

УДК 544.4:004.4
DOI: 10.15827/0236-235X.137.106-112

Дата подачи статьи: 29.09.21, после доработки: 08.11.21
2022. Т. 35. № 1. С. 106–112

Программная реализация алгоритма поиска оптимального температурного режима каталитического процесса

*Е.В. Антипина*¹, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, *stepashinaev@ya.ru*

*С.А. Мустафина*², д.ф.-м.н., профессор, *mustafina_sa@mail.ru*

*А.Ф. Антипин*¹, к.т.н., доцент, *andrejantipin@ya.ru*

¹ Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета, г. Стерлитамак, 453103, Россия

² Башкирский государственный университет, г. Уфа, 450076, Россия

В статье описано ПО для решения задач оптимального управления каталитическим процессом в реакторе идеального смешения. На основе математической модели процесса в реакторе идеального смешения сформулирована в общем виде задача оптимального управления. В качестве управляющего параметра рассматривается температура хладагента, на значения которой наложены ограничения. Приведен пошаговый алгоритм численного решения поставленной задачи, в основу которого положен эволюционный метод искусственных иммунных систем. Применение данного метода дает возможность получить приближенное решение задачи за приемлемое с практической точки зрения время.

На основе сформулированного алгоритма разработано приложение для каталитической реакции димеризации α -метилстирола в присутствии цеолитного катализатора NaNu , продукты которой (линейные димеры) широко применяются в промышленном производстве. Для расчета процесса в реакторе идеального смешения в программе реализован ряд численных методов. В программном средстве имеется возможность настройки пользователем параметров как каталитического процесса, так и алгоритма метода искусственных иммунных систем. Критерий оптимизации задается пользователем в ходе работы программы, что позволяет применять ее для различных постановок задач каталитического процесса димеризации α -метилстирола и получать набор оптимальных концентраций веществ и оптимальный температурный режим, соответствующие заданным показателям протекания процесса. Приведено решение задачи поиска оптимального температурного режима рассматриваемого каталитического процесса, критерием оптимальности которой является достижение максимального выхода линейных димеров при минимальном выходе циклических димеров и тримеров.

Ключевые слова: искусственные иммунные системы, линейные димеры, реактор идеального смешения, оптимальный температурный режим.

Основная задача любого промышленного предприятия заключается в повышении эффективности и сокращении издержек производства, снижении себестоимости и т.д. Для ее решения проводятся экспертная оценка на основе статистических данных, анализ производственных затрат, а также поиск и внедрение новых технологий и технологического оборудования. Однако подобные пути решения ведут к дополнительным затратам, которых можно избежать, используя цифровые двойники химико-технологических процессов, в том числе специализированное ПО, позволяющее создать модель технологической установки или конкретного технологического процесса.

При исследовании закономерностей протекания каталитических процессов широко применяются методы математического моделирования. На основе математической модели процесса разрабатывается ПО, позволяющее без

лабораторного эксперимента определить оптимальные условия его ведения и тем самым значительно удешевить себестоимость синтеза веществ. Таким образом, разработка программных средств, реализующих методы оптимального управления каталитическим процессом, позволяет сэкономить время и материальные средства на проведение натурного эксперимента и поэтому актуальна.

Задачи оптимального управления каталитическим процессом имеют ряд особенностей, которые затрудняют программную реализацию численных методов их решения. Это нелинейность описания динамики процесса, большая размерность задач, наличие ограничений на фазовые переменные, зависимость от начального приближения решения задачи [1–3]. Преодолеть данные трудности при решении задач управления химическим процессом позволяют эволюционные алгоритмы. С их помощью

можно получить приближенное решение оптимизационной задачи за приемлемое с практической точки зрения время, что крайне важно для управления каталитическим процессом в режиме реального времени.

Один из эволюционных методов решения оптимизационных задач – метод искусственных иммунных систем, особенностью которого является механизм памяти. С помощью этого механизма сохраняется информация о найденных ранее наилучших решениях, тем самым повышается эффективность глобального поиска решения задачи.

В настоящее время метод искусственных иммунных систем используется при решении задач распознавания образов [4], в качестве инструмента интеллектуального анализа бизнес-процессов [5], а также находит практическое применение для настройки промышленных регуляторов [6] и в реализации диагностики электрических систем [7, 8].

