

Кинетические аспекты бромирования пластификатора фталатного типа

Раиса Н. Плотникова¹ yy@vsuet.ru  0000-0001-9559-4443¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Рассмотрены основные характеристики сложной системы непредельный пластификатор-бром с использованием основных «рабочих компонентов» – изомеров 2-этилгексил-2-этилгексенфталата. Принято во внимание, что сложное фторное пластификатор фталатного типа является полярным соединением с дипольным моментом на уровне диоктилфталата, входящего в его состав. Показано, что в процессе бромирования молекулярный бром вступает в физическое взаимодействие со всеми компонентами пластификатора. Дозированное введение брома в систему при высоких скоростях перемешивания приводит к образованию гомогенной термодинамически устойчивой системы, так как параметры растворимости компонентов практически одинаковы. С использованием модельной смеси бром-диоктилфталат-дибутилфталат показано, что смешение брома с пластификаторами в любых исследованных соотношениях не приводит к появлению границы «бром в пластификаторе» или «пластификатор в бrome». Тем самым установлена неограниченная растворимость брома в пластификаторе при условиях его бромирования. С использованием метода УФ-спектроскопии на модельных смесях уксусная кислота-бром-вода; уксусная кислота-бром-гексан доказано, что в реальной системе непредельный пластификатор-бром бромирование наиболее вероятно осуществляется только молекулярным bromom без образования димеров брома. Показан механизм бромирования непредельных фталатов, входящих в состав пластификатора. Предложена система кинетических уравнений в безразмерных переменных. Выявлено, что характер теоретических кривых существенно зависит от скорости введения брома при неизменном механизме реакции. Отмечено изменение лимитирующих стадий процесса бромирования в зависимости от скорости введения брома в систему.

Ключевые слова: кинетика бромирования, фталатные пластификаторы, УФ-спектроскопия, молекулярный бром, кинетическая модель

Kinetic aspects of bromination of a phthalate-type plasticizer

Raisa N. Plotnikova¹ yy@vsuet.ru  0000-0001-9559-4443¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The main characteristics of a complex system of unsaturated plasticizer-bromine using the main "working components" - isomers of 2-ethylhexyl-2-ethylhexene phthalate are considered. It is taken into account that the phthalate-type ester plasticizer is a polar compound with a dipole moment at the level of dioctyl phthalate included in its composition. It has been shown that in the process of bromination, molecular bromine enters into physical interaction with all components of the plasticizer. Dosed introduction of bromine into the system at high stirring speeds leads to the formation of a homogeneous thermodynamically stable system, since the solubility parameters of the components are practically the same. Using a model mixture of bromine-dioctyl phthalate-dibutyl phthalate, it was shown that mixing bromine with plasticizers in any investigated ratios does not lead to the appearance of the boundary "bromine in a plasticizer" or "plasticizer in bromine". This established the unlimited solubility of bromine in the plasticizer under the conditions of its bromination. Using the method of UV spectroscopy on model mixtures of acetic acid-bromine-water; acetic acid-bromine-hexane, it was proved that in a real system, unsaturated plasticizer-bromine, bromination is most likely carried out only with molecular bromine without the formation of bromine dimers. The mechanism of bromination of unsaturated phthalates included in the plasticizer is shown. A system of kinetic equations in dimensionless variables is proposed. It was found that the nature of the theoretical curves significantly depends on the rate of introduction of bromine with a constant reaction mechanism. A change in the limiting stages of the bromination process was noted depending on the rate of bromine introduction into the system.

Keywords: bromination kinetics, phthalate plasticizers, UV spectroscopy, molecular bromine, kinetic model

Введение

Исследование скорости реакций в зависимости от различных факторов представляет собой не только теоретический, но и практический интерес. От кинетических особенностей зависит как производительность применяемой аппаратуры, обеспечивающий необходимое количество продукции, так и характеристики данного оборудования. Подобное исследование позволяет выявить методы подавления нежелательных процессов и интенсификации целевых реакций [1–5].

