

С. В. Борисов, Ю. Н. Каменев, А. Б. Кочнов, М. А. Ваниев, И. А. Новаков

**ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНАЯ ДЕСТРУКЦИЯ ПОЛИМЕРОВ
НА ОСНОВЕ ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО ДИМЕТАКРИЛАТА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЕМ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Сергей Владимирович Борисов, borisov.volgograd@yandex.ru

Аннотация. На основании изоконверсионных моделей Озавы–Флинна–Уолла и Фридмана рассчитаны значения эффективной энергии активации и предэкспоненциального множителя уравнения Аррениуса для процесса термоокислительной деструкции сополимеров, полученных на основе ди(1-метакрилокси-3-хлорпропокси-2-)метилфосфоната, 2-гидроксипропилметакрилата и растворенного в них поливинилбутираля. Установлено, что увеличение доли фосфорсодержащего диметакрилата в рецептуре сополимеров способствует росту выхода более высокотермостойких продуктов деструкции на более поздних стадиях термоокисления, направляя процессы в диффузионную область. Полученные результаты расчетов можно использовать при прогнозировании срока службы изделий на основе исследуемых объектов.

Ключевые слова: фосфорсодержащий диметакрилат, термоокислительная деструкция, эффективная энергия активации, предэкспоненциальный множитель

Благодарности: при выполнении работы использовано оборудование ЦКП «Физико-химические методы исследования» Волгоградского государственного технического университета.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ (из средств программы развития «Приоритет 2030» по соглашению № 075-15-2025-063) в рамках научного проекта № 17/658-24.

Для цитирования: Борисов С. В., Каменев Ю. Н., Кочнов А. Б., Ваниев М. А., Новаков И. А. Термоокислительная деструкция полимеров на основе фосфорсодержащего диметакрилата, модифицированного поливинилбутиралем. Известия ВолгГТУ. 2025; 12(307): 98–106. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-98-106.

Информация об авторах:**Сергей Владимирович Борисов** – канд. техн. наук, доцент кафедры ХТПЭ ВолгГТУ

e-mail: borisov.volgograd@yandex.ru

Юрий Николаевич Каменев – аспирант кафедры ХТПЭ ВолгГТУ

e-mail: kamenev45@mail.ru

Александр Борисович Кочнов – инженер-исследователь ВолгГТУ

e-mail: koch@vstu.ru

Марат Абдурахманович Ваниев – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой ХТПЭ ВолгГТУ

e-mail: vaniev@vstu.ru

Иван Александрович Новаков – академик РАН, профессор, д-р хим. наук, заведующий кафедрой ФАХП ВолгГТУ

e-mail: ianovakov@vstu.ru

Вклад авторов:**С. В. Борисов** – наработка и пробоподготовка образцов полимеров, проведение расчетов, написание текста статьи.**Ю. Н. Каменев** – проведение расчетов, подбор литературы, редакция текста статьи.**А. Б. Кочнов** – синтез ди-(1-метакрилокси-3-хлор-2-пропил)метилфосфоната, редакция текста статьи.**М. А. Ваниев** – разработка рецептур, постановка задач, редакция текста статьи.**И. А. Новаков** – разработка рецептур, постановка задач, редакция текста статьи.

В результате проведенных ранее исследований были разработаны полимер-мономерные композиции (ПМК) на основе растворов поливинилбутирала (ПВБ) в смеси ди(1-метакрилокси-3-хлорпропокси-2-) метилфосфоната (ФОМ-II) и 2-гидроксипропилметакрилата (2-ГПМА). Продукты их полимеризации представляют собой оптически прозрачные (коэффициент светопропускания при длине волны 670 нм достигает 89 %) высокосшитые (содержание гелефракции 92–95 % масс.) полимерные материалы с повышенной адгезией к силикатному стеклу (до 30,5 МПа при сдвиге) и пониженной горючестью (величина кислородного индекса 24,0–32,5 % об.). В развитии исследования для оценки срока службы и прогнозирования поведения полимерного материала в процессе эксплуатации целесообразным является определение эффективной энергии активации и предэкспоненциального множителя в кинетическом уравнении термоокислительной деструкции. Для этого в настоящее время используют множество методов, позволяющих провести расчет по ТГ-кривым, полученным при различных скоростях нагрева, в частности, методики, приведенные в российских и международных стандартах [0; 0], а также изоконверсионные модели [3].

