

УДК 519.6:544.43

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.3.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА В ПРИСУТСТВИИ ДИНИТРИЛ АЗОБИСИЗОМАСЛЯНОЙ КИСЛОТЫ

© А. А. Корнилова^{1*}, Э. Р. Гиззатова¹, С. И. Мустафина¹,
Д. А. Корнилов¹, С. Л. Подвальный²

¹Уфимский университет науки и технологий
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

²Воронежский государственный технический университет
Россия, 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84.

*Email: a.a.sultanova@yandex.ru

В работе рассматривается модель процесса радикальной полимеризации метилметакрилата в присутствии инициатора динитрил азобисизомасляной кислоты. Дана кинетическая схема процесса, протекающая в пять элементарных стадий. Поставлена и решена обратная задача восстановления значений кинетических констант скоростей процесса. Показано, что учет гель-эффекта в расчетной зависимости по конверсионной кривой проводился согласно модернизированной дополненной модели Хьюи-Хамелека, а решение обратной задачи получено методом Монте-Карло. При этом в качестве основного критерия соответствия указана согласованность конверсионных кривых, получаемых расчетным и экспериментальным путем.

Ключевые слова: радикальная полимеризация, метилметакрилат, метод Монте-Карло, гель-эффект, конверсия.

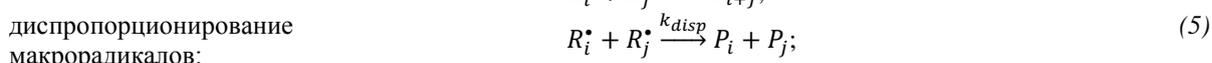
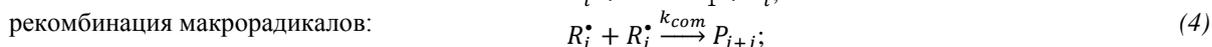
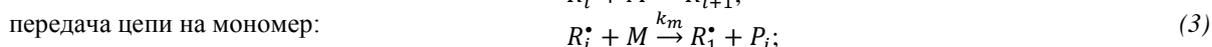
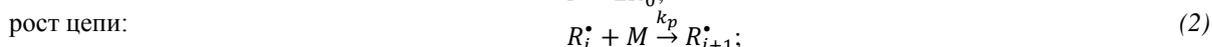
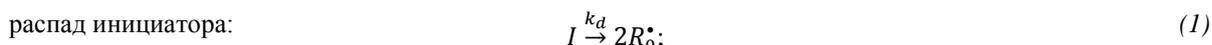
Введение

Создание и оптимизация любого химического продукта тесно связано с кинетическим моделированием. Именно оно позволяет выстраивать технологические цепочки схем процессов получения различных химических веществ, в т.ч. и полимерных материалов. Исследование кинетики полимеризационных процессов, проведенное начиная с середины XX в. и в последующее время [1–2] показало, что получение кинетических параметров процесса возможно как эмпирическими, так и теоретическими методами. Основной теоретического подхода является математическое моделирование. Он активно применяется при анализе влияния различных факторов на ход полимеризационных процессов. Главными достоинствами применения математического и программного аппаратов, дающих возможность проводить оценку поведения молекулярных характеристик и значений кинетических параметров, можно назвать дешевизну, безопасность, доступность многократного повторения эксперимента и наглядность полученных расчетных данных. Подобные методики теоретического исследования были апробированы на различных видах полимеризационных процессов, что доказало адекватность построенных математических моделей и расчетных данных реальному аналогу – натурному эксперименту.

Само производство полимерных материалов нашло повсеместное широкое применение благодаря уникальным свойствам получаемых продуктов, низкой стоимости и долговременной эксплуатации. К тому же сегодня активно ведутся исследования по созданию полимерных материалов, обладающих различными свойствами, такими как термоустойчивость, влагозащищенность, ударопрочность, что ведет к разработке и применению новых методов имитации процесса описывающих экспериментальные данные с минимальной погрешностью.