Для построения кинетической модели необходимо знать характеристики реакционной

среды, установить механизм протекания процесса, наличие промежуточных продуктов и термодинамику процесса. Для многокомпонентных систем, созданных на основе отходов производства, определение подобных характеристик затруднено.

Исследуемый объект – сложная многокомпонентная система, предоставленная непредельным пластификатором, при кинетическом исследовании, порождает большие трудности для химического и математического описания [6]. Поэтому сложная система в рассматриваемом случае [7] смоделирована «рабочими компонентами» – изомерами 2-этилгексил-2-этилгексен-

Для цитирования

Плотникова Р.Н. Кинетические аспекты бромирования пластификатора фталатного типа // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 1. С. 226–231. doi:10.20914/2310-1202-2022-1-226-231

For citation

Plotnikova R.N. Kinetic aspects of bromination of a phthalate-type plasticizer. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 1. pp. 226–231. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-1-226-231

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

фталата. Ди-2-этилгексилфталат, дибутилфталат и примеси являются растворителем.

Методы

Сложные эфиры карбоновых кислот являются полярными соединениями. Дипольный момент ди-н-бутил-о-фталата, входящего в состав пластификатора, равен 2,82 D; диэлектрическая проницаемость самого пластификатора находится на уровне диэлектрической проницаемости уксусной кислоты [8], дипольный момент которой составляет 1,74 D. Молекулярный бром, обладая одной из самых высоких величин поляризуемости $\alpha = 6,43 \times 10^{-3} \text{ м}^3$ на одну молекулу, вступает в физическое взаимодействие со всеми компонентами пластификатора, что ведет к образованию гомогенной термодинамически устойчивой системы, так как параметры растворимости компонентов практически одинаковы [7].

С целью определения растворимости брома в пластификаторе исследовали модельную смесь бром-диоктилфталат-дибутилфталат (Br_2 -ДОФ-ДБФ), поскольку бром вступает в реакцию с непредельными эфирами изучаемого пластификатора в исследованном интервале температур от 273 до 333 K.

Указанная модельная смесь выбрана в соответствии с литературными данными, свидетельствующими, что ДОФ и ДБФ при соблюдении обоснованных в [8, 9] оптимальных условиях реакции бромирования не вступают во взаимодействие с бромом.

В ходе исследования указанной модельной смеси приливали к смеси эфиров ДОФ и ДБФ, взятых в соотношении 9:1, молекулярный бром в количестве 1÷200 мас. % на 10 мас. % эфиров, и определяли наличие границы пластификатор-бром. Проведенное исследование позволило сделать вывод о неограниченной растворимости брома в пластификаторе при условиях его бромирования, поскольку смешение брома с пластификаторами в любых указанных соотношениях не приводило к появлению границы «бром в пластификаторе» или «пластификатор в бrome».

Результаты и обсуждение

Попытка построить диаграммы, характеризующие зависимости температуры кипения раствора от состава, не дала желаемого результата, поскольку было отмечено повышение реакционной способности о-фталатов с образованием бромированных в ядро или бромзамещенных в алифатическом радикале фталатов. Кроме того известно, что температура кипения брома 332,2 K, в то время как ДБФ кипит при 613 K, а ДОФ – при 404 K (при 666,5 кПа). Давление паров ДБФ при 423 K составляет 6,7–21,0 Па.

Следовательно бром, не вступивший в реакцию, удаляется из жидкой фазы раньше, чем она закипает. Удельная молярная теплота испарения для брома $\Delta H_{\text{исп}} = 29,5 \text{ кДж/моль}$, для ДБФ $\Delta H_{\text{исп}} = 100 \text{ кДж/моль}$.

При растворении 28 мл брома в 100 мл ДОФ в течении 6 мин при скорости подачи брома 4,7 моль/мин наблюдали повышение температуры смеси с 296,9 до 303,2 K. То есть температура поднялась на 5,3 градуса, что свидетельствует об отрицательном изменении энтальпии при смешении с образованием термодинамически устойчивой гомогенной системы [10].

