

УДК 662.611

КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

© 2024 г. Е. А. Салганский^{1*}, М. В. Салганская¹, Д. О. Глушков²¹Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии,
Российской академии наук, Черноголовка, Россия²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

*E-mail: sea@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023

После доработки 08.12.2023

Принята в печать 20.12.2023

Методом термогравиметрического анализа определены кинетические константы термического разложения полиметилметакрилата в потоке углекислого газа в широком диапазоне скоростей нагрева образцов (2–50 К/мин). Значения кинетических констант разложения определены по методу постоянных степеней превращения. Показано, что для степеней превращения вещества от 10 до 90% значения энергии активации термораспада ПММА изменяются в диапазоне 213.5–194.3 кДж/моль, а значения предэкспоненциального коэффициента – в диапазоне $1.62 \cdot 10^{16}$ – $6.85 \cdot 10^{12}$ с⁻¹. Среднее значение энергии активации термораспада ПММА в потоке углекислого газа составило 206 кДж/моль.

Ключевые слова: полиметилметакрилат, термогравиметрический анализ, термическое разложение, кинетика, диоксид углерода.

DOI: 10.31857/S0207401X24080017

1. ВВЕДЕНИЕ

Разнообразные виды пластмасс нашли широкое применение в качестве различных материалов в быту и промышленности. Вследствие этого растет количество пластиковых отходов, что требует разработки новых и внедрения модифицированных старых технологий их переработки [1]. Одним из распространенных видов пластмассы является полиметилметакрилат (ПММА). Благодаря уникальным свойствам ПММА используется для производства экранов, декоративных и отделочных материалов, оптических фильтров и др. [2]. Кроме того, его также используют в качестве модельного горючего для изучения процессов газификации [3, 4] и пиролиза [5]. При газификации горючего кинетические закономерности фильтрации через пористое горючее аналогичны фильтрационному горению твердых топлив [6, 7].

Для моделирования процессов пиролиза и газификации горючих материалов необходимо знать скорости их термораспада в различных условиях. Скорость и механизм термического разложения веществ определяются температурными усло-

виями протекания процесса [8–10]. Для определения скорости химических реакций применяется метод термогравиметрического анализа (ТГА) [11–13]. Помимо скорости, необходимо учитывать еще один важный параметр – тепловой эффект реакции. Для определения количества теплоты химической реакции используют метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [14–16]. Экспериментальные данные исследуемых процессов необходимы для верификации разрабатываемых математических моделей.

Термическая стабильность и горючесть полимерных материалов требует изучения их реакционных свойств для совершенствования мер пожарной безопасности. Поэтому проводятся исследования процессов термического разложения ПММА в различных средах и условиях [17–19]. Изучение скоростей термического разложения ПММА в инертных средах проводилось в потоке аргона [20–22] и азота [23–25]. В низкотемпературном газогенераторе происходит газификация охладителя при фильтрации высокотемпературных газов [26, 27]. Поток высокотемпературных газов может быть организован за счет сгорания

смесового топлива. Основными компонентами продуктов горения таких топлив являются азот, углекислый газ и пары воды. Поэтому газификация охладителя в газогенераторе протекает в инертной или восстановительной среде. Как отмечено выше, изучению термораспада ПММА в инертной среде посвящено большое число работ. Цель данного исследования — определение кинетических характеристик термораспада ПММА в среде углекислого газа в широком диапазоне варьирования скоростей нагрева.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Термогравиметрический анализ проводили с использованием образцов полиметилметакрилата марки Дакрил 81 (“Экструдер”, РФ). Структурная формула полиметилметакрилата $[-CH_2C(CH_3)(COOCH_3)-]_n$. Масса навесок образцов ПММА для термоанализатора STA 449 F5 (Netzsch, Germany) составляла ~1 мг. Анализ термораспада проводили в потоке углекислого газа, расход газа составлял 40 мл/мин. Образцы ПММА в корундовых тиглях нагревались от 300 до 800 К со скоростями 2, 5, 8, 20, 35 и 50 К/мин. Ошибки измерения массы и температуры составляли ± 0.5 мкг и 5 К соответственно. Обработку данных термогравиметрического анализа проводили в программе Proteus (Netzsch, Germany). Основные характеристики термораспада ПММА — потеря массы и величина теплового потока.