Математическая модель. Постановка кинетических задач

Исследования, проведенные для процесса радикальной полимеризации метилметакрилата (ММА), показали, что кинетическая схема содержит все основные элементарные стадии: иницирование, рост цепи, кинетический обрыв и материальный обрыв цепей. Рассматриваемый механизм полимеризации ММА на системе динитрил азобисизомасляной кислоты (ДАК) характеризуется стадией распада инициатора, сопровождающейся появлением активных центров полимеризации, стадией роста полимерной цепи; стадией кинетического обрыва цепи – передачи цепи на агент, двумя стадиями дезактивации центров полимеризации – стадиями бимолекулярного обрыва – рекомбинации и диспропорционирования полимерных цепей [3]:



где I , M , R^* , P – инициатор, мономер, макрорадикал и «мертвая» макромолекула; k – константы скорости соответствующих реакций; нижние индексы – степень полимеризации (длина макромолекулы).

Для приведенной кинетической схемы (1)–(5) прямая кинетическая задача будет заключаться в нахождении концентраций отдельных реагентов в течение времени процесса при известном наборе значений констант скоростей всех элементарных стадий. Решение этой задачи не вызывает каких бы то ни было сложностей, поскольку при соблюдении одинаковых условий процесса удается в явном виде получать все требуемые кинетические зависимости.

Иная ситуация наблюдается при постановке и поиске решения обратной кинетической задачи, связанной с восстановлением полного набора значений констант элементарных стадий процесса полимеризации. Здесь необходимо учитывать, что большая часть экспериментальных данных для полимеризационных процессов [1], являющихся отправной точкой при поиске решения, несут суммарный эффект [4], поэтому отделить влияние одного реагента от другого в этом случае не представляется возможным. Появляющуюся недоинформативность исходных данных также можно рассматривать как отдельный класс задач и определять границы применимости получаемых решений обратных задач для конкретных процессов.

В случае радикального механизма полимеризации обратная кинетическая задача сводится к нахождению полного набора значений констант скоростей элементарных стадий на основании ряда экспериментальных кривых. Одна из главных кинетических кривых в этом ряду – конверсионная кривая, она дает возможность оценить кинетическую активность системы и рассчитать расход мономера в зависимости от времени. Отличие конверсионной зависимости радикального механизма от других типов полимеризации – наличие гелевого эффекта [5], который внешне меняет вид кривой и влияет на скорость процесса в целом. Поэтому в работе предлагается решение обратной кинетической задачи вести, отталкиваясь от экспериментально полученной конверсионной кривой, для описания которой достаточно трех дифференциальных уравнений.

Выписывая скорости каждой реакции, можно перейти к математическому описанию процесса в виде системы из бесконечного числа обыкновенных дифференциальных уравнений. Каждое уравнение системы будет представлять собой закон изменения концентрации отдельного реагента в полимерной смеси.

Реакциям (1)–(5) соответствует следующая система дифференциальных уравнений [6]:

$$\frac{d[I]}{dt} = -k_d \cdot [I]; \quad (6)$$

$$\frac{d[M]}{dt} = -(k_p + k_m) \cdot [R^*] \cdot [M]; \quad (7)$$

$$\frac{d[R^*]}{dt} = 2 \cdot f \cdot k_d \cdot [I] - (k_{disp} + k_{com}) \cdot [R^*]^2. \quad (8)$$

$$\text{Начальные данные: } [I]_0 = I_0, [M]_0 = M_0, [R^*]_0 = 0 \text{ моль/л.} \quad (9)$$

В уравнении (8), f – эффективность реакции вещественного инициирования, обычно f принимает значения от 0.3 до 1 [7–8], иными словами $f \leq 1$. Уравнение (6) показывает динамику изменения концентрации инициатора, уравнение (7) – изменение концентрации мономера (что то же, как и конверсия мономера), уравнение (8) – динамику изменения суммарной концентрации активных центров (с произвольной длиной цепи).

Таким образом, имея систему дифференциальных уравнений (6)–(9) можно поставить прямую и обратную кинетические задачи, интерпретированные на математический язык: прямая задача – найти решение задачи Коши для (6)–(8) с начальными данными (9); обратная задача – определить набор значений кинетических констант, посредством которого наилучшим образом описывается конверсия мономера.