Алгоритм поиска оптимального температурного режима каталитического процесса

Одним из параметров, наиболее сильно влияющих на динамику химических процессов, является температура. Поэтому для оптимального управления каталитическим процессом важна задача определения оптимального температурного режима, обеспечивающего экстремум критерия оптимальности.

Пусть каталитический процесс протекает в реакторе идеального смешения периодического действия. Математическая модель каталитического процесса в реакторе идеального смешения описывается уравнениями материального и теплового баланса:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x(t), T(t), t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$C_p \frac{dT}{dt} = \sum_{j=1}^n Q_j W_j(x, T) + \frac{\alpha_x S_x}{C_0} (T_x - T) \quad (2)$$

с начальными условиями

$$x_i(0) = x_i^0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$T(0) = T^0, \quad (4)$$

где $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ – вектор переменных состояния процесса (концентрация веществ, переменный реакционный объем); t – время; T – температура реакционной смеси; $f_i(x(t), T(t), t)$ – функции, непрерывные вместе со своими частными производными; C_p – мольная теплоемкость реакционной смеси; Q_j – теп-

ловой эффект j -й стадии реакции; W_j – приведенная скорость j -й стадии реакции; α_x – коэффициент теплопередачи; S_x – удельная поверхность теплосъема; C_0 – начальная мольная плотность реакционной среды (начальная суммарная концентрация); T – температура реакционной смеси; T_x – температура хладагента.

Пусть параметром управления является температура хладагента $T_x(t)$, на значения которой наложены ограничения:

$$T_x^a \leq T_x(t) \leq T_x^b. \quad (5)$$

Допустимые значения температуры реакционной смеси задаются неравенством

$$T^a \leq T(t) \leq T^b. \quad (6)$$

Требуется определить оптимальный температурный режим $T_x(t)$ каталитического процесса, описываемого системой дифференциальных уравнений (1), (3) с начальными условиями (2), (4) и с учетом ограничений (5), (6), доставляющий максимум критерию оптимальности:

$$G(x(t_{end}), T, T_x) \rightarrow \max. \quad (7)$$

Критерий оптимальности выражает максимальный выход целевых продуктов реакции (для положительных значений коэффициентов μ_i) или минимальное содержание побочных продуктов реакции (для отрицательных значений коэффициентов μ_i) в конечный момент времени.

Сформулируем алгоритм поиска оптимального температурного режима каталитического процесса в реакторе идеального смешения, используя метод искусственных иммунных систем. Работа алгоритма заключается в переходе из поколения в поколение наиболее приспособленных иммунных клеток, представляющих собой набор векторов [9, 10]. Для определения приспособленности иммунной клетки необходимо определить значение фитнес-функции, в качестве которой выступает критерий оптимальности (7).

Шаг 1. Создание начальной популяции температуры хладагента.

Задаются следующие параметры алгоритма: размер популяции gr , количество иммунных клеток для отбора sr , количество клеток для оператора клонирования cl , параметр оператора мутации mut , количество иммунных клеток с наименьшим значением фитнес-функции cb , количество точек разбиения временного интервала m , общее количество итераций алгоритма $iter$, счетчик итераций $i_iter := 0$.

Случайным образом (с учетом неравенства (5)) заполняются значения иммунных клеток

начальной популяции температуры хладо-агента:

$$T_x^j(0) = (T_{x1}^j(0), T_{x2}^j(0), \dots, T_{xm}^j(0)), \quad j = 1, \dots, rp.$$

Вычисляются значения фитнес-функции (7) для каждой иммунной клетки $T_x^j(0)$ путем решения системы дифференциальных уравнений (1), (2) с начальными условиями (3), (4).

Шаг 2. Клонирование иммунных клеток.

Из популяции i_iter выбираются cp иммунных клеток с наибольшим значением фитнес-функции. Для каждой выбранной клетки создаются cl копий (клонов).

Шаг 3. Мутация клеток-клонов.

С помощью генератора случайных чисел для каждого клона генерируются числа $n_1 \in [0, T_x^b - T_{xi}^j(i_iter)]$, $n_2 \in [0, T_{xi}^j(i_iter) - T_x^a]$, $l \in [0, 1]$, $i = \overline{1, m}$. Если $l > 0,5$, то $T_{xi}^r(i_iter) := T_{xi}^r(i_iter) + n_1 \cdot mut$, иначе $T_{xi}^r(i_iter) := T_{xi}^r(i_iter) - n_2 \cdot mut$, $r = \overline{1, cl}$.