Большинство схем бромирования непредельных органических соединений, предлагаемых в литературе, предполагают образование активированного комплекса, представленного в виде циклического катиона бромония.

Переходное состояние в электрофильных реакциях присоединения брома, характеризующее образованием катиона бромония, включает две стадии: стадию образования циклического переходного комплекса бром-олефин, считающуюся лимитирующей, и стадию, завершающую присоединение брома [11, 12].

Ряд авторов предполагает, что при бромировании непредельных органических соединений атака олефина на первой стадии производится димерными молекулами брома [13, 14]. Образование последних требует специального доказательства. С этой целью проведены исследования модельных смесей уксусная кислота-бром-вода; уксусная кислота-бром-гексан методом ультрафиолетовой спектроскопии на спектрометре SPECORD-UVVIS в области $30000\text{--}12800 \text{ см}^{-1}$ с лампой накаливания. Спектрограммы приведены на рисунках 1, 2.

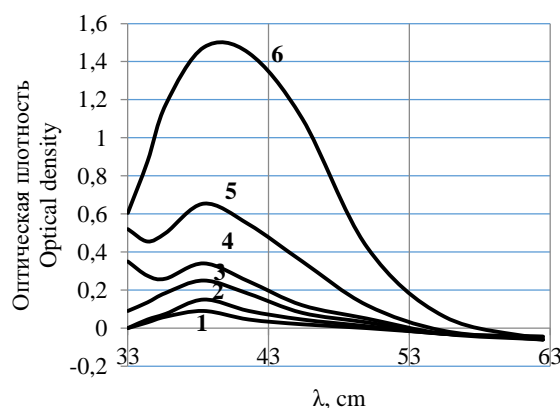


Рисунок 1. УК-спектр модельной смеси бром-уксусная кислота-вода с концентрацией брома в уксусной кислоте, моль/л: 1 – 0,039; 2 – 0,39; 3 – 0,68; 4 – 0,97; 5 – 1,4; 6 – 3,9

Figure 1. UK-spectrum of a model mixture of bromine-acetic acid-water with bromine concentration in acetic acid, mol / l: 1 – 0,039; 2 – 0,39; 3 – 0,68; 4 – 0,97; 5 – 1,4; 6 – 3,9

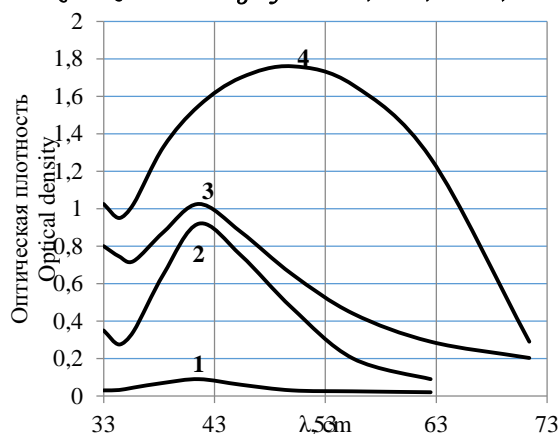


Рисунок 2. УК-спектр модельной смеси бром-уксусная кислота-гексан с концентрацией брома в уксусной кислоте, моль/л: 1 – 0,036; 2 – 1,4; 3 – 1,7; 4 – 4,0

Figure 2. UK-spectrum of a model mixture of bromine-acetic acid-hexane with bromine concentration in acetic acid, mol/l: 1 – 0,036; 2 – 1,4; 3 – 1,7; 4 – 4,0

Указанные модельные смеси выбраны с целью выявления полос поглощения за счет образования димеров брома. Известно, что при образовании ассоциатов наряду с полосой поглощения молекулярного соединения появляются полосы поглощения ассоциатов. Увеличение концентрации ассоциатов приводит к усилению полосы их поглощения за счет ослабления полосы поглощения, характеризующей молекулярное состояние [15–19]. Повышение температуры и введение полярных растворителей приводит также к ослаблению или полному исчезновению полосы поглощения ассоциатов и усилению полосы поглощения, характерной для молекулярного состояния.