Целью данной работы является определение эффективной энергии активации и предэкспоненциального множителя термоокислительной деструкции полимерных материалов на основе растворов поливинилбутирала (ПВБ) в смеси ди(1-метакрилокси-3-хлорпропокси-2-)метилфосфоната (ФОМ-II) и 2-гидроксипропилметакрилата (2-ГПМА).

Экспериментальная часть

Для исследований использовали ПВБ марки В-60Н Movital (Kuraray Specialities Europe GmbH, Германия) с молекулярной массой 95000, содержащий 18–21 % винилспиртовых, 75–80 % винилбутиральных и не более 4 % винилацетатных звеньев. Диметакрилат ФОМ-II был синтезирован по способу [4], позволяющему получать бесцветный прозрачный продукт. 2-ГПМА (ООО «Лаборатория метакриловых мономеров», г. Дзержинск) содержал > 97 % основного вещества и *n*-метоксифенол в качестве стабилизатора.

Образцы сополимеров получали радикальной полимеризацией в массе в присутствии 1 % пероксида бензоила (ПБ) при температуре 60 °С. В дальнейшем образцы выдерживали при температуре 70 °С в течение одного часа и 80 °С в течение одного часа.

Рецептуры исследуемых композиций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рецептуры исследуемых композиций

Наименование компонента	Шифр рецептуры				
	1	2	3	4	5
	Массовое соотношение, %				
ФОМ-II	100	60	50	40	30
2-ГПМА	0	30	40	50	60
ПВБ	0	10	10	10	10

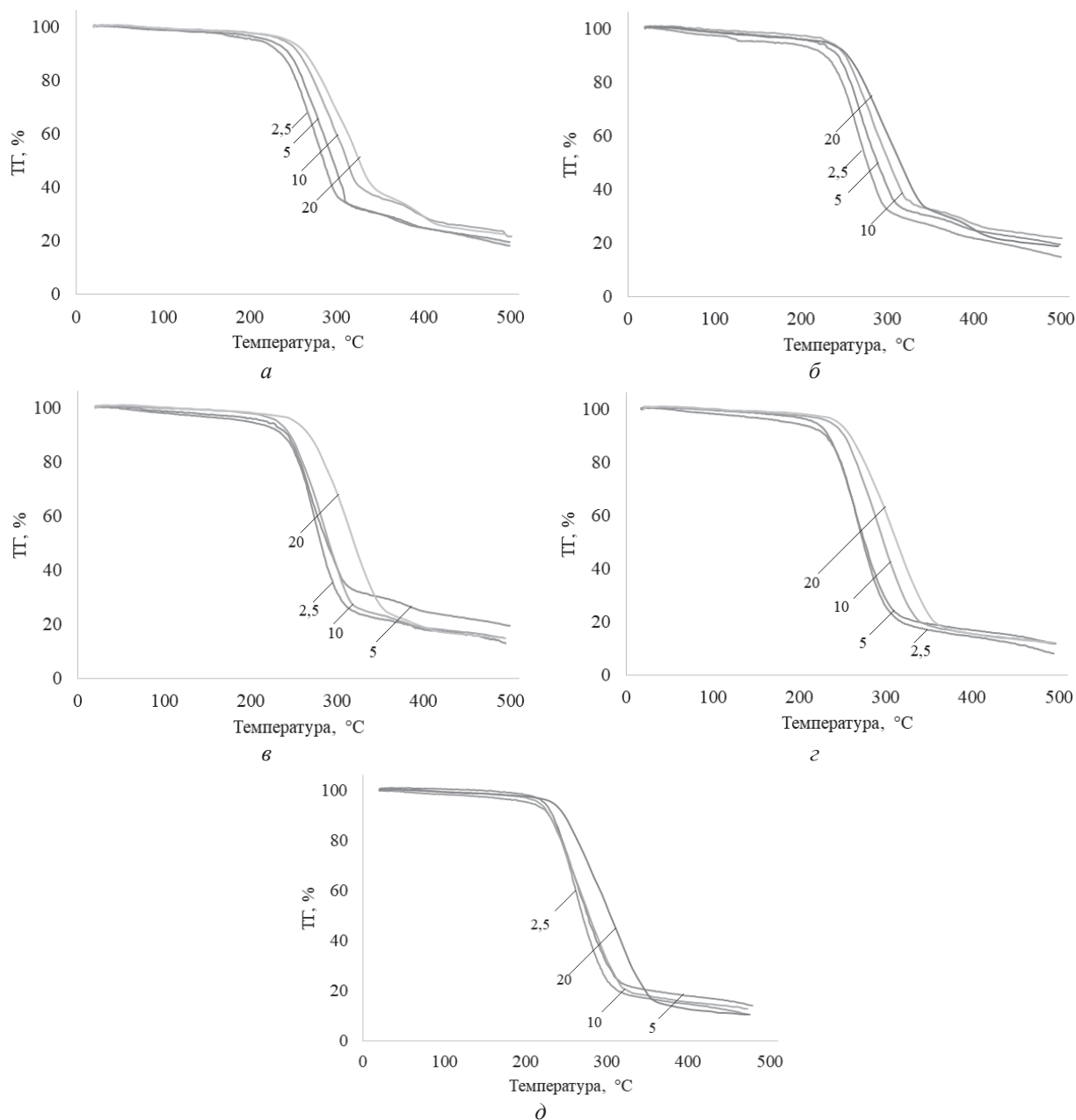
Для изучения кинетики термоокислительной деструкции использовали метод термогравиметрического анализа. Исследования проводили в среде воздуха на дериватографе системы «Паулик, Паулик, Эрдей» в динамическом режиме нагрева (2,5, 5, 10 и 20 °С/мин). Масса навески 104 ± 5 мг.