Значения кинетических характеристик термораспада ПММА определяли по модели Миура–Маки [28]:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{k_0 R}{E}\right) + 0.6075 - E/RT,$$

где T — температура для заданного значения степени превращения, К; E — энергия активации термораспада, Дж/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); k_0 — предэкспоненциальный множитель, c^{-1} ; β — скорость нагрева, К/с.

В соответствии с приведенным выше уравнением имеется линейная зависимость левой части от обратной температуры. Угловой коэффициент этой линейной функции позволяет рассчитать энергию активации термораспада ПММА, а свободный коэффициент — вычислить предэкспоненциальный множитель [29–31].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены кривые изменения массы при термораспаде ПММА в среде углекислого газа. Интенсивное разложение образцов начинается после достижения температуры 550 К и заканчивается до 720 К. Процесс термораспада ПММА проходит до полного разложения навески. Из рис. 1 видно, что при увеличении скорости нагрева образцов температурная область их разложения расширяется и сдвигается в область более высоких температур. Смещение температурного интервала термораспада ПММА при увеличении скорости нагрева в рамках термогравиметрического анализа в основном связано с инерционностью системы. В среде углекислого газа ПММА полностью разлагается при достижении температур 665, 685, 690, 695, 715 и 720 К для скоростей нагрева 2, 5, 8, 20, 35 и 50 К/мин соответственно.

На рис. 2 представлены кривые зависимости $\ln(\beta/T^2) = f(1/T)$ при различных значениях степени превращения образца ($10 \leq a \leq 90\%$) для определения кинетических констант его термического разложения в среде углекислого газа. Символы — экспериментально полученные данные термогравиметрического анализа. С увеличением степени превращения образца кривые сдвигаются в область более высоких температур (на рисунке — в область низких значений обратной температуры). Видно, что кривые зависимости $\ln(\beta/T^2) = f(1/T)$ имеют практически линейный характер и могут быть аппроксимированы

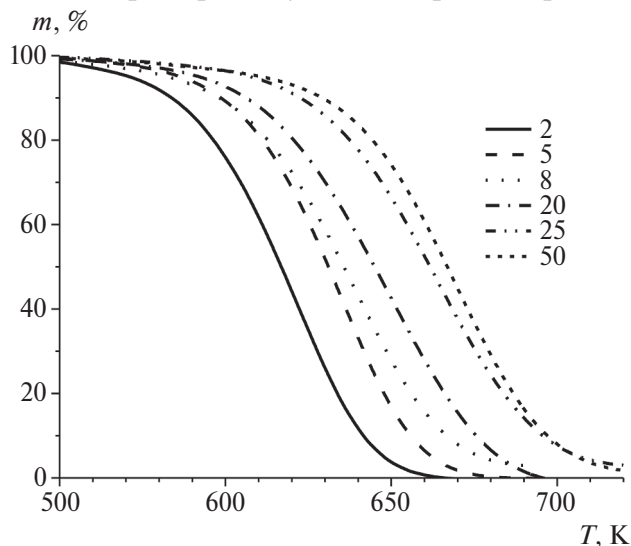


Рис. 1. Кривые изменения массы в процессе термораспада ПММА при различных скоростях нагрева образцов в среде углекислого газа. Числа — скорости нагрева (К/мин).