Как следует из приведенной структуры модельных систем, уксусная кислота использована взамен непредельного пластификатора. Подобная замена была произведена на основании выводов, сделанных [8] относительно близости характеристик диэлектрической проницаемости непредельного пластификатора и уксусной кислоты.

Полярный растворитель – вода в первом случае использован с целью разрушения возможно присутствующих в системе димеров брома и получения чистой полосы поглощения молекулярного брома, которая могла бы быть использована для сравнения со спектром поглощения в неполярном растворителе. В данном случае высокая полярность воды и низкая концентрация брома исключает образование в этой системе ассоциатов брома.

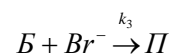
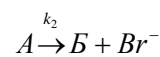
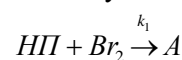
Выбор системы уксусная кислота-бром-гексан обоснован тем, что гексан является неполярным растворителем, и поэтому никакого дополнительного воздействия на модельную систему при соотношении уксусная кислота –

ром 5:1 не оказывает. Указанное соотношение компонентов имеет место в реальной системе непредельный пластификатор-бром.

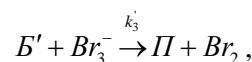
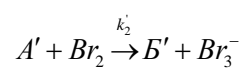
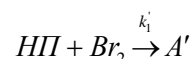
Спектры системы, снятой в неполярном гексане, могли бы отразить полосу поглощения, свидетельствующую об образовании ассоциированных молекул брома. Однако, как видно из рисунков 1–2, спектры модельных систем имеют только одну полосу поглощения, соответствующую молекулярному бром при любых приведенных концентрациях брома в модельной смеси.

Таким образом в реальной системе непредельный пластификатор-бром бромирование наиболее вероятно осуществляется только молекулярным бромом.

В таком случае механизм бромирования возможно представить следующим образом [20, 21]:



или



где НП – непредельный пластификатор; П – продукт реакции; А и А', Б и Б' – промежуточные комплексы.

Классическая модель бромирования одновременно двух непредельных компонентов, входящих в состав пластификатора, с непрерывной подачей брома в безразмерных переменных приобретает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_{\text{НП}_1}}{d\tau} = -k_1 \frac{X_{\text{НП}_1} X_{\text{Br}_2}}{\alpha \delta} \\ \frac{dX_{\text{НП}_2}}{d\tau} = -k_2 \frac{X_{\text{НП}_2} X_{\text{Br}_2}}{\alpha \delta} \\ \frac{dX_{\text{Br}_2}}{d\tau} = \frac{\alpha U_0}{\delta} - k_1 \frac{X_{\text{НП}_1} X_{\text{Br}_2}}{\alpha \delta} - k_2 \frac{X_{\text{НП}_2} X_{\text{Br}_2}}{\alpha \delta} \end{array} \right.$$

$$\text{Если принять } \alpha = (C_{\text{НП}_{01}} + C_{\text{НП}_{02}})^{-1} = C_{\text{НП}_0}^{-1},$$

откуда $\delta = k_1/\alpha = k_1 C_{\text{НП}_0}$, тогда

$$X_{\text{НП}_1} = \frac{C_{\text{НП}_1}}{C_{\text{НП}_0}}; \quad X_{\text{НП}_2} = \frac{C_{\text{НП}_2}}{C_{\text{НП}_0}};$$

$$X_{\text{Br}_2} = \frac{C_{\text{Br}_2}}{C_{\text{НП}_0}}; \quad \tau = k_1 C_{\text{НП}_0} t.$$

Окончательно для кинетической модели имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_{\text{НП}_1}}{d\tau} = -X_{\text{НП}_1} X_{\text{Br}_2} \\ \frac{dX_{\text{НП}_2}}{d\tau} = -\gamma X_{\text{НП}_2} X_{\text{Br}_2} \\ \frac{dX_{\text{Br}_2}}{d\tau} = \beta - X_{\text{НП}_1} X_{\text{Br}_2} - \gamma X_{\text{НП}_2} X_{\text{Br}_2} \end{array} \right\},$$

где $\beta = U_0 C_{\text{НП}_0}^2 / k_1$; $\gamma = k_1 / k_2$.