Численное решение обратной кинетической задачи

При проведении вычислительного эксперимента было сделано допущение, что все реакции протекают в кинетическом режиме [6] за исключением реакций бимолекулярного обрыва (4)–(5). В связи с этим указанные реакции моделировали в соответствии с подходом Хьюи-Хамелека [9], основанном на эмпирической зависимости константы скорости реакции обрыва цепи от конверсии мономера:

$$k_t = k_{disp} + k_{rec} = k_{t0} \cdot \exp(-A_1 U - A_2 U^2 - A_3 U^3), \quad (10)$$

где k_{t0} – константа скорости реакции обрыва цепи без учета гелевого эффекта, U – конверсия мономера, рассчитанная как

$$U = \frac{M(0) - M(t)}{M(0)}.$$

Обработка данных, проведенная в работе, показала, что в (10) можно ввести уточняющий коэффициент [10], увеличивающий коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными данными:

$$k_t = k_{t0} \cdot \exp(-A_0 - A_1 U - A_2 U^2 - A_3 U^3). \quad (11)$$

Кубическая зависимость показателя экспоненты (11) может быть представлена следующим образом: $k_t = k_{t0} \cdot A \cdot \exp(f(U(t)))$.

Здесь необходимо отметить, что при решении прямых и обратных кинетических задач для радикальных процессов полимеризации константы скоростей реакций бимолекулярного обрыва становятся функционально

зависимыми, то есть теряют свойства независимости от времени, при этом приобретая кинетически неоднородное распределение по конверсии мономера.

Таким образом, обратная кинетическая задача сводится к поиску функциональной зависимости $f(U(t))$, при которой будет достигаться минимальное отклонение расчетной и экспериментальной конверсионных зависимостей.

Полагая, что k_{disp} и k_{com} подчиняются (11), расчет конверсионной кривой проводился для системы (6)–(9). Система была решена инверсным методом Монте-Карло [11].

При моделировании процесса полимеризации были использованы значения параметров, приведенные в табл.

Путем решения обратной задачи для процесса полимеризации MMA в присутствии $[ДАК]_0 = 0.001$ моль/л, в температурном диапазоне от 50 до 70 °С, были определены следующие значения параметров равенства (11) и константа скорости реакции роста цепи: $A_0 = -0.035 \cdot T + 12.127$ ($R^2 = 0.993$); $A_1 = 0.025 \cdot T - 3.3621$ ($R^2 = 0.987$); $A_2 = 0.06 \cdot T - 13.722$ ($R^2 = 0.991$); $A_3 = -0.075 \cdot T + 21.753$ ($R^2 = 0.999$); $k_p = 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(2760/T)$, л/моль/сек ($R^2 = 0.999$).

На приведенном рис. 1 в двух координатных плоскостях показано поведение кривой по константе скорости от конверсии мономера. Верхняя координатная плоскость демонстрирует зависимость функции константы скорости при увеличенной конверсии. С точки зрения применимости математического аппарата, это поведение удастся оценить и при $U \geq 1$, однако если точка пересечения лежит в области превышающем единицы (такой набор не противоречит законам кинетики), то это означает, что константа скорости реакции обрыва цепи уменьшается с ростом температуры. Наборы, приводящие к такому результату, не рассматривались.

Таблица

Значения параметров при моделировании радикальной полимеризации MMA в массе

Параметры	Значения	Литература
$k_{t0} = k_{rec} + k_{disp}$	$9.8 \cdot 10^7 \cdot \exp(-353/T)$, л/(моль·с)	[12]
k_m	$2.79 \cdot 10^5 \cdot \exp(-5450/T)$, л/(моль·с)	[6]
$n = k_{rec}/k_{disp}$	$3.956 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-2065/T)$	[12]
k_{disp}	$k_t \cdot n / (n + 1)$, л/(моль·с)	[6]
k_{com}	$k_t / (n + 1)$, л/(моль·с)	
f (ДАК)	0.5	[6]
k_d (ДАК)	$1.053 \cdot 10^{15} \cdot \exp(-15440/T)$, с ⁻¹	

Анализ функции показал, что функция (11) имеет точку пересечения при различных температурах (рис. 1).