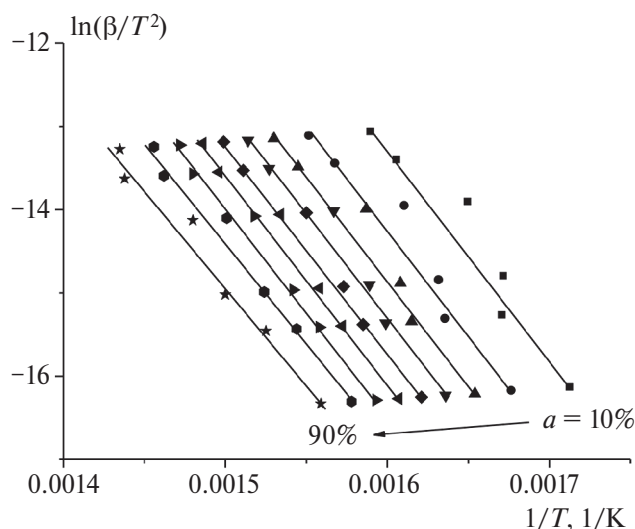


Рис. 2. Кривые зависимости $\ln(\beta/T^2) = f(1/T)$ при различных значениях степени превращения образца (a).

прямыми линиями по методу наименьших квадратов. Средняя ошибка аппроксимации не превышает 5%. Энергию активации термораспада можно рассчитать через угловой коэффициент линейной функции, а предэкспоненциальный множитель — через свободный коэффициент. Результаты расчета кинетических констант термораспада ПММА в среде углекислого газа представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что значения энергии активации термораспада ПММА в среде углекислого газа снижаются с 213.5 до 205 кДж/моль с увеличением степени превращения образца от 10 до 20%. Далее в интервале значений степени превращения 20–70% энергия активации остается величиной практически постоянной и равной ~206 кДж/моль. При дальнейшем увеличении степени превращения значение энергии активации вновь начинает снижаться. Аналогичная картина наблюдается для предэкспоненциального множителя. Величина последнего снижается с $1.62 \cdot 10^{16}$ до $1.13 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ при увеличении степени превращения от 10 до 20%. Далее в интервале значений степени превращения 20–70% значение множителя снижается гораздо медленнее (с $1.13 \cdot 10^{15}$ до $1.28 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$), а при дальнейшем увеличении степени превращения (более 70%) значение его вновь начинает снижаться довольно быстро. Данные из табл. 1 позволяют определить константу скорости реакции терморазложения ПММА в среде углекислого газа.

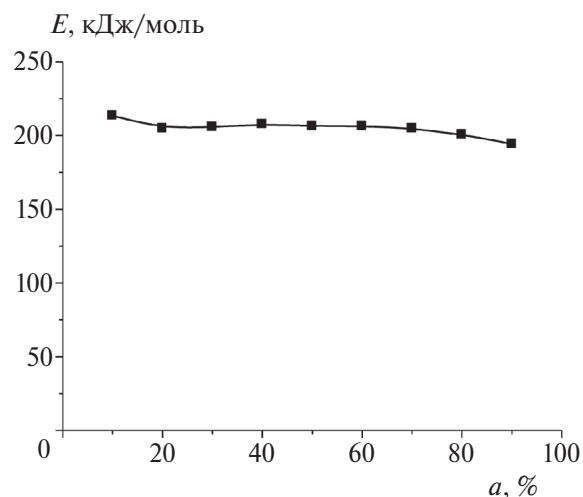


Рис. 3. Кривая зависимости энергии активации термораспада ПММА от степени превращения образца.

Таблица 1. Значения кинетических констант термораспада образцов ПММА в среде углекислого газа при различных значениях степени его превращения

Степень превращения, %	E , кДж/моль	k_0 , с^{-1}
10	213.5	$1.62 \cdot 10^{16}$
20	204.8	$1.13 \cdot 10^{15}$
30	205.7	$7.51 \cdot 10^{14}$
40	207.6	$6.91 \cdot 10^{14}$
50	206.5	$3.73 \cdot 10^{14}$
60	206.4	$2.54 \cdot 10^{14}$
70	204.8	$1.28 \cdot 10^{14}$
80	200.7	$3.90 \cdot 10^{13}$
90	194.3	$6.85 \cdot 10^{12}$

На рис. 3 представлена кривая зависимости энергии активации термораспада ПММА в среде углекислого газа от степени превращения образца. Из рисунка видно, что при увеличении степени превращения образца с 10 до 20% энергия активации снижается с 213.5 до 204.8 кДж/моль. Далее в интервале значений степени превращения 20–70% энергия активации остается величиной практически постоянной со средним значением, равным 206 кДж/моль. При дальнейшем увеличении степени превращения от 70 до 90% значение энергии активации вновь начинает слегка снижаться с 204.8 до 194.3 кДж/моль. Однако снижение величины энергии активации термораспада во всем интервале значений степени превращения образца является незначительным и не превышает погрешности термогравиметрического анализа.

