок 1. Изменение концентрации молекул сочетающего агента, полистирол-полибутадиенлития и ТЭП с разной молекулярной массой

Figure 1. Changing the concentration of molecules of a coupling agent, and polystyrene-polybutadien-lithium thermoelastolayers with a different molecular weight

4. Анализ результатов показал, что основную долю молекул готового полимера составляют ТЭП с молекулярной массой от 57120 д. до 84680 д. Это говорит о том, что сочетающий агент реагирует с активным двухблочником в основном по двум и трем функциональным группам.

На рисунке 1 кривые обозначены: 1 – концентрации сшивающего агента; 2 – макромолекул двухблочника с молекулярной массой 27560 д; 3 – макромолекул термоэластопласта с $M_n = 27560$ д; 4 – макромолекул термоэластопласта с $M_n = 57120$ д; 5 – макромолекул термоэластопласта с $M_n = 84680$ д.

Результаты исследований показывают, что предложенная модель качественно верно описывает процесс сшивки при получении ТЭП с древоподобной молекулярной структурой. Дальнейшим этапом работы является уточнение математической модели с учетом ММР двухблочного сополимера и случайного характера химических реакций процесса сшивки макромолекул различной молекулярной массы.

ЛИТЕРАТУРА

1 Моисеев В.В. Термоэластопласты. М.: Химия, 1985. 184 с.

2 Юдин В.П., Шаталов В.П., Нестерова С.И. и др. Синтез, свойства и применение изопрен-стирольных и бутадиен-стирольных термоэластопластов. М.: ЦНИИТ Энефтехим, 1975. 61 с.

3 Юдин В.П., Хаустов И.А., Рыжкин А.В. О путях моделирования реакций синтеза эластомеров с разветвленной структурой // Материалы XL отчетной научной конференции за 2001 год ВГТА. Воронеж: ВГТА, 2002. С. 83–86.

4 Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Лебедев В.Ф., Хаустов И.А. и др. Моделирование и контроль параметров качества в процессах растворной полимеризации. Воронеж: ВГУИТ, 2011. 172 с.

5 Тихомиров С.Г., Хаустов И.А., Моторин М.Л. Использование математической модели для оценки концентрации активных центров полимеризации в начале процесса синтеза термоэластопластов // Вестник ВГТА. 2011. № 6(48). С. 38–41.

6 Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хаустов И.А., Моторин М.Л. Математическое моделирование синтеза термоэластопластов с учетом реакции инициирования и влияния вязкости среды на порядок реакции // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 3.2 (45). С. 216–220.

7 Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хаустов И.А., Моторин М.Л. Оптимизация процесса синтеза термоэластопластов с использованием методик определения начальной температуры полимеризации // Вестник ВГУИТ. 2010. № 2(44). С. 64–68.

8 Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Лебедев В.Ф., Хвостов А.А. и др. Управление качеством в процессах растворной полимеризации. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2008. 156 с.

9 Хаустов И.А. Управление синтезом полимеров периодическим способом на основе дробной подачи компонентов реакции // Вестник ТГТУ. 2014. № 4 (20). С. 787–792.

10 Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хаустов И.А., Моторин М.Л. Система управления анионной полимеризацией с контролем качества по MMP // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 4(46). С. 73–78.

11 Kayode Coker A. Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design, 2001. 1096 p.

REFERENCES

1. Moiseev V.V. Thermoelastoplasty [Elastomers] Moscow, Khimiya, 1985. 184 p. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Г. Тихомиров д.т.н., профессор, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, malish.1365@yandex.ru

Игорь А. Хаустов к.т.н., доцент, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия,

Сергей С. Рылев к.т.н., старший преподаватель, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия,

Елена С. Дурова магистрант, кафедра информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия,

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Сергей Г. Тихомиров консультация в ходе исследования
Игорь А. Хаустов предложил методику проведения эксперимента
Сергей С. Рылев написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию
Елена С. Дурова несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 10.02.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 20.02.2017

2 Yudin V.P., Shatalov V.P., Nesterova S.I. et al. Sintez, svoistvai primenenie izoprenstirolnykh termoelastoplastov [Synthesis, Properties and Applications isoprene-styrene and styrene-butadiene thermoelastoplasters] Moscow, TsNIITeneftchim, 1975. 61 p. (in Russian).

3 Yudin V.P., Khaustov I.A., Ryzhkin A.V. On the ways of modeling synthesis reactions elastomers with a branched structure. Materialy XL otchetnoi nauchnoi konferentsii za 2001 god [Proceedings of the scientific conference reporting XL 2001 VSTA] Voronezh, VSTA, 2002, pp. 83–86. (in Russian).

4 Bitjukov V.K., Tikhomirov S.G., Lebedev V.F., Khaustov I.A. et al. Modelirovanie i kontrol' parametrov kachestva v protsessakh polimerizatsii [Modeling and control quality parameters in the processes of solution polymerization] Voronezh, VGUIT, 2011. 172 p. (in Russian).

5 Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Motorin M.L. Using a mathematical model to estimate the concentration of active polymerization centers early in the process of synthesis of thermoplastic. Vestnik VGTA [Proceedings of VSTA] 2011, no. 6 (48), pp.38–41 (in Russian).

6 Bitjukov V.K., Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Motorin M.L. Mathematical modeling synthesis of thermoplastic elastomers based on the initiation reaction and the effect of viscosity on the order of the reaction medium. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii [Control systems and information technologies] 2011, no. 3.2 (45), pp. 216–220 (in Russian).

7 Bitjukov V.K., Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Motorin M.L. Optimization of thermoplastic synthetic process using techniques determining the initial polymerization. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET] 2010, no. 2 (44), pp. 64–68 (in Russian).

8 Bitjukov V.K., Tikhomirov S.G., Lebedev V.F., Khvostov A.A. et al. Upravlenie kachestvom v protsessakh rastvomoi polimerizatsii [Quality management in the process of disductive polymerization] Voronezh, VGTA, 2008, 156 p. (in Russian).

9 Khaustov I.A. Synthesis of polymers batch process management, based on the fractional flow of the reaction components. Vestnik TGTU [Proceedings of TSTU] 2014, no. 4 (20), pp. 787–792. (in Russian).

10 Bitjukov V.K., Tikhomirov S.G., Khaustov I.A., Motorin M.L. Anionic polymerization control system of quality control for the MMP. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii [Control systems and information technologies] 2011, no. 4 (46), pp. 73–78. (in Russian)

11 Kayode Coker A. Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design, 2001. 1096 p.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergei G. Tikhomirov doctor of technical sciences, professor, informational and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, malish.1365@yandex.ru

Igor' A. Khaustov candidate of technical sciences, assistant professor, informational and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia,

Sergei S. Rylev candidate of technical sciences, senior lecturer, informational and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia,

Elena S. Durova master student, informational and control systems department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia,

CONTRIBUTION

Sergei G. Tikhomirov consultation during the study
Igor' A. Khaustov proposed a scheme of the experiment
Sergei S. Rylev wrote the manuscript, correct it before filing in editing
Elena S. Durova is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 2.10.2017

ACCEPTED 2.20.2017