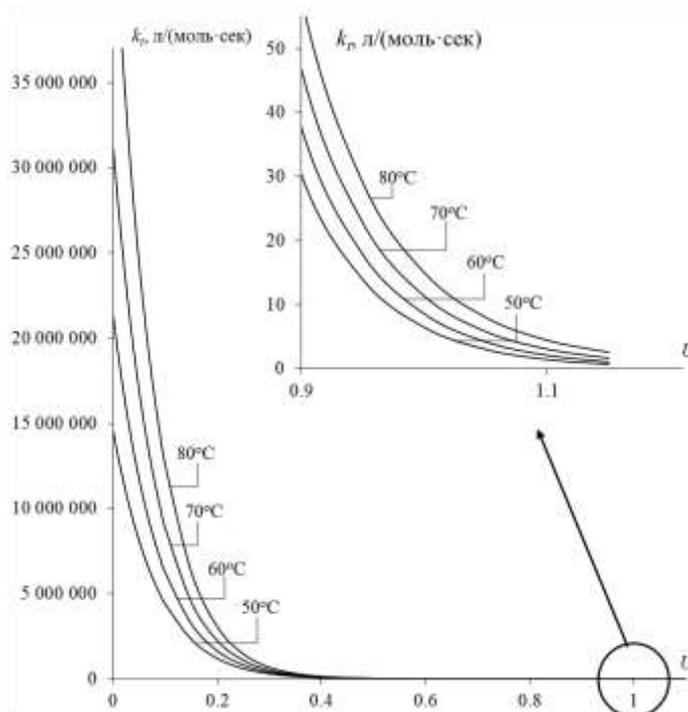


Рис. 1. Зависимость константы скорости реакции обрыва цепи (расчет по (11)) от конверсии при различных температурах полимеризации MMA.

Поведение получаемых значений константы скорости реакции роста цепи приведены на *рис. 2*. Видно, что расчетные линии хорошо соответствуют экспериментальным значениям, найденным в литературных источниках.

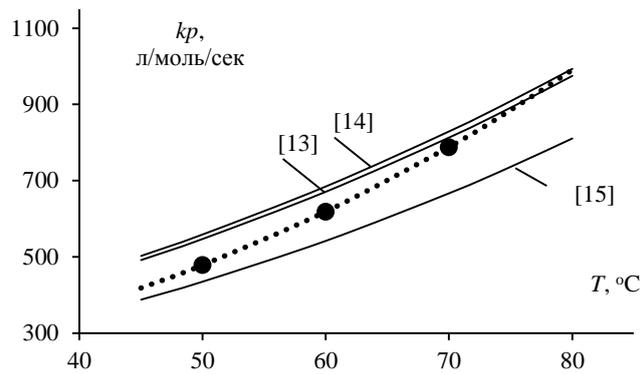


Рис. 2. Значение константы скорости реакции роста цепи.

Наряду с зависимостями кинетических констант от температуры были построены зависимости конверсии мономера от времени при различной температуре (*рис. 3–4*). В результате моделирования методом МК получены следующие совпадения расчетных и экспериментальных значений конверсионных зависимостей.

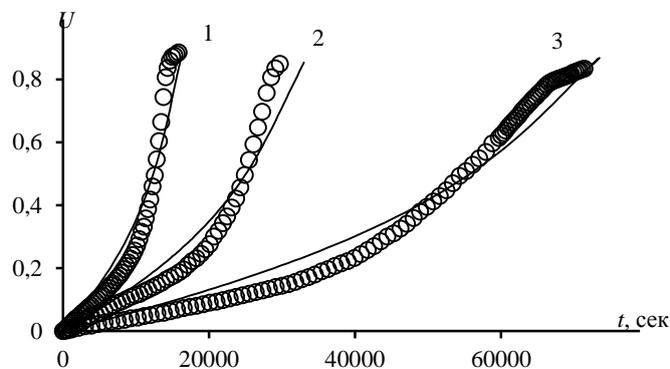


Рис. 3. Зависимость конверсии радикальной полимеризации MMA в присутствии $[DAG]_0 = 1$ ммоль/л: 1 – $T = 70$ °C; 2 – $T = 60$ °C; 3 – $T = 50$ °C; ○ – экспериментальные данные [2], линии – расчет методом МК.

Применив полученные значения параметров для описания процесса полимеризации MMA в присутствии вещественного инициатора ДАК в концентрации 3 ммоль/л, получены следующие совпадения экспериментальных и расчетных значений кинетических зависимостей (*рис. 4*).