Решение системы в графическом виде для значения $\gamma = 0,25$ представлены на рисунке 3.

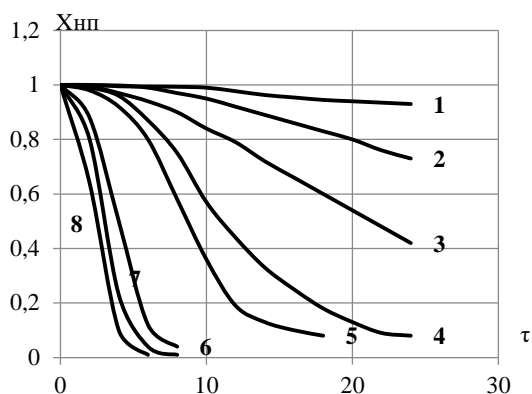


Рисунок 3. Зависимость $X_{\text{НП}}$ от τ при $\gamma = 0,25$ для различных значений β

Figure 3. Dependence of X_{NP} on τ at $\gamma = 0.25$ for different values of β

При анализе полученных графических зависимостей выявлено, что характер теоретических кривых существенно зависит от значений коэффициента β при неизменном механизме

реакции. В области больших значений β кинетические кривые относительно оси ординат имеют зеркально S-образный вид (кривые 5–7). С уменьшением значений β S-образность постепенно исчезает (кривые 2–4). И, наконец, зависимость $X_{\text{НП}} = X_{\text{НП}}(\tau)$ становится практически линейной (прямая 1).

Основные причины отмеченного поведения кинетических зависимостей состоят в том, что изменяются лимитирующие стадии процесса бромирования. При больших β скорость подачи брома превосходит кинетическую константу, и, следовательно, основные сопротивления сосредотачиваются в кинетической области. При малых β процесс лимитируется скоростью подачи брома. Естественно, что при промежуточных значениях β наблюдается смешанная область.

Заключение

Бромирование непереломного пластификатора из отходов производства, содержащего в своем составе изомеры 2-этилгексил-2-этилгексенфталата, идет с образованием гомогенной термодинамически устойчивой системы молекулярным бромом без образования его димеров.

Построенная кинетическая модель бромирования непереломного фталатного пластификатора в безразмерных переменных позволила определить, что основным лимитирующим фактором процесса является скорость введения брома в систему. Получены параметры безразмерной переменной, определяющей переход процесса бромирования из кинетической в диффузионную область.

Литература

- 1 Федотов В.Х., Кольцов Н.И., Косьянов П.М. Влияние автокаталитических стадий на динамику сопряженных химических реакций // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2020. Т. 63. №. 2. С. 14–20. doi: 10.6060/ivkkt.20206302.6053
- 2 Fedotov V. Kh., Kol'tsov N.I. Kinetics of redused models of catalytic reactions // Rus. Journ. Phys. Chem. B. 2015. V. 10. № 6. P. 875–883.
- 3 Федотов В.Х., Кольцов Н.И. Кинетические квазиинварианты химических реакций в закрытых системах // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2019. V. 62. №. 6. P. 47–52.
- 4 Кольцов Н.И. Квазиинварианты химических реакций в распределенных системах с диффузией // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2021. V. 64. №. 1.
- 5 Федотов В. Х., Кольцов Н. И. Кинетические квазиинварианты химических реакций в закрытых системах // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2019. V. 62. №. 6. P. 47–52.
- 6 Lee B., Yoo J., Kang K. Predicting the chemical reactivity of organic materials using a machine-learning approach // Chemical science. 2020. V. 11. №. 30. P. 7813–7822. doi: 10.1039/d0sc01328e
- 7 Плотникова Р.Н. Исследование свойств бромированной фталатсодержащей системы и определение областей ее применения // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 290–296. doi: 10.20914/2310–1202–2021–1–290–296
- 8 Плотникова Р.Н., Корчагин В.И., Попова Л.В. Бромирование фталатсодержащих систем, полученных из отходов производства // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. №. 11. С. 112–116. doi: 10.6060/ivkkt.20216411.6429
- 9 Плотникова Р.Н. Исследование процесса нейтрализации бромсодержащих систем фталатного типа // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 4. С. 236–241. doi: 10.20914/2310–1202–2020–4–236–241
- 10 Бондарчук И.С., Бондарчук С.С. Кинетика гомогенных реакций. 2019.