Определение кинетических параметров термоокислительной деструкции разработанных материалов производилось в соответствии

с методиками ГОСТ 9.715-86 и ASTM 698, а также изоконверсионными методами, в частности с использованием моделей Озавы–Флинна–Уолла [5] и Фридмана [6].

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены термогравиметрические кривые, полученные при различных скоростях нагрева исследуемых материалов.



1 – 2,5 °С; 2 – 5 °С; 3 – 10 °С; 4 – 20 °С

Образцы получены в условиях термохимически инициированной полимеризации при 60 °С, [ПБ] = 1 % масс.

Рис. 1. Термогравиметрические кривые, полученные при различных скоростях нагрева гомополимера ФОМ-II (а) и сополимеров, на основе 10 % масс. растворов ПБВ в смеси мономеров ФОМ-II и ГПМА, % масс.:

$\delta - 60:30$, $\epsilon - 50:40$, $\zeta - 40:50$, $\theta - 30:60$

Представленные на рис. 1 данные отражают поведение анализируемых образцов в процессе термоокислительной деструкции. Резкое увеличение скорости потери массы материала наблюдается в области температур, примерно, 220–340 °С. Увеличение скорости нагревания приводит к росту температуры начала термоокислительной деструкции.

Более подробно результаты термогравиметрического анализа данных полимеров представлены в работе [7].

В табл. 2 представлены результаты расчетов эффективной энергии активации термоокислительной деструкции и предэкспоненциального множителя, полученные согласно методикам ГОСТ 9.715-86 и ASTM E698.

Таблица 2

Результаты расчетов энергии активации термоокислительной деструкции и предэкспоненциального множителя

Шифр рецептуры	Значение предэкспоненциального множителя, K_0 , с^{-1}		Значение энергии активации, E_a , кДж/моль	
	Согласно методике ГОСТ 9.715-86	Согласно методике ASTM E698	Согласно методике ГОСТ 9.715-86	Согласно методике ASTM E698
1	$1,77 \cdot 10^6$	$1,10 \cdot 10^{10}$	64,52	134,81
2	$2,39 \cdot 10^6$	3,16	50,57	36,58
3	$3,57 \cdot 10^7$	$7,41 \cdot 10^6$	65,74	100,61
4	$1,11 \cdot 10^8$	$3,94 \cdot 10^4$	77,43	76,59
5	$2,28 \cdot 10^{10}$	$9,33 \cdot 10^6$	76,16	98,86

