

НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ПРОЦЕССАХ РАДИКАЛЬНОЙ СУСПЕНЗИОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

А.Г. Лопатин, Б.А. Брыков

Александр Геннадиевич Лопатин (ORCID 0000-0001-8036-8646)*, Богдан Александрович Брыков (ORCID 0000-0002-7971-5492)

Кафедра автоматизации производственных процессов, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, ул. Дружбы, 8, Новомосковск, Российская Федерация, 301665

E-mail: a_lopatin@mail.ru *, brybogdan@yandex.ru

К рассмотрению предлагается подход к синтезу нейро-нечетких моделей температурных режимов промышленных реакторов синтеза полимеров. Целесообразность разработки такой модели обоснована ее последующим применением в интеллектуальных робастно-адаптивных системах автоматического управления в качестве эталонной модели для выработки сигналов управления. Основой для построения нечеткой модели реактора служит массив данных, полученный в результате проведения множества опытов на физической модели реактора синтеза полимеров. Структурно нечеткая модель включает в себя три блока нечеткой логики. Первый блок представляет собой нечеткую модель кинетики процесса полимеризации. Выходом этого блока является кривая степени конверсии мономера. Вторым блоком нечеткой модели выдает нормированную к диапазону [0;1] кривую изменения температуры смеси в реакторе. Это возможно благодаря тому, что вид кривой изменения температуры зависит только от момента проявления гелевого эффекта, присущего процессам радикальной полимеризации. Этот момент может быть однозначно определен по кривой степени конверсии мономера. Третий блок нечеткой модели рассчитывает величину масштабирующего коэффициента на основе текущего расхода хладагента, а также заданного значения водного модуля и температурного режима в реакторе. Нормированная температурная кривая умножается на рассчитанный масштабный коэффициент и к результату прибавляется заданное значение температуры. На выходе получается итоговая кривая изменения температуры в реакторе. Блочная структура предлагаемой нечеткой модели является ее существенным отличием от возможных аналогов и ее ключевым преимуществом. Благодаря такой структуре модели можно заменять при необходимости некоторые ее элементы для получения возможности моделирования процессов радикальной полимеризации разных мономеров.

Ключевые слова: радикальная, суспензионная, полимеризация, кинетика, моделирование, нечеткая, математическая, модель

FUZZY-LOGIC MODELING OF TEMPERATURE REGIMES IN THE PROCESSES OF RADICAL SUSPENSION POLYMERIZATION

A.G. Lopatin, B.A. Brykov

Alexander G. Lopatin (ORCID 0000-0001-8036-8646)*, Bogdan A. Brykov (ORCID 0000-0002-7971-5492)

Department of Automation of Manufacturing Processes, Novomoskovsk Institute of Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Druzhby st., 8, Novomoskovsk, Tula region, 301665, Russia

E-mail: a_lopatin@mail.ru *, brybogdan@yandex.ru

An approach to the synthesis of neuro-fuzzy models of temperature regimes of industrial reactors for polymer synthesis is proposed for consideration. The expediency of developing such a model is justified by its subsequent application in intelligent robust-adaptive automatic control systems as a reference model for generating control signals. The basis for constructing a fuzzy model of the reactor is an array of data obtained as a result of conducting many experiments on a physical model of a polymer synthesis reactor. Structurally fuzzy model includes three blocks of fuzzy logic.

The first block is a fuzzy model of the kinetics of the polymerization process. The output of this block is a monomer conversion curve. The second block of the fuzzy model generates a curve of change in the temperature of the mixture in the reactor normalized to the range [0;1]. This is possible due to the fact that the shape of the temperature change curve depends only on the moment of exhibition of the gel effect, which is inherent in the processes of radical polymerization. This point can be unambiguously determined from the monomer conversion curve. The third block of the fuzzy model calculates the value of the scaling factor based on the current flow rate of the coolant, as well as the set value of the water modulus and the temperature regime in the reactor. After calculating this coefficient, it is multiplied by a normalized curve and the value of the specified temperature regime is added, obtaining at the output the final curve of temperature change in the reactor. The block structure of the proposed fuzzy model is its essential difference from possible analogues and its key advantage. Due to this structure of the model, it is possible to replace, if necessary, some of its elements in order to obtain the possibility of modeling the processes of radical polymerization of different monomers.