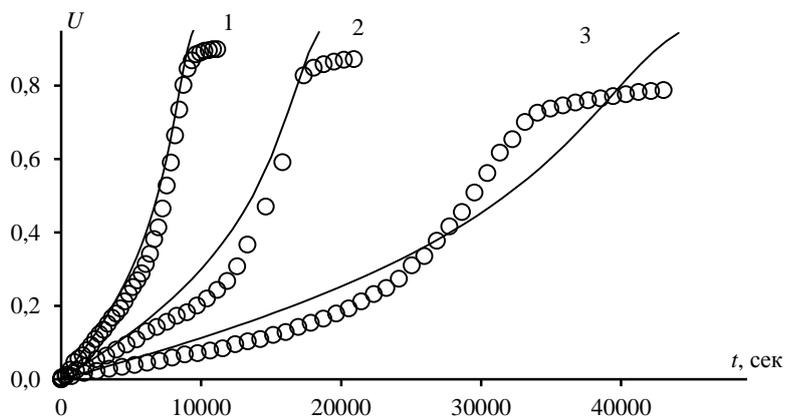


Рис. 4. Зависимость конверсии радикальной полимеризации MMA в присутствии $[DAG]_0 = 3$ ммоль/л: 1 – $T = 70$ °C; 2 – $T = 60$ °C; 3 – $T = 50$ °C; ○ – экспериментальные данные [2], линии – расчет методом МК.

По рис. 2–4 видно, что используемый подход [11] к решению системы дифференциальных уравнений (6)–(9) позволяет выписать конверсионные зависимости от времени и температуры. При этом видно, что чем выше температура процесса, тем лучше расчетная кривая согласуется с экспериментальной.

Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемый гель-эффект кривых по экспериментальным данным адекватно учитывается в математической модели, при этом меняется подход к пониманию констант скоростей реакций как к непостоянной величине, имеющей распределение по времени.