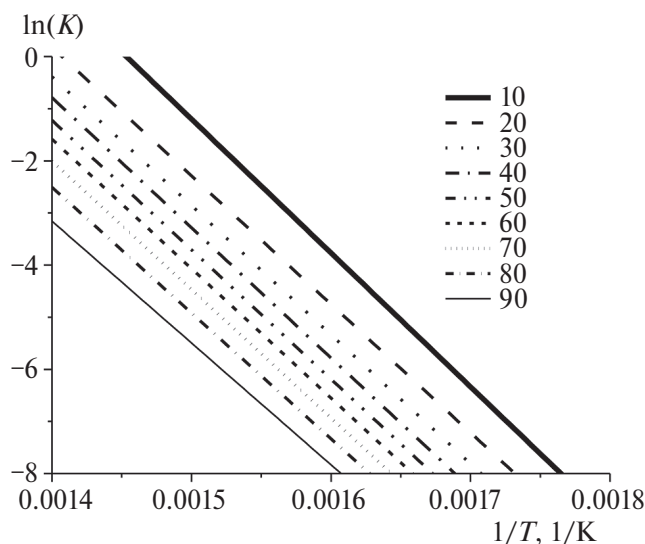


Рис. 4. Кривые логарифмической зависимости константы скорости химической реакции термораспада ПММА для различных значений степени превращения образца. Числа — степени превращения образца (%).

На рис. 4. приведены кривые логарифмической зависимости константы скорости химической реакции термораспада ПММА для разных значений степени превращения образца. Видно, что с увеличением степени разложения ПММА от 10 до 90% константа скорости снижается при постоянном значении температуры. Таким образом, реакция разложения ПММА в потоке углекислого газа происходит со снижением скорости. Поэтому при моделировании процесса разложения ПММА для относительно небольших степеней разложения целесообразно использовать константу скорости, полученную для степени разложения в 10%, а для моделирования всего процесса — константу скорости, полученную для степени разложения в 50%. При этом описывать процесс одной брутто-реакций гораздо проще, чем несколькими стадиями.

В работе [22] приведено значение энергии термораспада образцов ПММА при относительно низких скоростях нагрева (1–5 К/мин) в среде аргона, которое составило 210 ± 10 кДж/моль. В работе [24] значения энергии активации термораспада образцов ПММА при высоких скоростях нагрева (15–90 К/мин) в среде аргона авторы оценили в 212 и 178 кДж/моль для разных образцов. Среднее значение энергии активации термораспада ПММА в потоке углекислого газа по нашим расчетам составило 206 кДж/моль, что довольно

близко к значениям, полученным в других работах для условий инертной среды.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках термогравиметрического анализа определены кинетические характеристики термического разложения образцов ПММА в потоке углекислого газа. Скорость нагрева образцов изменялась в широком диапазоне и составляла 2, 5, 8, 20, 35 и 50 К/мин. Значения кинетических констант разложения ПММА определены по методу постоянных степеней превращения. Установлено, что интенсивное разложение образцов начинается после достижения температуры 550 К и заканчивается при 720 К. Процесс термораспада ПММА протекает до полного разложения образца.

Величина энергии активации термораспада ПММА в среде углекислого газа снижается от 213.5 до 205 кДж/моль с увеличением степени превращения образца от 10 до 20%. Далее в интервале значений степени превращения образца 20–70% значение энергии активации меняется незначительно, ее среднее значение составляет 206 кДж/моль. При дальнейшем увеличении степени превращения значение энергии активации вновь начинает уменьшаться. Однако снижение значений энергии активации термораспада во всем интервале значений степени превращения образца является несущественным и не превышает погрешности термогравиметрического анализа. Аналогичная тенденция характерна для изменения значений предэкспоненциального множителя.