Key words: radical, polymerization, kinetics, modeling, fuzzy, mathematical, model

Для цитирования:

Лопатин А.Г., Брыков Б.А. Нечетко-логическое моделирование температурных режимов в процессах радикальной суспензионной полимеризации. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 6. С. 123–129. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6682.

For citation:

Lopatin A.G., Brykov B.A. Fuzzy-logic modeling of temperature regimes in the processes of radical suspension polymerization. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 6. P. 123–129. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6682.

ВВЕДЕНИЕ

Один из основных способов синтеза таких полимеров, как полистирол (ПС), поливинилацетат (ПВА) и полиметилметакрилат (ПММА), – процесс радикальной полимеризации в суспензии [1, 2]. Технология процесса предполагает применение реакторов периодического действия с рубашкой для нагревания и/или охлаждения реакционной массы и мешалкой, способной поддерживать постоянную скорость вращения для равномерного перемешивания смеси [3]. Сфера применения вышеназванных полимеров столь обширна, что вопросы интенсификации и оптимизации процесса полимеризации с целью обеспечения общемирового курса на энерго- и ресурсосбережение являются крайне важными для изучения.

Одна из главных задач здесь – это задача управления реактором для синтеза полимеров. Процесс, протекающий в нем, подвержен достаточно большому числу возмущений, основным из которых является гель-эффект [4, 5]. В этой связи для эффективного управления реактором целесообразно перейти к предиктивным интеллектуальным системам [6-8], способным управлять таким сложным нелинейным объектом, как реактор синтеза полимеров. Большинство систем управления такого рода требуют наличие опорной информации

о процессе для выработки корректных управляющих сигналов. Такая информация может быть получена с эталонной модели управляемого объекта. Зачастую такие эталонные модели представляют собой системы дифференциальных уравнений балансов вещества и энергии, а также уравнений кинетики процесса.

В рамках данного исследования рассмотрим математическую модель реактора синтеза ПММА. Эта модель содержит уравнения теплового баланса для потока хладагента (1), для стенки корпуса аппарата (2) и для реакционной смеси (3), а также уравнения для описания степени конверсии инициатора (4), мономера (5) и нулевого момента полимерной цепи (6):

$$V_p \rho_x c_{p_x} \frac{dT_x}{dt} = G_x c_{p_x} (T_{x0} - T_x) + \alpha_x S_{\text{внеш}} (T_{cm} - T_x), \quad (1)$$

$$m_{cm} c_{p_{cm}} \frac{dT_{cm}}{dt} = \alpha_{cm} S_{\text{внутр}} (T_{p.c.} - T_{cm}) - \alpha_x S_{\text{внеш}} (T_{cm} - T_x), \quad (2)$$

$$V_{p.c.} \rho_{p.c.} c_{p_{p.c.}} \frac{dT_{p.c.}}{dt} = (-\Delta H)_p k_p \lambda_0 M V_M - \alpha_{cm} S_{\text{внутр}} (T_{p.c.} - T_{cm}), \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dt} = -k_d I, \quad (4)$$

$$\frac{dM}{dt} = -2fk_d I - k_p M \lambda_0, \quad (5)$$

$$\frac{d\lambda_0}{dt} = 2fk_d I - k_t \lambda_0^2, \quad (6)$$

где $V_p, V_{p.c.}$ – объем рубашки и реакционной смеси, m^3 ; $\rho_x, \rho_{p.c.}$ – плотность хладагента и реакционной

смеси, кг/м^3 ; c_{p_x} , $c_{p_{cm}}$, $c_{p_{p.c.}}$ – теплоемкость

хладагента, материала стенки и реакционной смеси, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; G_x – массовый расход хладагента, кг/с ; T_{x0} , T_x , T_{cm} , $T_{p.c.}$ – начальная и конечная температура хладагента, температура стенки и реакционной смеси, К ; α_x , α_{cm} – коэффициент теплоотдачи от стенки корпуса к хладагенту и от реакционной смеси к стенке, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $S_{\text{внеш}}$, $S_{\text{внутр}}$ – внешняя и внутренняя площадь поверхности теплопередачи, м^2 ; m_{cm} – масса вещества стенки корпуса, кг ; ΔH_p – энтальпия процесса, Дж/моль ; M – концентрация мономера, моль/м^3 ; V_M – объем мономера, м^3 ; I – концентрация инициатора, моль/м^3 ; λ_0 – нулевой момент живой полимерной цепи, моль/м^3 ; f – эффективность инициатора, k_d – константа скорости разложения инициатора, сек^{-1} ; k_p – константа скорости роста цепи, $\text{м}^3/(\text{моль}\cdot\text{с})$; k_t – константа скорости обрыва цепи, $\text{м}^3/(\text{моль}\cdot\text{с})$.