Заключение

Таким образом, в работе показано что для учета гель-эффекта при моделировании процесса полимеризации ММА в присутствии вещественного инициатора ДАК применим модернизированный подход Хьюи-Хамелека, позволяющий решать обратную кинетическую задачу поиска значений констант скоростей процесса. Для более корректного определения всех констант процесса необходимы данные по молекулярно-массовому распределению, при этом не исключается случай появления бимодального или полимодального распределений [16]. Для того, чтобы увидеть переход процесса из кинетической в диффузионную область, следует перестроить экспериментальные кривые в условном времени, тогда не только константа обрыва, но и константа роста могут быть определены в зависимости от конверсии. В этом случае такой уточненный кинетический модуль может послужить основой для перехода к системе непрерывных реакторов с учетом теплопередачи и гидродинамики. Однако описанные корректировки кинетических моделей здесь не были применены и являются направлениями дальнейших исследований. В настоящей работе обратная кинетическая задача была решена методом Монте-Карло, определены параметры модели Хьюи-Хамелека и константа скорости реакции роста цепей, полученные параметры достаточно хорошо согласуются с ранее опубликованными значениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sigaeva N. N., Kolesov S. V., Prokudina E. M., Nikonchuk E. Yu., Monakov Yu. B. Kinetic inhomogeneity in the radical polymerization of styrene in the presence of the benzoyl peroxide-metalocene system // *Doklady Chemistry*. 2002. Vol. 386. No. 4–6. P. 285–288.
2. Улитин Н. В., Терещенко К. А., Фризен А. К., Буракова А. О., Колесов С. В., Шиян Д. А., Темникова Н. Е. Кинетическая схема и кинетические константы процесса синтеза полиметилметакрилата, протекающего по радикально-координационному механизму // *Кинетика и катализ*. 2017. Т. 58. №2. С. 133–144.
3. Ulitin N. V., Tereshchenko K. A., Frizen A. K., Burakova A. O., Kolesov S. V., Shiyon D. A., Temnikova N. E. Kinetic scheme and rate constants for methyl methacrylate synthesis occurring via the radical-coordination mechanism // *Kinetics and Catalysis*. 2017. Vol. 58. No. 2. P. 122–132.
4. Nising P. High-temperature radical polymerization of methyl methacrylate in a continuous pilot scale process. Lausanne: EPFL, 2006. P. 286.
5. Гиззатова Э. Р., Шагиахметов А. Р., Хисаметдинова Г. К., Подвальный С. Л. Расчет функции невязки в базисном пространстве для поиска областей неопределенностей констант скоростей полимеризационного процесса // *Вестник Воронежского гос. тех. ун-та*. 2022. Т. 18. №4. С. 37–43. [Gizatova E. R., Shagiakhmetov A. R., Khisametdinova G. K., Podvalny S. L. Calculation of the residual function in the basis space to search for areas of uncertainty of the rate constants of the polymerization process // *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2022. Vol. 18. No. 4. P. 37–43. (In Russian)].
6. Колесов С. В., Сигаева Н. Н., Глухов Е. А., Насибуллин И. И., Фризен А. К. О двух направлениях роста цепей при полимеризации метилметакрилата и стирола в присутствии металлоценов // *Успехи современного естествознания*. 2016. №3. С. 33–38.
7. Kolesov S. V., Sigaeva N. N., Glukhov E. A., Nasibullin I. I., Frizen A. K. Two directions of chain propagation in methyl methacrylate and styrene polymerization in the presence of metallocenes // *Advances in Current Natural Science*. 2016. No. 3. P. 33–38. (In Russian).
8. Янборисов В. М., Султанова А. А., Колесов С. В. Модель вещество-инициированной полимеризации метилметакрилата в массе // *Системы управления и информационные технологии*. 2015. Vol. 62. №4. С. 24–30. [Yanborisov V. M., Sultanova A. A., Kolesov S. V. Model of substance-initiated polymerization of methyl methacrylate in bulk // *Control Systems and Information Technologies*. 2015. Vol. 62. No. 4. P. 24–30. (In Russian)].
9. O'Neil G. A., Wisnudel M. B., Torkelson J. M. An Evaluation of Free Volume Approaches to Describe the Gel Effect in Free Radical Polymerization // *Macromolecules*. 1998. Vol. 31. №14. P. 4537–4545.
10. Wu J.-Y., Shan G.-R. Kinetic and molecular weight control for methyl methacrylate semi-batch polymerization. I. Modelling // *Journal of Applied Polymer Science*. 2006. Vol. 100. No. 4. P. 2838–2846.
11. Hui A. W., Hamielec A. E. Thermal Polymerization of Styrene at High Conversions and Temperatures. An Experimental Study // *Journal of Applied Polymer Science*. 1972. Vol. 16. P. 749–769.
12. Гиззатова Э. Р., Спивак С. И., Колесов С. В. Математическое моделирование кинетической неоднородности констант скоростей бимолекулярного обрыва радикальной полимеризации // *Системы управления и информационные технологии*. 2015. №1–1(59). С. 126–129. [Gizatova E. R., Spivak S. I., Kolesov S. V. Mathematical modeling of kinetic heterogeneity of rate constants of bimolecular termination of radical polymerization // *Control Systems and Information Technologies*. 2015. No. 1–1(59). P. 126–129. (In Russian)].
13. Янборисов В. М., Султанова А. А., Колесов С. В. Инверсный алгоритм моделирования радикальной полимеризации методом Монте-Карло // *Математическое моделирование*. 2016. Т. 28. №4. С. 3–15. [Yanborisov V. M., Sultanova A. A., Kolesov S. V. The inverse algorithm of imitation of radical polymerization by the Monte Carlo method // *Mathematical modeling*. 2016. Vol. 28. No. 4. P. 3–15. (In Russian)].
14. Panke D. Modelling the free-radical polymerization of methyl methacrylate over the complete range of conversion // *Macromol. Theory Simul.* 1995. Vol. 4. P. 759–772.
15. Tefera N., Weickert G., Westertep K. R. Modeling of free radical polymerization up to high conversion. I. A method for the selection of models by simultaneous parameter estimation // *Journal of Applied Polymer*. 1997. Vol. 63. P. 1649–1661.
16. Mahabadi H. K., Odriscoll K. F. Absolute rate constants in free-radical polymerization. III. Determination of propagation and termination rate constants for styrene and methyl methacrylate // *Journal of Macromolecular Science: Part A – Chemistry*. 1977. Vol. 11. No. 5. P. 967–976.
17. Багдасарьян Х. С. Теория радикальной полимеризации. М.: АН СССР, 1958. 300 с. [Bagdasaryan Kh. S. Theory of radical polymerization // Moscow: USSR Academy of Sciences, 1958. 300 p. (In Russian)].
18. Подвальный С. Л., Лейкин М. А. Аддитивно-блочный подход к моделированию процесса синтеза полимеров // *Вестник ВГТУ. Сер. Вычислительные и информационно-телекоммуникационные системы*. 2001. №8.1. С. 59–63. [Podvalny S. L., Leikin M. A. Additive-block approach to modeling the polymer synthesis process // *Bulletin of Voronezh State University. Ser. Computing and Informational-telecommunication Systems*. 2001. No. 8.1. P. 59–63. (In Russian)].