Шаг 4. Вычисление значений фитнес-функции.

Для полученных клонов-мутантов вычисляется значение фитнес-функции (7).

Шаг 5. Обновление популяции.

В обновленную популяцию помещается либо клетка-родитель, либо ее клон-мутант в зависимости от того, какой из клеток соответствует наибольшее значение фитнес-функции.

Шаг 6. Переход к новой популяции.

Случайным образом с учетом неравенства (5) генерируются cb новых иммунных клеток и помещаются в популяцию $T_x^j(i_iter)$ ($j = \overline{1, rp}$) вместо cb иммунных клеток с наименьшим значением фитнес-функции (7). Для каждой новой иммунной клетки вычисляется значение фитнес-функции.

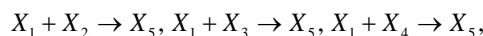
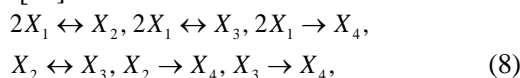
Шаг 7. Проверка условия окончания поиска.

Если $i_iter < iter$, то осуществляется переход к шагу 2, иначе поиск решения завершается. Решением задачи поиска оптимального температурного режима каталитического процесса является иммунная клетка из последней популяции, которой соответствует наибольшее значение фитнес-функции.

Описание ПО

Сформулированный алгоритм реализован в виде программного средства в среде визуального программирования Delphi для каталитической реакции димеризации α -метилстирола в присутствии цеолитного катализатора NaHY.

Механизм реакции димеризации α -метилстирола в присутствии цеолитного катализатора NaHY описывается совокупностью стадий [11]:



где X_1 – α -метилстирол; X_2 – α -димер; X_3 – β -димер; X_4 – циклический димер; X_5 – тримеры.

Кинетические уравнения реакции имеют вид:

$$w_1(C, T) = k_1(T)C_1^2 - k_{10}(T)C_2, \\ w_2(C, T) = k_2(T)C_1^2 - k_{11}(T)C_3, \\ w_3(C, T) = k_3(T)C_1^2, \\ w_4(C, T) = k_4(T)C_2 - k_{12}(T)C_3, \\ w_5(C, T) = k_5(T)C_2, \\ w_6(C, T) = k_6(T)C_3, \\ w_7(C, T) = k_7(T)C_1C_2, \\ w_8(C, T) = k_8(T)C_1C_3, \\ w_9(C, T) = k_9(T)C_1C_4, \quad (9)$$

где C_i – концентрация i -го вещества ($i = \overline{1, 5}$) (кмоль/м³); k_j – константа j -й стадии ($j = \overline{1, 9}$) (м³/(кмоль·ч)), которая рассчитывается из уравнения Аррениуса.

Кинетическая модель процесса димеризации α -метилстирола представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{F_i(x, T) - x_i F_n(x, T)}{N},$$

$$\text{где } F_i = \sum_{j=1}^9 v_{ij} W_j, \quad i = \overline{1, 5}, \quad (10)$$

$$\frac{dN}{dt} = F_n(x, T),$$

$$\text{где } F_n = \sum_{j=1}^9 W_j \sum_{i=1}^5 v_{ij}, \quad (11)$$

с начальными условиями:

$$x_i(0) = x_i^0 \quad (i = \overline{1, 5}), \quad N(0) = 1, \quad (12)$$

где $N = C/C_0$ – относительное изменение числа молей реакционной среды, $C_0 = \sum_{i=1}^5 C_i(0)$ – начальная суммарная концентрация веществ (кмоль/м³); v_{ij} – матрица стехиометрических коэффициентов веществ ($i = \overline{1, 5}, j = \overline{1, 9}$); $W_j = w_j/C_0$ – приведенная скорость j -й стадии реакции (1/ч).