Анализ этой системы уравнений дает понять, что ее использование для систем управления в представленном виде едва ли возможно. Это связано с множеством причин: сложность проведения расчетов, возможность ошибки при вводе исходной информации для моделирования (модель содержит более 30 переменных), неявный характер изменения многих величин во времени.

Отдельно стоит отметить, что уравнения кинетики содержат большое количество констант скоростей химической реакции и оценки значений этих параметров у разных исследователей отличаются на порядки [9-12].

Принимая ряд условных допущений, такую модель можно сократить, например, не учитывать тепловую инерционность стенки аппарата (2). Это справедливо для реакторов малого объема, можно сказать для реакторов лабораторного назначения. Однако, в промышленных реакторах объемом более 10 м^3 влияние этого фактора существенно и не учитывать это нельзя.

Таким образом, имеет смысл переход к методам нечетко-логического моделирования [13-15] реактора, позволяющий создать модель сколь угодно большой точности на основе имеющейся статистической информации, полученной с реального реактора, будь это промышленный реактор или реактор лабораторного назначения, точно воспроизводящий принцип работы промышленного реактора – физическая модель.

Такая модель будет проста для реализации и использования в качестве эталонной модели в системе управления, а также для изучения режимов работы реактора в научно-исследовательских целях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим структурную схему разрабатываемой нечеткой модели реактора (НМР) синтеза полимеров (рис. 1).

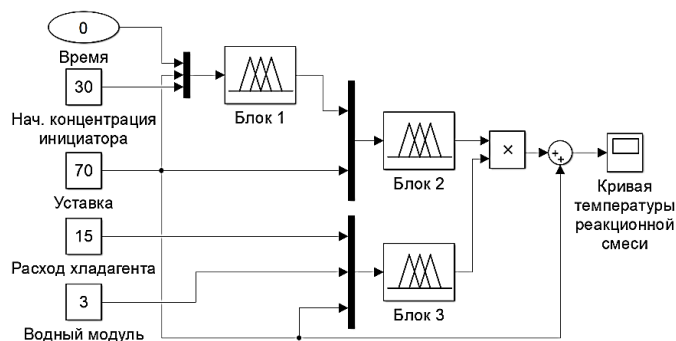


Рис. 1. Структурная схема нечеткой модели реактора
Fig. 1. Structure scheme of the reactor fuzzy model

Как видно из рис. 1, предлагаемая НМР имеет 5 входных величин, полностью характеризующих состояние протекающего в реакторе процесса:

1. Время процесса от начала синтеза до достижения 96% степени конверсии мономера, сек;
2. Начальная концентрация инициатора, моль/м^3 ;
3. Уставка или заданный температурный режим, $^{\circ}\text{C}$;
4. Массовый расход хладагента в рубашке аппарата, кг/с ;
5. Водный модуль, характеризующий соотношение воды и мономера.

Нетрудно заметить, что данная НМР имеет блочную структуру.

Первый блок представляет собой нечеткую модель кинетики процесса полимеризации. Выходной величиной этого блока является кривая степени конверсии мономера. Методика создания такой модели была дана нами в работе [16]. В этой же работе показан сравнительный анализ работы модели кинетики и реальных кривых степени конверсии мономера как для ПС, так и для ПММА. Таким образом, путем замены этого блока можно смоделировать динамику работы реактора для разных процессов.

Второй блок имеет всего две входные величины – уставку и значение степени конверсии мономера. Этих данных достаточно для определения гель-эффекта, вызывающего заметное тепловыделение в реакционной массе. Выходными данными для этого блока служит кривая изменения температуры в реакторе, нормированная к диапазону $[0;1]$.