Следует отметить, что результаты расчетов, представленные в табл. 2, полученные с использованием различных методов существенно отличаются, и не позволяют сделать однозначного вывода о протекании термоокисления исследуемых материалов. Кроме того, отсутствует зависимость между рассчитанными значениями и содержанием диметакрилата ФОМ-II в полимерном материале. Это, по всей видимости, вызвано отличием используемых методик. В частности, для расчетов по методике ASTM E698 используется зависимость логарифма скорости нагревания от обратной температуры, при которой достигнут максимум на кривых ДТГ (1):

$$W_n \frac{d\alpha}{dT} = K_0 e^{\frac{E_a}{RT}} (1-\alpha) \quad (1)$$

Для расчетов согласно методике ГОСТ 9.715-86 используется следующая зависимость (2):

$$\ln \frac{W_n \cdot \Delta m_i}{R \cdot T_i^2} = \ln \frac{K_0}{E_a} - \frac{E_a}{R \cdot T_i} \quad (2)$$

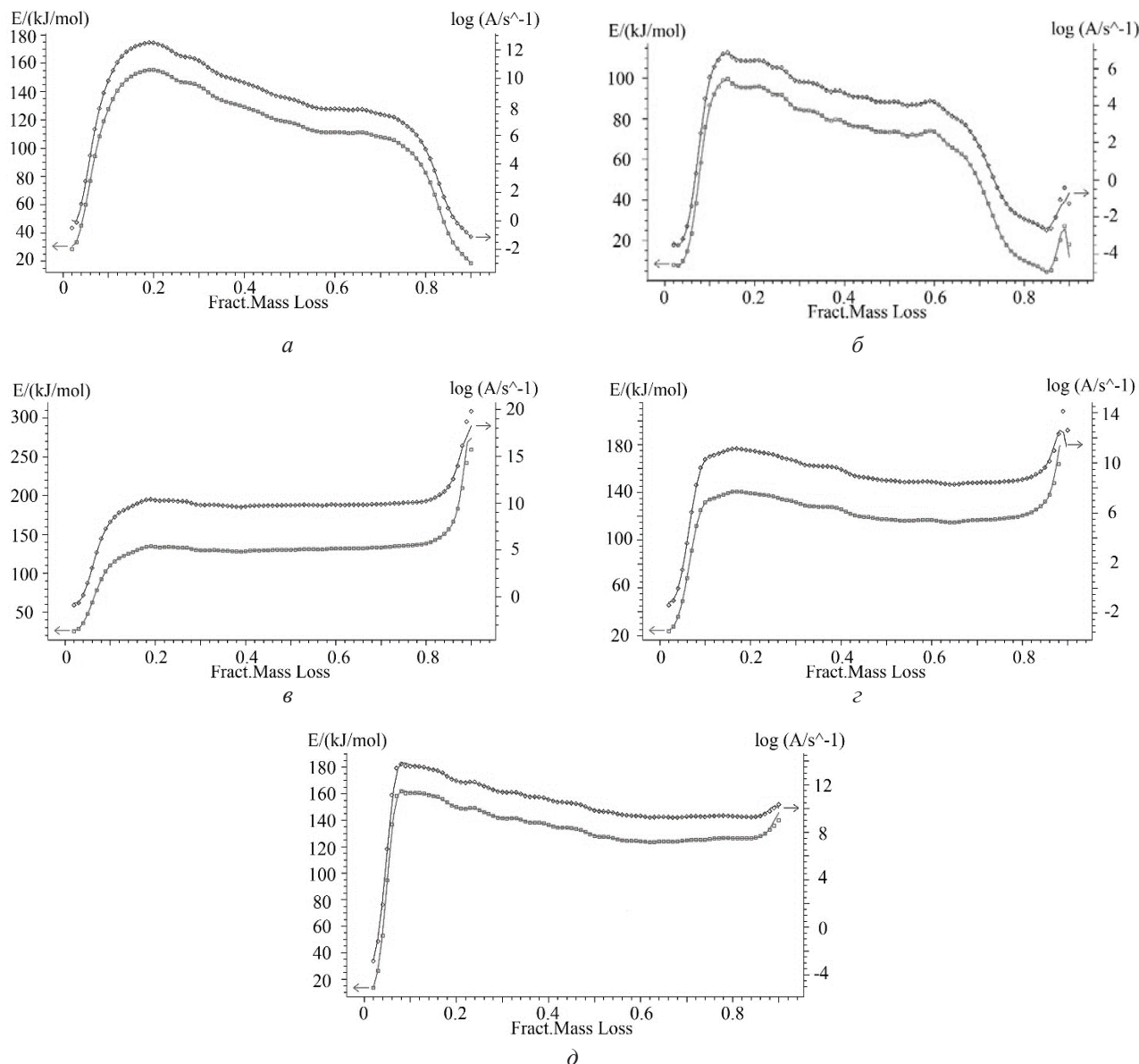
В уравнениях (1) и (2) W_n – скорость нагрева; К/мин ; $\frac{d\alpha}{dT}$ – скорость реакции; α – степень