Показано, что с увеличением степени разложения ПММА константа скорости снижается при постоянном значении температуры. Поэтому при моделировании процесса разложения ПММА в потоке углекислого газа для небольших степеней разложения целесообразно использовать кинетические характеристики, полученные для степени разложения 10%. А для моделирования всего процесса — значения, полученные для степени разложения 50%.

Исследование выполнено в рамках госзадания (тема № АААА-А19-119100800130-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eriksen M.K., Christiansen J.D., Daugaard A.E. et al. // J. Waste Manag. 2019. V. 96. P. 75. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.005>

2. *Xi G.X., Song S.L., Liu Q.* // *Thermochim. Acta.* 2005. V. 435. № 1. P. 64.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.05.005>
3. *Salgansky E.A., Lutsenko N.A.* // *Aerosp. Sci. Technol.* 2021. V. 109. № 106420.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106420>
4. *Салганский Е.А., Зайченко А.Ю., Подлесный Д.Н. и др.* // *Хим. физика.* 2022. Т. 41. № 11. С. 39.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22110097>
5. *Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Джардималиева Г.И.* // *Успехи химии.* 2011. Т. 80. № 3. С. 272.
6. *Салганский Е.А., Фурсов В.П., Глазов С.В. и др.* // *Физика горения и взрыва.* 2006. Т. 42. № 1. С. 65.
7. *Салганский Е.А., Фурсов В.П., Глазов С.В. и др.* // *Физика горения и взрыва.* 2003. Т. 39. № 1. С. 44.
8. *Юрьев Б.П., Дудко В.А.* // *Хим. физика.* 2022. Т. 41. № 1. С. 17.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22010174>
9. *Михалкин В.Н., Сумской С.И., Тереза А.М. и др.* // *Хим. физика.* 2022. Т. 41. № 8. С. 3.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2208009X>
10. *Tereza A.M., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya. et al.* // *Acta Astronaut.* 2023. V. 204. P. 705;
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.001>
11. *Sieradzka M., Mlonka-Mędrala A., Magdziarz A.* // *Fuel.* 2022. V. 330. № 125566.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125566>
12. *Гольдберг В.М., Ломакин С.М., Тодинова А.В. и др.* // *Изв. АН. Сер. хим.* 2010. № 4. С. 790.
13. *Жуйков А.В., Глушков Д.О.* // *ХТТ.* 2022. № 5. С. 45.
<https://doi.org/10.31857/S0023117722050115>
14. *Shen H., Qiao H., Zhang H.* // *Chem. Eng. J.* 2022. V. 450. № 137905.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137905>
15. *Назин Г.М., Дубихин В.В., Казаков А.И. и др.* // *Хим. физика.* 2022. Т. 41. № 1. С. 48.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22010125>
16. *Ramirez-Gutierrez C.F., Lujan-Cabrera I.A., Valencia-Molina L.D. et al.* // *Mater. Today Commun.* 2022. V. 33. № 104188.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104188>
17. *Kaminsky W., Predel M., Sadiki A.* // *Polym. Degrad. Stab.* 2004. V. 85. № 3. P. 1045.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.05.002>
18. *Lopez G., Artetxe M., Amutio M. et al.* // *Chem. Eng. Process: Process Intensif.* 2010. V. 49. № 10. P. 1089.
<https://doi.org/10.1016/j.ccep.2010.08.002>
19. *Braido R.S., Borges L.E.P., Pinto J.C.* // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2018. V. 132. P. 47.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.03.017>
20. *Holland B.J., Hay J.N.* // *Polymer.* 2001. V. 42. № 11. P. 4825.
[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00923-X](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00923-X)
21. *Ferriol M., Gentilhomme A., Cochez M. et al.* // *Polym. Degrad. Stab.* 2003. V. 79. № 2. P. 271.
[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00291-4](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00291-4)
22. *Holland B.J., Hay J.N.* // *Thermochim. Acta.* 2002. V. 388. № 1–2. P. 253.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00034-5)
23. *Bhargava A., Hees P., Andersson B.* // *Polym. Degrad. Stab.* 2016. V. 129. P. 199.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.016>
24. *Snegirev A.Yu., Talalov V.A., Stepanov V.V. et al.* // *Polym. Degrad. Stab.* 2017. V. 137. P. 151.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.008>
25. *Denq B.L., Chiu W.Y., Lin K.F.* // *J. Appl. Polym. Sci.* 1997. V. 66. № 10. P. 1855.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19971205\)66:10<1855::AID-APP3>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19971205)66:10<1855::AID-APP3>3.0.CO;2-M)
26. *Salgansky E.A., Zaichenko A.Yu., Podlesniy D.N. et al.* // *Fuel.* 2017. V. 210. P. 491.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.103>
27. *Амелин И.И., Салганский Е.А., Волкова Н.Н. и др.* // *Изв. АН. Сер. хим.* 2011. № 6. С. 1125.
28. *Miura K., Maki T.* // *Energy Fuels.* 1998. V. 12. № 5. P. 864.
<https://doi.org/10.1021/ef970212q>
29. *Zhang J., Wang Z., Zhao R. et al.* // *Energies.* 2020. V. 13. № 13. P. 3313.
<https://doi.org/10.3390/en13133313>
30. *Zhang J., Chen T., Wu J. et al.* // *RSC Advances.* 2014. V. 4. № 34. P. 17513.
<https://doi.org/10.1039/c4ra01445f>
31. *Vyazovkin S.* // *Molecules.* 2020. V. 25. P. 2813.
<https://doi.org/10.3390/molecules25122813>