Третий блок вырабатывает масштабирующий сигнал на основании данных о значении водного модуля, уставки и текущего значения расхода хладагента в рубашке аппарата. Последнее значение является основным управляющим воздействием в системах управления реактором, поэтому такая модель может быть использована как эталонная в предиктивной системе управления. Масштабирующий сигнал определяет максимальное тепловыделение в пиковый момент гель-эффекта.

Для получения итоговой кривой изменения температуры смеси в реакторе рассчитанный масштабирующий сигнал с 3 блока умножается на нормированную кривую из 2 блока, а после прибавляется значение уставки.

Первый этап синтеза 2 и 3 блока нечеткой логики – сбор достаточного количества статистического материала. Это кривые изменения температуры смеси в реальном реакторе. В данном исследовании используется лабораторный реактор, представляющий собой емкость объемом 850 мл, снабженную рубашкой для отвода тепла и мешалкой для перемешивания смеси.

Для качественного синтеза блоков необходимо провести множество экспериментов с лабораторным реактором при всех возможных сочетаниях начальных условий процесса: для уставки рассмотрим 3 возможных случая – 60, 70, 80 °С; для расхода хладагента G_x используем 6 значений – 5, 10, 15, 20, 25, 30 кг/с; для водного модуля примем 4 возможных значения – 1, 2, 3, 4. Таким образом, достаточно провести 72 эксперимента для получения исходного статистического материала.

Второй этап – группировка экспериментально полученных кривых температуры по температурной уставке, т.е. можно вывести 3 группы кривых по 24 штуки в каждой. Кривые в каждой группе имеют схожий вид, поэтому их можно унифицировать, построить нормализованные кривые и выделить масштабирующие коэффициенты. Выполняются эти операции следующим образом:

- определяется минимальная $T1$ и максимальная $T2$ температура процесса по усредненной кривой каждой группы $Tsr(t)$;

- задается нормированный диапазон изменения для нормированной кривой блока 2: минимальное $y1$ и максимальное $y2$ значение. В нашем примере $y1 = 0, y2 = 1$;

- определяются значения k и b согласно выражениям (7) и (8):

$$k = \frac{y2 - y1}{T2 - T1}, \quad (7)$$

$$b = \frac{y1 \cdot (T2 - T1) - T1 \cdot (y2 - y1)}{T2 - T1}; \quad (8)$$

- нормированная кривая изменения температуры $Tsr_{norm}(t)$ является выходом второго блока нечеткой логики. Она определяется выражением (9):

$$Tsr_{norm}(t) = k \cdot Tsr(t) + b; \quad (9)$$

- расчет масштабирующих коэффициентов, являющихся выходной величиной третьего блока нечеткой логики, происходит по уравнению (7), где $T1 = 0, T2 = 1$, а величины $y1$ и $y2$ соответствуют минимальному и максимальному значению температур, установленному по исходным кривым.

Третий этап – синтез нечетких блоков. Этот процесс проведем с использованием пакета прикладных программ MATLAB и приложений Fuzzy Logic Toolbox [17] и ANFIS Editor [18]. Общим свойством этих блоков является алгоритм вывода. Поскольку они оба создаются в автоматическом режиме на основе обучающих выборок, то они являются моделями типа Такаги-Сугено, где выходные переменные – набор констант [19].

Рассмотрим внутреннюю структуру каждого блока.

Второй блок имеет 2 входные переменные и 1 выходную. Входные переменные – это степень конверсии мономера Xm и уставка $T, °C$. Выходная – нормированная кривая температуры процесса $Tnorm, °C$. Лингвистическое описание [20] входных переменных предполагает 21 гауссову функцию принадлежности для переменной «степень конверсии» и 3 гауссовых функции принадлежности для переменной «уставка». База знаний второго нечеткого блока составляет 63 лингвистических правила с логической связкой «И» (в скобках указан весовой коэффициент каждого правила):

01. ЕСЛИ (Xm 0.00) И (T 60) ТО ($Tnorm$ 0.00) (1);
02. ЕСЛИ (Xm 0.05) И (T 60) ТО ($Tnorm$ 0.21) (1);
03. ЕСЛИ (Xm 0.10) И (T 60) ТО ($Tnorm$ 0.57) (1);
-
62. ЕСЛИ (Xm 0.90) И (T 80) ТО ($Tnorm$ 0.25) (1);
63. ЕСЛИ (Xm 0.95) И (T 80) ТО ($Tnorm$ 0.18) (1).