превращения; Δm_i – относительное изменение массы пробы для каждой из градаций; T_i – температура, соответствующая каждому изменению массы, К ; K_0 – предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса, мин^{-1} ; E_a – коэффициент, характеризующий зависимость скорости изменения массы от температуры каждого процесса, $\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot (\text{моль} \cdot \text{К})^{-1}$

С использованием данных рис. 1, были произведены расчеты согласно изоконверсионным моделям Озавы–Флинна–Уолла (рис. 2) и Фридмана (рис. 3). Эти методы применимы и широко используются при анализе подобных объектов [8–11].

Следует отметить, что согласно алгоритмам используемых изоконверсионных моделей, полученные на рис. 2 и 3 зависимости отражают не конверсию термоокислительной деструкции в целом, а степень завершенности процессов, характеризуемых данными рис. 1.

То есть в исследуемом при термогравиметрии диапазоне температур полученная потеря массы принимается за 100 % завершенности процесса.



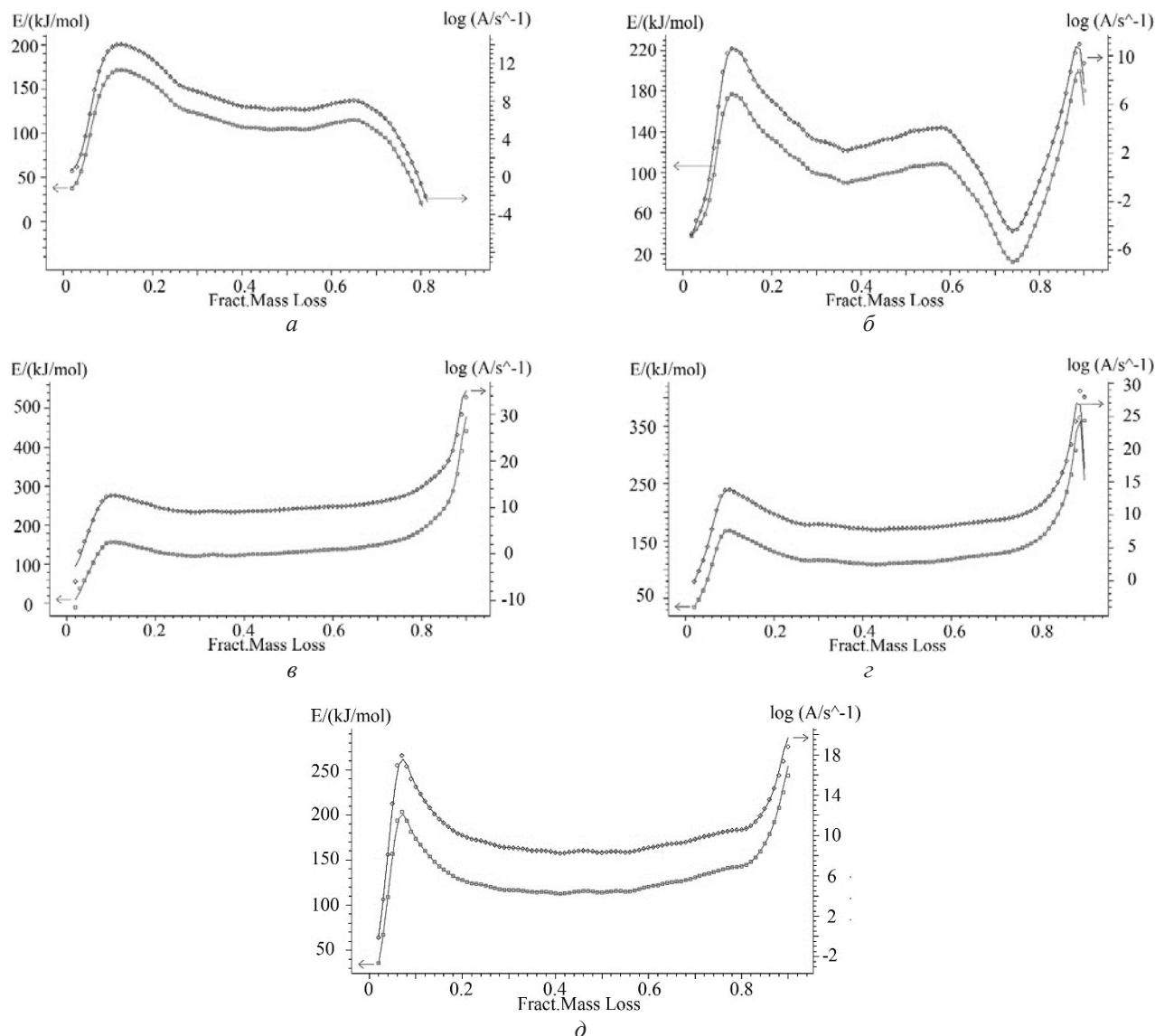
Образцы получены в условиях термохимически инициированной полимеризации при 60 °С, [ПБ] = 1 % масс.