Уравнение теплового баланса рассматриваемого процесса имеет вид

$$C_p \frac{dT}{dt} = \sum_{j=1}^9 Q_j W_j + \frac{\alpha_x S_x}{C_0} (T_x - T) \quad (13)$$

с начальным условием

$$T(0) = T^0, \quad (14)$$

где C_p – мольная теплоемкость реакционной смеси (кДж/(кмоль·К)); Q_j – тепловой эффект j -й стадии реакции ($j = \overline{1, 9}$); W_j – приведенная скорость j -й стадии реакции ($j = \overline{1, 9}$); α_x – коэффициент теплопередачи (ккал/(м²·К)); S_x – удельная поверхность теплообмена (1/м); T – температура протекания реакции (К); T_x – температура хладагента (К).

Значения кинетических и технологических параметров процесса димеризации α -метилстирола приведены в [12].

Работа приложения состоит из двух этапов.

Этап 1. Настройка параметров процесса оптимизации.

На вкладке «Оптимизация процесса» задаются значения времени протекания каталитического процесса и технологические ограничения температуры реакции и температуры хладагента. Затем с помощью кнопок необходимо ввести выражение для критерия оптимальности, которое представляет собой математическое выражение вида $\sum \mu_i x_i \rightarrow \max(\min)$, где $\mu_i = \pm 1$. Знак коэффициента зависит от того, максимальное или минимальное значение компонента x_i требуется найти в задаче оптимального управления. На рисунке 1 критерий оптимальности

$$x_2 + x_3 - x_4 - x_5 \rightarrow \max \quad (15)$$

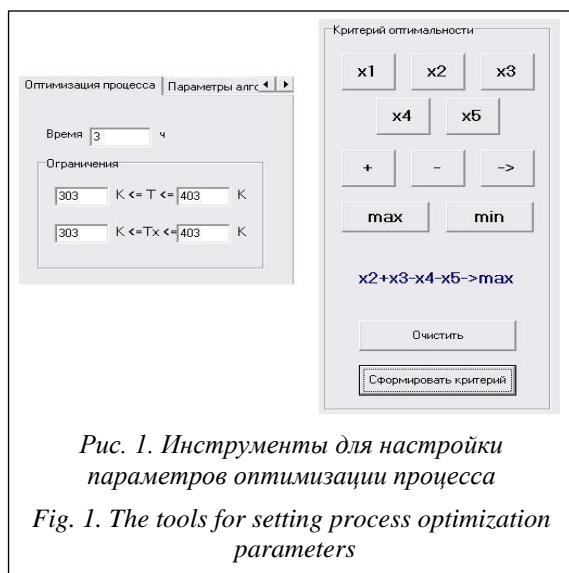


Рис. 1. Инструменты для настройки параметров оптимизации процесса

Fig. 1. The tools for setting process optimization parameters

соответствует задаче поиска максимума выхода линейных димеров ($x_2 + x_3$) при минимальном выходе циклических димеров x_4 и тримеров x_5 в конечный момент времени протекания реакции. После ввода выражения критерия оптимальности следует нажать кнопку «Сформировать критерий».

Этап 2. Настройка параметров процесса алгоритма.

На вкладке «Параметры алгоритма» устанавливаются параметры алгоритма метода искусственных иммунных систем (рис. 2). Также для системы дифференциальных уравнений (10), (11), (13) необходимо задать начальные условия (12), (14) и выбрать численный метод ее решения. В программе реализованы следующие неявные методы решения системы дифференциальных уравнений: неявный метод Эйлера, метод прогноза и коррекции, неявный метод Рунге–Кутта.

После настройки всех параметров процесса и алгоритма следует нажать кнопку «Расчет». Полученное решение задачи поиска оптимального температурного режима для процесса димеризации α -метилстирола представляется в программе в численном и графическом видах.

На рисунке 2 показано решение задачи поиска оптимального температурного режима $T_x(t)$ для процесса, описываемого системой дифференциальных уравнений (10), (11), (13) с начальными условиями (12), (14) и с учетом ограничений $303 \text{ K} \leq T_x(t) \leq 403 \text{ K}$, $303 \text{ K} \leq T(t) \leq 403 \text{ K}$, с целью достижения максимума критерием оптимальности (15).

В результате выполненных расчетов с помощью программного средства вычислены оптимальные концентрации веществ и оптимальный температурный режим процесса димеризации α -метилстирола в реакторе идеального смешения продолжительностью 3 часа. Установлено, что для достижения максимального выхода линейных димеров при минимальном выходе циклических димеров и тримеров и начальной температуре реакционной смеси, равной 303 К, необходимо:

- на протяжении 0,5 ч поддерживать температуру хладагента на уровне 403 К;
- резко снизить температуру хладагента до 303 К и в течение 1,5 ч удерживать ее на этом уровне;
- резко поднять температуру до 403 К и поддерживать ее до конца процесса (рис. 2).