Третий блок имеет 3 входные переменные и 1 выходную. Входные переменные – это расход хладагента $G, кг/с$, водный модуль W и уставка $T, °C$. Выходная – масштабирующий коэффициент нормированной кривой K . Лингвистическое описание входных переменных предполагает 6 гауссовых функций принадлежности для переменной «расход хладагента», 4 гауссовых функции принадлежности для переменной «водный модуль» и 3 гауссовых функции принадлежности для переменной «уставка». На рис. 2 показана нейро-сетевая струк-

тура третьего нечеткого блока, созданная посредством ANFIS Editor. База знаний третьего нечеткого блока составляет 72 лингвистических правила с логической связкой «И» (в скобках указан весовой коэффициент каждого правила):

01. ЕСЛИ (G 05) И (W 1) И (T 60) ТО (K 13.08) (1);
 02. ЕСЛИ (G 10) И (W 1) И (T 60) ТО (K 6.656) (1);
 03. ЕСЛИ (G 15) И (W 1) И (T 60) ТО (K 4.462) (1);

71. ЕСЛИ (G 25) И (W 4) И (T 80) ТО (K 5.498) (1);
 72. ЕСЛИ (G 30) И (W 4) И (T 80) ТО (K 3.765) (1);

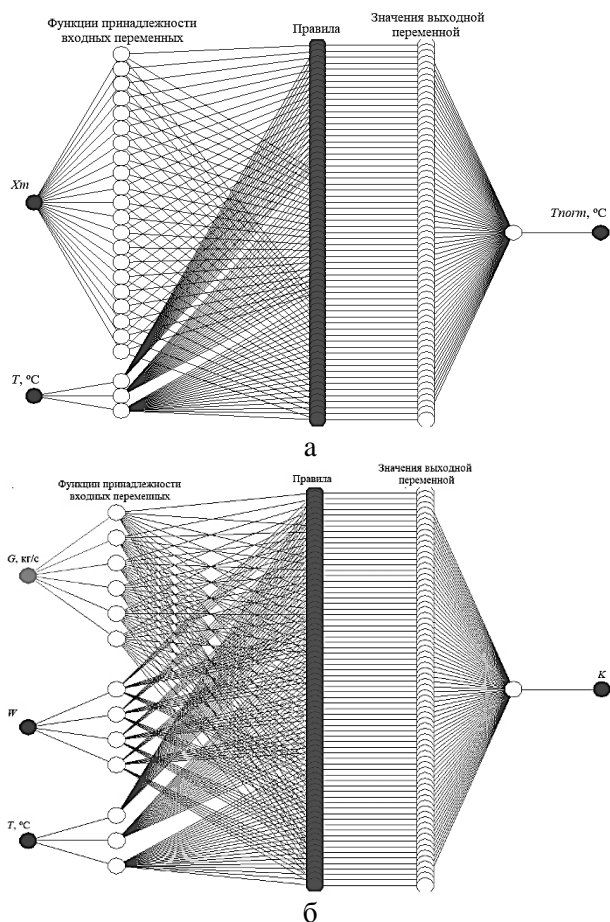


Рис. 2. Нейро-сетевая структура второго (а) и третьего (б) нечеткого блока в ANFIS

Fig. 2. Neural structure of a second (a) and third (б) fuzzy block in ANFIS

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки адекватности разработанной НМР необходимо провести сравнительный анализ с экспериментальными данными. Рассмотрим пример работы НМР в следующих условиях протекания процесса: водный модуль 3, начальная концентрация инициатора $I_0 = 30$ моль/м³; расход хладагента $G = 15$ кг/с; уставка $T = 70$ °С.

Результаты сравнительного анализа по степени конверсии мономера показаны на рис. 3, а по температуре процесса – на рис. 4.