Поступила в редакцию 13.05.2025 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.3.6

**MODELING OF METHYL METHACRYLATE POLYMERIZATION REACTIONS
IN THE PRESENCE OF AZOBISISOBUTYRONITRILE****© A. A. Kornilova^{1*}, E. R. Gizzatova¹, S. I. Mustafina¹,
D. A. Kornilov¹, S. L. Podvalny²**¹*Ufa University of Science and Technology
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia*²*Voronezh State Technical University
84 20-letiya Oktyabrya st., 394006 Voronezh, Russia***Email: a.a.sultanova@yandex.ru*

The paper considers the model of the process of radical polymerization of methyl methacrylate in the presence of azobisisobutyronitrile initiator. The kinetic scheme of the process, proceeding in five elementary stages, is given. The inverse problem of restoring the values of the kinetic constants of the process rates was posed and solved. It is shown that the gel effect was taken into account in the calculated dependence on the conversion curve according to the upgraded augmented Hui-Hamielec model, and the solution of the inverse problem was obtained by the Monte Carlo method. At the same time, the consistency of conversion curves obtained by calculation and experimentally is indicated as the main criterion of compliance.

Keywords: radical polymerization, methyl methacrylate, Monte Carlo method, gel effect, conversion.

*Received 13.05.2025.***Об авторах / About the authors****КОРНИЛОВА Алия Адиповна**

Уфимский университет науки и технологий, Россия
к. х. н., доцент кафедры математического и компьютерного
моделирования института информатики, математики и ро-
бототехники

A.A.Sultanova@yandex.ru

Web of Science ResearcherID: KCY-7277-2024

ГИЗЗАТОВА Эльвира Раисовна

Уфимский университет науки и технологий, Россия
д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического и
компьютерного моделирования института информатики,
математики и робототехники

makella@rambler.ru

Web of Science Researcher ID: E-4343-2014

МУСТАФИНА Софья Ильшатовна

Уфимский университет науки и технологий, Россия
ст. преподаватель кафедры математического и компьютер-
ного моделирования института информатики, математики
и робототехники

sofiamustafina@mail.ru

КОРНИЛОВ Дмитрий Анатольевич

Уфимский университет науки и технологий, Россия
к. х. н., руководитель лаборатории дизайна новых функци-
ональных материалов для промышленности, сельского хо-
зяйства и медицины института химии и защиты в чрезвы-
чайных ситуациях

Dima_himik2@mail.ru

Web of Science Researcher ID: K-9112-2013

ПОДВАЛЬНЫЙ Семен Леонидович

Воронежский государственный технический университет,
Россия

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизи-
рованных и вычислительных систем

spodvalny@yandex.ru

KORNILOVA Aliya Adipovna

Ufa University of Science and Technology
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
of the Department of Mathematical and Computer Modeling
of the Institute of Informatics, Mathematics and Robotics

A.A.Sultanova@yandex.ru

ORCID: 0009-0004-7858-5720

Web of Science ResearcherID: KCY-7277-2024

Scopus Author ID 58499653600

GIZZATOVA Elvira Raisovna

Ufa University of Science and Technology, Russia
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
of the Department of Mathematical and Computer Modeling
of the Institute of Informatics, Mathematics and Robotics

makella@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-5726-4328

Web of Science Researcher ID: E-4343-2014

Scopus Author ID: 57207189986

MUSTAFINA Sofya Il'shatovna

Ufa University of Science and Technology, Russia
Senior Lecturer of the Department of Mathematical and Com-
puter Modeling, Institute of Informatics, Mathematics and Robotics

sofiamustafina@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8036-3001

Scopus Author ID: 57204930367

KORNILOV Dmitry Anatolievich

Ufa University of Science and Technology, Russia
Candidate of Chemical Sciences, Head of the Laboratory
for Design of New Functional Materials for Industry, Agricul-
ture and Medicine of the Institute of Chemistry and Protection
in Emergency Situations

Dima_himik2@mail.ru

ORCID: 0000-0002-6696-5820

Web of Science Researcher ID: K-9112-2013

Scopus Author ID: 6602496739

PODVALNY Semyon Leonidovich

Voronezh State Technical University, Russia
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor
of the Department of Automated and Computing Systems

spodvalny@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1260-4883

Web of Science Researcher ID: GWQ-8966-2022

Scopus Author ID: 6504328279