При соблюдении рассчитанного температурного режима хладагента в конце реакции

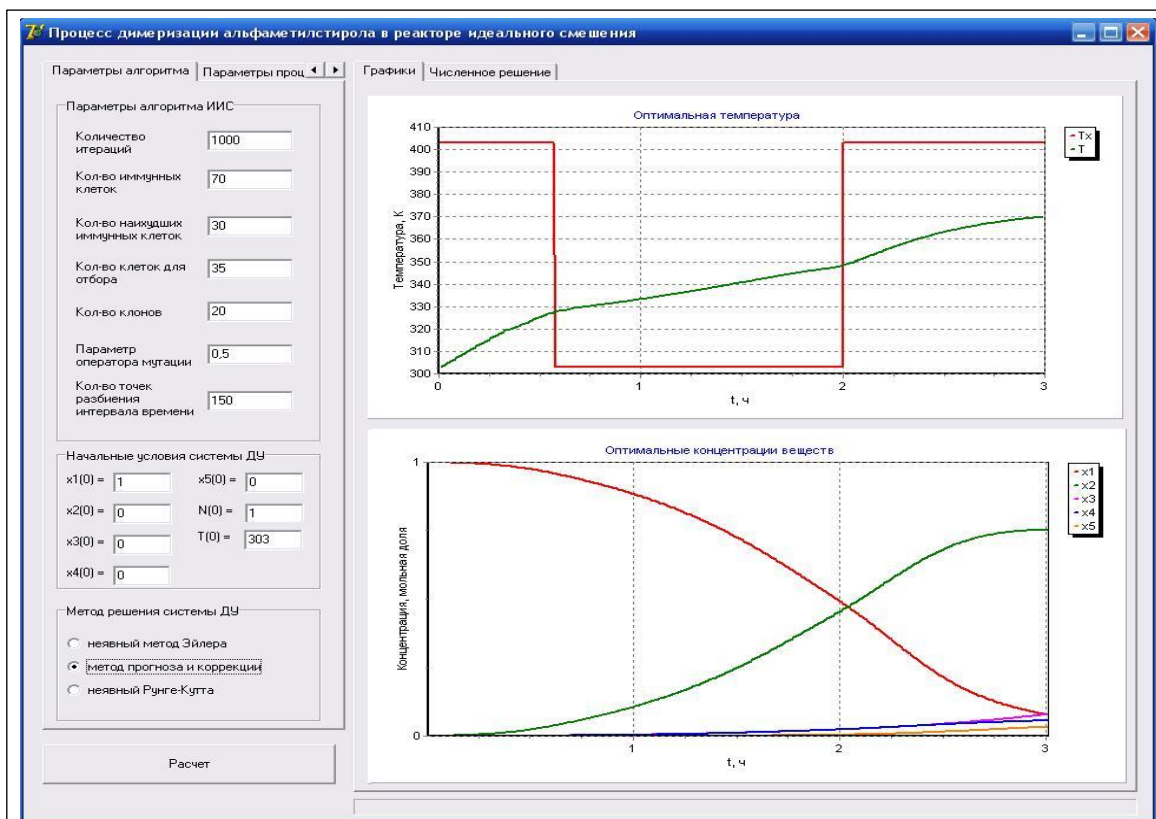


Рис. 2. Результаты решения задачи оптимального управления для процесса димеризации α -метилстирола

Fig. 2. The results of solving the optimal control problem for α -methylstyrene dimerization process

будут получены максимальный выход линейных димеров, равный 0,83 мольных долей, и минимальный выход циклических димеров и тримеров, равный 0,91 мольных долей.

Заключение

Таким образом, разработанная программа позволяет находить численное решение задачи поиска оптимального температурного режима для процесса димеризации α -метилстирола в реакторе идеального смешения. Математическая модель данного процесса является нелинейной и содержит ограничения на параметр управления – температуру хладагента. В основу численного расчета решения оптимизационной задачи положен алгоритм метода искус-

ственных иммунных систем, преимуществом которого являются относительно небольшие временные затраты на вычисления.