- 11 Kol'tsov N.I. Chaotic oscillation in for-step chemical reaction // *Rus. Journ. Phys. Chem. B*. 2017. V. 11. № 6. P. 1047–1048.
- 12 Кольцов Н.И., Федотов В.Х. Хаотические колебания в простой гетерогенной каталитической реакции // *Бутлеровские сообщения*. 2017. Т. 50. №. 6. С. 30–33.
- 13 Быков В.И. Моделирование критических явлений в химической кинетике. URSS, 2006.
- 14 Bykov V.I., Tsybenova S.B., Yablonsky G.S. *Chemical complexity via simple models*. Berlin. New York: Germany. De Gruyter. 2018. 364 p.
- 15 Ouhaddouch H., Cheikh A., Idrissi M.O.B., Draoui M. et al FT-IR spectroscopy applied for identification of a mineral drug substance in drug products: Application to bentonite // *Journal of Spectroscopy*. 2019. doi: 10.1155/2019/2960845
- 16 Segneanu A.E., Gozescu I., Dabici A., Sfirloaga P. et al. *Organic compounds FT-IR spectroscopy*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. V. 145. doi: 10.5772/50183
- 17 Казицина Л.А., Куплетская Н.Б. *Применение УФ-, ИК-, ЯМР-спектроскопии в органической химии*. М.: Книга по Требованию, 2012. 262 с.
- 18 Хрипач Н., Барановский А. *Применение спектроскопии в органической химии* // *Наука и инновации*. 2013. № 3 (121). С. 6–9.
- 19 Boughendjioua H., Boughendjioua Z. Fourier transformed infrared spectroscopy analysis of constituents of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil from Algeria // *Inorganic materials*. 2017. V. 14. P. 15. doi: 10.11648/j.ajop.20170503.12
- 20 Плотникова Р.Н. Моделирование процесса бромирования ненасыщенных фталатсодержащих систем // *Моделирование энергоинформационных процессов: сборник статей IX Национальной научно – практической конференции с международным участием*. Воронеж: 2021. С. 165–169.
- 21 Tsai Y. T., Lin H., Lee M. J. Kinetics of heterogeneous esterification of glutaric acid with methanol over Amberlyst 35 // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2011. V. 42. №. 2. P. 271–277. doi: 10.1016/j.jtice.2010.07.010