KINETICS OF THERMAL DECOMPOSITION OF POLYMETHYLMETHACRYLATE IN A CARBON DIOXIDE ENVIRONMENT

E. A. Salgansky^{1*}, M. V. Salganskaya¹, D. O. Glushkov²

¹*FRC of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

*E-mail: sea@icp.ac.ru

A thermogravimetric analysis of the thermal decomposition of polymethylmethacrylate (PMMA) in a carbon dioxide flow was carried out. The kinetic constants of the process were determined. The heating rate of the sample varied over a wide range and amounted to 2, 5, 8, 20, 35 and 50 K/min. The values of the kinetic constants of PMMA decomposition were determined using the isoconversional method. For the degree of conversion of the substance from 10 to 90%, the values of activation energy for the thermal decomposition of PMMA vary in the range from 213.5 to 194.3 kJ/mol, and the values of the pre-exponential coefficient change in the range from $1.62 \cdot 10^{16}$ to $6.85 \cdot 10^{12}$ 1/s. The average activation energy for the thermal decomposition of PMMA in a carbon dioxide flow was 206 kJ/mol.

Keywords: PMMA, TGA, thermal decomposition, kinetics, carbon dioxide.

REFERENCES

1. M.K. Eriksen, J.D. Christiansen, A.E. Daugaard, et al., *Waste Manag.* **96**, 75 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.005>
2. G.X. Xi, S.L. Song and Q. Liu, *Thermochim. Acta* **435** (1), 64 (2005).
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.05.005>
3. E.A. Salgansky and N.A. Lutsenko, *Aerosp. Sci. Technol.* **109**, 106420 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106420>
4. E.A. Salgansky, A.Yu. Zaichenko, D.N. Podlesniy, et al., *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (6), 1080 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122060094>
5. A.D. Pomogailo, A.S. Rozenberg and G.I. Dzhardimalieva, *Russ. Chem. Rev.* **80** (3), 257 (2011).
<https://doi.org/10.1070/RC2011v080n03ABEH004079>
6. E.A. Salganskii, V.P. Fursov, S.V. Glazov, et al., *Combust. Explos. Shock Waves* **42**, 55 (2006).
<https://doi.org/10.1007/s10573-006-0007-9>
7. E.A. Salganskii, V.P. Fursov, S.V. Glazov, et al., *Combust. Explos. Shock Waves* **39** (1), 37 (2003).
<https://doi.org/10.1023/A:1022193117840>
8. B.P. Yur'ev and V.A. Dudko, *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (1), 31 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122010171>
9. V.N. Mikhalkin, S.I. Sumskey, A.M. Tereza, et al., *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (3), 318 (2022).
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2208009X>
10. A.M. Tereza, P.V. Kozlov, G.Ya. Gerasimov, et al., *Acta Astronaut.* **204**, 705 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.001>
11. M. Sieradzka, A. Mlonka-Mędrala and A. Magdziarz, *Fuel* **330**, 125566 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125566>
12. V.M. Gol'dberg, S.M. Lomakin, A.V. Todinova, et al., *Russ. Chem. Bull.* **59** (4), 806 (2010).