В приложении предусмотрена возможность гибкой настройки пользователем параметров алгоритма и каталитического процесса. В ходе работы программы критерий оптимальности задает пользователь, благодаря чему ее можно применять для различных постановок оптимизационных задач каталитического процесса. Решение задачи поиска оптимального температурного режима процесса димеризации α -метилстирола представляет собой набор оптимальных концентраций веществ и оптимальный температурный профиль, которые для удобства отображаются в численном и графическом видах.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FZWU-2020-0027).

Литература

1. Островский Г.М., Зиятдинов Н.Н., Емельянов И.И. Синтез оптимальных систем простых ректификационных колонн с рекуперацией тепла // Докл. Академии наук. 2015. Т. 461. № 2. С. 189–192. DOI: 10.7868/S0869565215080149.

2. Santos L., Villas-Boas F., Oliveira A.R.L., Perin C. Optimized choice of parameters in interior-point methods for linear programming. *Computational Optimization and Applications*, 2019, vol. 73, pp. 535–574. DOI: 10.1007/S10589-019-00079-9.
3. Biegler L.T. Integrated optimization strategies for dynamic process operations. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 6, pp. 910–927. DOI: 10.1134/S004057951706001X.
4. Astachova I.F., Zolotukhin A.E., Kurklinskaya E.Y., Belyaeva N.V. The application of artificial immune system to solve recognition problems. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1202, art. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1202/1/012003.
5. Wei Y., Wang J. An artificial immune system approach to business process mining. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 472–475, pp. 35–38. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.35.
6. Wang M., Feng S., He C., Li Z., Xue Y. An artificial immune system algorithm with social learning and its application in industrial PID controller design. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, vol. 2017, pp. 1–13. DOI: 10.1155/2017/3959474.
7. Lima F.P.A., Lopes M.L.M., Lotufo A.D.P., Minussi C.R. An artificial immune system with continuous-learning for voltage disturbance diagnosis in electrical distribution systems. *Expert Systems with Applications*, 2016, vol. 56, pp. 131–142. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.03.010.
8. Lima F.P.A., Lotufo A.D.P., Minussi C.R. Wavelet-artificial immune system algorithm applied to voltage disturbance diagnosis in electrical distribution systems. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2015, no. 9, pp. 1104–1111. DOI: 10.1049/IET-GTD.2014.1102.
9. Антипина Е.В., Мустафина С.А., Антипин А.Ф. Численный алгоритм идентификации кинетической модели химической реакции // *Вестн. технологич. ун-та*. 2019. Т. 22. № 9. С. 13–17.
10. Колоколов А.А., Леванова Т.В., Поздняков Ю.С. Алгоритмы искусственной иммунной системы для вариантной задачи размещения телекоммуникационных центров // *Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер. Математика*. 2013. Т. 6. № 1. С. 35–44.
11. Степашина Е.В., Байтимерова А.И., Мустафина С.А. Программный комплекс автоматизации процедуры уточнения механизма химической реакции на основе DRGEP-метода // *Башкирский химический журнал*. 2011. Т. 18. № 3. С. 112–115.
12. Степашина Е.В. Алгоритмы редукции кинетических схем сложных химических процессов: автореф. дис. Уфа: БашГУ, 2013. 22 с.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.137.106-112

Received 29.09.21, Revised 08.11.21
2022, vol. 35, no. 1, pp. 106–112

Software implementation of the algorithm for finding the optimal temperature condition of the catalytic process

E.V. Antipina¹, Ph.D. (Physics and Mathematics), Junior Researcher, stepashinaev@ya.ru
S.A. Mustafina², Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, mustafina_sa@mail.ru
A.F. Antipin¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, andrejantipin@ya.ru

¹ Sterlitamak Branch of the Bashkir State University, Sterlitamak, 453103, Russian Federation

² Bashkir State University, Ufa, 450076, Russian Federation

Abstract. The paper describes the software for solving problems of optimal control of the catalytic process in an ideal mixing reactor. The general form of the formulated optimal control problem is based on a mathematical model of the process in an ideal mixing reactor. The refrigerant temperature is considered a control parameter; its values are limited. In order to solve the problem numerically, the paper presents a step-by-step algorithm based on the evolutionary method of artificial immune systems. The method of artificial immune systems for solving optimal control problems makes it possible to obtain an approximate solution to the problem in a time that is acceptable from a practical point of view.