References


- 1 Fedotov V.Kh., Koltsov N.I., Kosyanov P.M. Influence of autocatalytic stages on the dynamics of overestimated risks. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2020. vol. 63. no. 2. pp. 14–20. doi: 10.6060/ivkkt.20206302.6053 (in Russian).
- 2 Fedotov V. Kh., Kol'tsov N.I. Kinetics of reduced models of catalytic reactions. *Rus. Journ. Phys. Chem. B*. 2015. vol. 10. no. 6. pp. 875–883.
- 3 Fedotov V.Kh., Koltsov N.I. Kinetic quasi-invariants of chemical reactions in closed systems. *Izvestia of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2019. vol. 62. no. 6. pp. 47–52. (in Russian).
- 4 Koltsov N.I. Quasi-invariants of chemical reactions in distributed systems with diffusion. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2021. vol. 64. no. 1. (in Russian).
- 5 Fedotov V. Kh., Koltsov N. I. Kinetic quasi-invariants of chemical reactions in closed systems. *Chemistry and chemical technology*. 2019. vol. 62. no. 6. pp. 47–52. (in Russian).
- 6 Lee B., Yoo J., Kang K. Predicting the chemical reactivity of organic materials using a machine-learning approach. *Chemical science*. 2020. vol. 11. no. 30. pp. 7813–7822. doi: 10.1039/d0sc01328e
- 7 Plotnikova R.N. Investigation of the properties of a brominated phthalate-containing system and the determination of its applications. *Proceedings of VSUET*. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 290–296. doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-290-296 (in Russian).
- 8 Plotnikova R.N., Korchagin V.I., Popova L.V. Bromination of phthalate-containing systems obtained from production wastes. *Izvestia of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 2021. vol. 64. no. 11. pp. 112–116. doi:10.6060/ivkkt.20216411.6429 (in Russian).
- 9 Plotnikova R.N. Investigation of the process of neutralization of bromine-containing systems of the phthalate type. *Proceedings of VSUET*. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 236–241. doi: 10.20914/2310-1202-2020-4-236-241 (in Russian).
- 10 Bondarchuk I.S., Bondarchuk S.S. Kinetics of homogeneous reactions. 2019. (in Russian).
- 11 Kol'tsov N.I. Chaotic oscillation in for-step chemical reaction. *Rus. Journ. Phys. Chem. B*. 2017. vol. 11. no. 6. pp. 1047–1048.
- 12 Koltsov N.I., Fedotov V.Kh. Chaotic oscillations in a simple heterogeneous catalytic reaction. *Butlerov Communications*. 2017. vol. 50. no. 6. pp. 30–33. (in Russian).
- 13 Bykov V.I. Modeling of critical phenomena in chemical kinetics. URSS, 2006. (in Russian).
- 14 Bykov V.I., Tsybenova S.B., Yablonsky G.S. *Chemical complexity via simple models*. Berlin. New York, Germany. De Gruyter. 2018. 364 p.
- 15 Ouhaddouch H., Cheikh A., Idrissi M.O.B., Draoui M. et al FT-IR spectroscopy applied for identification of a mineral drug substance in drug products: Application to bentonite. *Journal of Spectroscopy*. 2019. doi: 10.1155/2019/2960845
- 16 Segneanu A.E., Gozescu I., Dabici A., Sfirloaga P. et al. *Organic compounds FT-IR spectroscopy*. Rijeka, Croatia, InTech, 2012. vol. 145. doi: 10.5772/50183
- 17 Kazitsina L.A., Kupletskaya N.B. *Application of UV, IR, NMR spectroscopy in organic chemistry*. Moscow, Book on Demand, 2012. 262 p. (in Russian).
- 18 Khripach N., Baranovsky A. *Application of spectroscopy in organic chemistry*. Science and innovations. 2013. no. 3 (121). pp. 6–9. (in Russian).
- 19 Boughendjioua H., Boughendjioua Z. Fourier transformed infrared spectroscopy analysis of constituents of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil from Algeria. *Inorganic materials*. 2017. vol. 14. pp. 15. doi: 10.11648/j.ajop.20170503.12

20 Plotnikova R.N. Modeling of the process of bromination of unsaturated phthalate-containing systems. Modeling of energy-information processes: collection of articles of the IX National Scientific and Practical Conference with international participation. Voronezh, 2021. pp. 165–169. (in Russian).

21 Tsai Y. T., Lin H., Lee M. J. Kinetics of heterogeneous esterification of glutaric acid with methanol over Amberlyst 35. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2011. vol. 42. no. 2. pp. 271-277. doi: 10.1016/j.jtice.2010.07.010

Сведения об авторах

Раиса Н. Плотникова к.х.н., доцент, кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yy@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9559-4443>

Вклад авторов

Раиса Н. Плотникова написала рукопись, корректировала её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Raisa N. Plotnikova Cand. Sci. (Chem.), associate professor, industrial ecology, equipment for chemical and petrochemical plants department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yy@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9559-4443>

Contribution

Raisa N. Plotnikova wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила 20/12/2021	После редакции 24/01/2022	Принята в печать 15/02/2022
Received 20/12/2021	Accepted in revised 24/01/2022	Accepted 15/02/2022