<https://doi.org/10.1007/s11172-010-0165-5>
13. A.V. Zhuikov and D.O. Glushkov, *Solid Fuel Chem.* **56** (5), 353 (2022).
<https://doi.org/10.31857/S0023117722050115>
14. H. Shen, H. Qiao and H. Zhang, *Chem. Eng. J.* **450**, 137905 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137905>
15. G.M. Nazin, V.V. Dubikhin, A.I. Kazakov, et al., *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (1), 72 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122010122>
16. C.F. Ramirez-Gutierrez, I.A. Lujan-Cabrera, L.D. Valencia-Molina, et al., *Mater. Today Commun.* **33**, 104188 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104188>
17. W. Kaminsky, M. Predel and A. Sadiki, *Polym. Degrad. Stab.* **85** (3), 1045 (2004).
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.05.002>
18. G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, et al., *Chem. Eng. Process.* **49** (10), 1089 (2010).
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.08.002>
19. R.S. Braidó, L.E.P. Borges and J.C. Pinto, *J. Anal. Appl. Pyrol.* **132**, 47 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.03.017>
20. B.J. Holland and J.N. Hay, *Polymer* **42**, 4825 (2001).
[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00923-X](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00923-X)
21. M. Ferriol, A. Gentilhomme, M. Cochez, et al., *Polym. Degrad. Stab.* **79** (2), 271 (2003).
[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00291-4](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00291-4)
22. B.J. Holland and J.N. Hay, *Thermochim. Acta* **388**, 253 (2002).
[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00034-5)
23. A. Bhargava, P. Hees and B. Andersson, *Polym. Degrad. Stab.* **129**, 199 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.016>
24. A.Yu. Snegirev, V.A. Talalov, V.V. Stepanov, et al., *Polym. Degrad. Stab.* **137**, 151 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.008>
25. B.L. Denq, W.Y. Chiu and K.F. Lin, *J. Appl. Polym. Sci.* **66**, 1855 (1997).
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19971205\)66:10<1855::AID-APP3>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19971205)66:10<1855::AID-APP3>3.0.CO;2-M)

26. E.A. Salgansky, A.Yu. Zaichenko, D.N. Podlesniy, et al., *Fuel*. **210**, 491 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.103>
27. I.I. Amelin, E.A. Salgansky, N.N. Volkova, et al., *Russ. Chem. Bull.* **60** (6) 1150 (2011).
<https://doi.org/10.1007/s11172-011-0180-1>
28. K. Miura and T. Maki, *Energy Fuels*. **12** (5), 864 (1998).
<https://doi.org/10.1021/ef970212q>
29. J. Zhang, Z. Wang, R. Zhao, et al., *Energies*. **13**, 3313 (2020).
<https://doi.org/10.3390/en13133313>
30. J. Zhang, T. Chen, J. Wu, et al., *RSC Advances*. **4**, 17513 (2014).
<https://doi.org/10.1039/c4ra01445f>
31. S. Vyazovkin, *Molecules*. **25**, 2813 (2020).
<https://doi.org/10.3390/molecules25122813>