The formulated algorithm is a basis for the developed application for the catalytic reaction of α -methylstyrene dimerization in the presence of the NaHY zeolite catalyst, whose products (linear dimers) are widely used in industrial production. To calculate the process in an ideal mixing reactor, the program implements a number of numerical methods. The software tool allows the user to customize both the catalytic process parameters and the parameters of the algorithm of the artificial immune system method. The user sets the optimization criterion during the program operation, which makes it possible to use it for various formulations

of the tasks of the catalytic process of α -methylstyrene dimerization and to obtain a set of optimal concentrations of substances and optimal temperature conditions that correspond to the specified process indicators. The paper gives a solution to the problem of finding the optimal temperature condition for the considered catalytic process, the optimality criterion of which is the achievement of the maximum yield of linear dimers with a minimum yield of cyclic dimers and trimers.

Keywords: optimal temperature condition, artificial immune systems, linear dimers, ideal mixing reactor.

Acknowledgements. The reported study was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation according to the research project № FZWU-2020-0027.

References

1. Ostrovskiy G.M., Ziyatdinov N.N., Emelyanov I.I. Synthesis of optimal systems of simple distillation columns with heat recovery. *Proc. of the Academy of Sciences*, 2015, vol. 461, no. 2, pp. 189–192. DOI: 10.7868/S0869565215080149 (in Russ.).
2. Santos L., Villas-Boas F., Oliveira A.R.L., Perin C. Optimized choice of parameters in interior-point methods for linear programming. *Computational Optimization and Applications*, 2019, vol. 73, pp. 535–574. DOI: 10.1007/S10589-019-00079-9.
3. Biegler L.T. Integrated optimization strategies for dynamic process operations. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 6, pp. 910–927. DOI: 10.1134/S004057951706001X.
4. Astachova I.F., Zolotukhin A.E., Kurklinskaya E.Y., Belyaeva N.V. The application of artificial immune system to solve recognition problems. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1202, art. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1202/1/012003.
5. Wei Y., Wang J. An artificial immune system approach to business process mining. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 472–475, pp. 35–38. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.35.
6. Wang M., Feng S., He C., Li Z., Xue Y. An artificial immune system algorithm with social learning and its application in industrial PID controller design. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, vol. 2017, pp. 1–13. DOI: 10.1155/2017/3959474.
7. Lima F.P.A., Lopes M.L.M., Lotufo A.D.P., Minussi C.R. An artificial immune system with continuous-learning for voltage disturbance diagnosis in electrical distribution systems. *Expert Systems with Applications*, 2016, vol. 56, pp. 131–142. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.03.010.
8. Lima F.P.A., Lotufo A.D.P., Minussi C.R. Wavelet-artificial immune system algorithm applied to voltage disturbance diagnosis in electrical distribution systems. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2015, no. 9, pp. 1104–1111. DOI: 10.1049/IET-GTD.2014.1102.
9. Antipina E.V., Mustafina S.A., Antipin A.F. Numerical algorithm of identifying the kinetic model of a chemical reaction. *Bull. of the Technological University*, 2019, vol. 22, no. 9, pp. 13–17 (in Russ.).
10. Kolokolov A.A., Levanova T.V., Pozdnyakov Yu.S. Artificial immune system algorithms for the multivariant problem of the telecommunications centers location. *The Bull. of Irkutsk State University. Ser. Math.*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 35–44 (in Russ.).
11. Stepashina E.V., Baytimerova A.I., Mustafina S.A. The software package for the computer aided procedure of qualified mechanism of chemical reactions based on DRGEP-method. *Bashkir Chemical Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 112–115 (in Russ.).
12. Stepashina E.V. *Algorithms for Reducing Kinetic Schemes of Complex Chemical Processes*. Ph.D. Thesis. Ufa, 2013, 22 p. (in Russ.).

Для цитирования

Антипина Е.В., Мустафина С.А., Антипин А.Ф. Программная реализация алгоритма поиска оптимального температурного режима каталитического процесса // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 1. С. 106–112. DOI: 10.15827/0236-235X.137.106-112.

For citation

Antipina E.V., Mustafina S.A., Antipin A.F. Software implementation of the algorithm for finding the optimal temperature condition of the catalytic process. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 1, pp. 106–112 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.137.106-112.