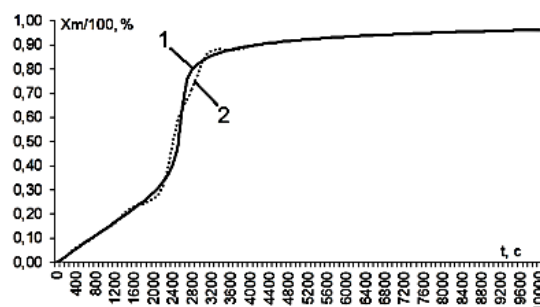


Рис. 3. Сравнительный анализ работы нечеткой модели реактора по степени конверсии мономера: 1 – модель; 2 – эксперимент на лабораторном реакторе

Fig. 3. Comparative analysis of the reactor fuzzy model in terms of the degree of monomer conversion: 1 – model; 2 – experiment on a laboratory reactor

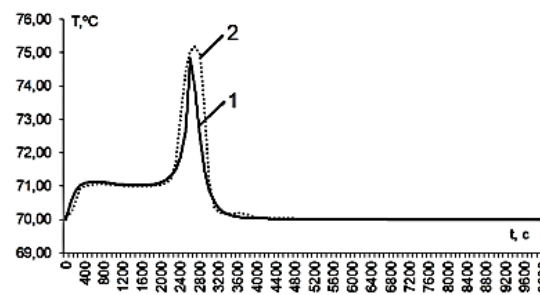


Рис. 4. Сравнительный анализ работы нечеткой модели реактора по степени изменения температуры: 1 – модель; 2 – эксперимент на лабораторном реакторе

Fig. 4. Comparative analysis of the reactor fuzzy model in terms of the degree of temperature change: 1 – model; 2 – experiment on a laboratory reactor

На показанных рисунках точками отмечены результаты эксперимента, проводимого на лабораторном реакторе, а сплошной линией – результат работы НМР. Следует обратить внимание, что в обоих случаях среднее значение относительной ошибки не превышает 4%, что является признаком хорошей сходимости результатов.

ВЫВОДЫ

Нечеткая модель реактора синтеза полимеров, представленная в данном исследовании, показывает адекватные результаты (т.е. ошибку моделирования до 4%) при моделировании режимов работы реактора, удовлетворяющих начальным условиям вида:

- температурный режим от 60 до 80 °С;
- начальная концентрация инициатора от 20 до 40 моль/м³;

- расход хладагента от 5 до 30 кг/с;
- водный модуль от 1 до 4.

Для практического использования НМР предполагается применение MATLAB Simulink. В этом случае НМР может быть использована в целях выявления оптимальных, пограничных и опасных режимов работы реактора.

Для использования НМР в промышленных системах управления в качестве эталонной модели предполагается сгенерировать программный код по стандартам международной электротехнической комиссии для загрузки его в логический контроллер с использованием Simulink PLC Coder.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта правительства Тульской области

2021 г. в сфере науки и техники «Разработка и исследование математических моделей промышленного реактора суспензионной полимеризации на основе методов нечеткой логики».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was financially supported by a grant from the government of the Tula region in 2021 in the field of science and technology "Development and study of mathematical models of an industrial suspension polymerization reactor based on fuzzy logic methods."

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dhiraj K.G, Christophe A.S., Hoarau Y, Parida D., Bouquey M., Muller R.** Analytical Solution of Free Radical Polymerization: Applications- Implementing Gel Effect Using AK Model. *Macromolecules*, 2014. V. 47. N 21. P. 7370-7377. DOI: 10.1021/ma501413m.
2. **Dhiraj K.G, Christophe A.S., Hoarau Y, Parida D., Bouquey M., Muller R.** Analytical Solution of Free Radical Polymerization: Applications - Implementing Gel Effect Using CCS Model. *Macromolecules*. 2014. V. 47. N 23. P. 8178-8189. DOI: 10.1021/ma501251j.
3. **Вент Д.П., Лопатин А.Г., Брыков Б.А., Савельянов В.П.** Реакторная динамика процесса суспензионной полимеризации стирола. *Теор. осн. хим. технологии*. 2020. Т. 54. № 5. С. 615–622. DOI: 10.31857/S0040357120050218.
4. **Devadoss D.E, Volpert V.A.** Modeling isothermal free-radical frontal polymerization with gel effect using free volume theory, with and without inhibition. *J. Math. Chem.* 2006. V. 39. N 1. P. 73-105. DOI: 10.1007/s10910-005-9006-4.
5. **Савельянов В.П.** Общая химическая технология полимеров. М.: ИКЦ «Академкнига». 2007. 336 с.
6. **Alipoor M.** Fuzzy temperature control in a batch polymerization reactor using ANFIS method. *Int. J. Eng. Tech.* 2009. V. 1. P. 7-12. DOI: 10.7763/IJET.2009.V1.2.
7. **Oravec J., Bakošová M.** Robust model-based predictive control of exothermic chemical reactor. *Chem. Pap.* 2015. V. 69. N 10. P. 1389-1394. DOI: 10.1515/chempap-2015-0146.
8. **Lucia S., Finkler T., Engell S.** Multi-stage nonlinear model predictive control applied to a semi-batch polymerization reactor under uncertainty. *J. Process Control.* 2013. V. 23. N 9. P. 1306-1319. DOI: 10.1016/j.jprocont.2013.08.008.
9. **Curteanu S., Bulacovschi V., Catalin L.** Free radical polymerization of methyl methacrylate: modeling and simulation by moment generating function. *Iran. Polym. J.* 1998. V. 7. N 4. P. 225-233.
10. **Curteanu S., Leon F., Galea D.** Alternatives for Multiobjective Optimization of a Polymerization Process. *J. Appl. Pol. Sci.* 2005. V. 100. P. 3680-3695. DOI: 10.1002/app.23205.
11. **Curteanu S.** Modeling and simulation of free radical polymerization of styrene under semibatch reactor conditions. *Cent. Eur. J. Chem.* 2003. V. 40. P. 69-90. DOI: 10.2478/BF02479259.

REFERENCES

1. **Dhiraj K.G, Christophe A.S., Hoarau Y, Parida D., Bouquey M., Muller R.** Analytical Solution of Free Radical Polymerization: Applications- Implementing Gel Effect Using AK Model. *Macromolecules*, 2014. V. 47. N 21. P. 7370-7377. DOI: 10.1021/ma501413m.
2. **Dhiraj K.G, Christophe A.S., Hoarau Y, Parida D., Bouquey M., Muller R.** Analytical Solution of Free Radical Polymerization: Applications - Implementing Gel Effect Using CCS Model. *Macromolecules*. 2014. V. 47. N 23. P. 8178-8189. DOI: 10.1021/ma501251j.
3. **Vent D.P., Lopatin A.G., Brykov B.A., Savel'yanov V.P.** Reactor dynamics of suspension polymerization of styrene. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2020. V. 54. N 5. P. 886–893. DOI: 10.1134/s0040579520050462.
4. **Devadoss D.E, Volpert V.A.** Modeling isothermal free-radical frontal polymerization with gel effect using free volume theory, with and without inhibition. *J. Math. Chem.* 2006. V. 39. N 1. P. 73-105. DOI: 10.1007/s10910-005-9006-4.
5. **Savelyanov V.P.** General chemical polymer technology. М.: ИКТs «Академкнига». 2007. 336 p. (in Russian).
6. **Alipoor M.** Fuzzy temperature control in a batch polymerization reactor using ANFIS method. *Int. J. Eng. Tech.* 2009. V. 1. P. 7-12. DOI: 10.7763/IJET.2009.V1.2.
7. **Oravec J., Bakošová M.** Robust model-based predictive control of exothermic chemical reactor. *Chem. Pap.* 2015. V. 69. N 10. P. 1389-1394. DOI: 10.1515/chempap-2015-0146.
8. **Lucia S., Finkler T., Engell S.** Multi-stage nonlinear model predictive control applied to a semi-batch polymerization reactor under uncertainty. *J. Process Control.* 2013. V. 23. N 9. P. 1306-1319. DOI: 10.1016/j.jprocont.2013.08.008.
9. **Curteanu S., Bulacovschi V., Catalin L.** Free radical polymerization of methyl methacrylate: modeling and simulation by moment generating function. *Iran. Polym. J.* 1998. V. 7. N 4. P. 225-233.
10. **Curteanu S., Leon F., Galea D.** Alternatives for Multiobjective Optimization of a Polymerization Process. *J. Appl. Pol. Sci.* 2005. V. 100. P. 3680-3695. DOI: 10.1002/app.23205.
11. **Curteanu S.** Modeling and simulation of free radical polymerization of styrene under semibatch reactor conditions. *Cent. Eur. J. Chem.* 2003. V. 40. P. 69-90. DOI: 10.2478/BF02479259.

12. **Santos J.C.** Comparison of techniques for the determination of conversion during suspension polymerization reactions. *Braz. J. Chem. Eng.* 2008. V. 25. N 2. P. 399-407. DOI: 10.1590/S0104-66322008000200017.
13. **Броневи́ч А.Г., Лепский А.Е.** Нечеткие модели анализа данных и принятия решений. М.: Изд. дом ВШЭ. 2022. 264 с.
14. **Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С.** Нечеткие модели и сети. М.: Гор. линия–Телеком. 2018. 284 с.
15. **Elizabeth S., Sujatha L.** Fuzzy critical path problem for project network. *Int. J. Pure Appl. Mathem.* 2013. V. 85. N 2. P. 223–240. DOI: 10.12732/ijpam.v85i2.4.
16. **Лопатин А.Г., Вент Д.П., Брыков Б.А.** Синтез нейро-нечеткой модели кинетики процессов радикальной полимеризации. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 7. С. 67–73. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6081.
17. **Тарасян В.С.** Пакет Fuzzy Logic Toolbox for Matlab. Учебное пособие. Изд-во УрГУПС. 2013. 112 с.
18. **Масловская А.Г., Мороз Л.И.** Математическое и компьютерное моделирование. Моделирование в условиях неопределенности. Моделирование фрактальных структур. Благовещенск: Амурский гос. ун-т. 2019. 71 с.
19. **Камуяр М.** Takagi-Sugeno Fuzzy Modeling for Process Control. School of Electrical, Electronic and Computer Engineering. 2008. 21 p.
20. **Rusnok P.** Linguistic Descriptions As a Modeling Tool For Multivariate Time Series. Conf. of the Internat. Fuzzy Syst. Assoc. and the Eur. Soc. for Fuzzy Logic and Technology. 2015. P. 981-986. DOI: 10.2991/ifsa-eusflat-15.2015.138.
12. **Santos J.C.** Comparison of techniques for the determination of conversion during suspension polymerization reactions. *Braz. J. Chem. Eng.* 2008. V. 25. N 2. P. 399-407. DOI: 10.1590/S0104-66322008000200017.
13. **Bronevich A.G., Lepsky A.E.** Fuzzy models of data analysis and decision making. M.: Izd. dom VShE. 2022. 264 p. (in Russian).
14. **Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S.** Fuzzy models and networks. M.: Gor. liniya-Telecom. 2018. 284 p. (in Russian).
15. **Elizabeth S., Sujatha L.** Fuzzy critical path problem for project network. *Int. J. Pure Appl. Mathem.* 2013. V. 85. N 2. P. 223–240. DOI: 10.12732/ijpam.v85i2.4.
16. **Lopatin A.G., Vent D.P., Brykov B.A.** Synthesis of a neuro-fuzzy model of the kinetics of radical polymerization processes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 7. P. 67–73 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6081.
17. **Tarasyan V.S.** Fuzzy Logic Toolbox for Matlab. Study guide. Izd-vo UrGUPS. 2013. 112 p. (in Russian).
18. **Maslovskaya A.G., Moroz L.I.** Mathematical and computer modeling. Modeling under uncertainty. Modeling of fractal structures. Blagoveshchensk: Amur gos. un-t. 2019. 71 p. (in Russian).
19. **Kamyar M.** Takagi-Sugeno Fuzzy Modeling for Process Control. School of Electrical, Electronic and Computer Engineering. 2008. 21 p.
20. **Rusnok P.** Linguistic Descriptions As a Modeling Tool For Multivariate Time Series. Conf. of the Internat. Fuzzy Syst. Assoc. and the Eur. Soc. for Fuzzy Logic and Technology. 2015. P. 981-986. DOI: 10.2991/ifsa-eusflat-15.2015.138.

Поступила в редакцию 30.05.2022

Принята к опубликованию 13.03.2023

Received 30.05.2022

Accepted 13.03.2023