Рис. 2. Результаты расчета согласно методу Озавы–Флинна–Уолла кинетических параметров E_a и $\log A$ в зависимости от степени превращения термоокислительной деструкции гомополимера ФОМ-II (а) и сополимеров, на основе 10 % масс. растворов ПВБ в смеси мономеров ФОМ-II и ГПМА, % масс.: б – 60:30, в – 50:40, г – 40:50, д – 30:60

При сопоставлении зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, можно сказать, что результаты расчетов эффективной энергии активации по моделям Озавы–Флинна–Уолла и Фридмана являются достаточно близкими. В то же время при сравнении численных результатов расчета предэкспоненциальных множителей, полученных различными методами, можно видеть существенные отличия. Анализ зависимостей E_a свидетельствует о том, что с увеличением конверсии значения эффектив-

ной энергии активации возрастают с 10–40 до 100–440 кДж/моль. Это обстоятельство подтверждает сложный характер термоокислительной деструкции исследуемых полимеров, описанный ранее [7].

При степенях превращения около 0,08–0,18 фиксируется максимум значений E_a (табл. 3). При этом наибольшим значением эффективной энергии активации характеризуется композиция под шифром 5, соответствующая соотношению ФОМ-II:ГПМА, равному 30:60 (% масс.).



Образцы получены в условиях термохимически инициированной полимеризации
при 60 °С, [ПБ] = 1 % масс

Рис. 3. Результаты расчета согласно методу Фридмана кинетических параметров E_a и $\log A$ в зависимости от степени превращения термоокислительной деструкции гомополимера ФОМ-II (а) и сополимеров, на основе 10 % масс. растворов ПВБ в смеси мономеров ФОМ-II и ГПМА, % масс:
б – 60:30, в – 50:40, г – 40:50, д – 30:60

Таблица 3

**Результаты расчетов энергии активации термоокислительной деструкции
и предэкспоненциального множителя**

Шифр рецептуры	Степень превращения, соответствующая первому максимуму		Энергия активации, соответствующая первому максимуму, кДж/моль	
	Согласно модели Озавы-Флинна-Уолла	Согласно модели Фридмана	Озавы-Флинна- Уолла	Согласно модели Фридмана
1	0,19	0,1	145	145
2	0,14	0,11	140	138
3	0,18	0,10	138	130
4	0,17	0,10	141	170
5	0,08	0,07	161	200

После достижения первого максимума на кривых рис. 2 и 3 можно видеть некоторое снижение значений E_a . Это может быть обусловлено истощением твердой фазы в результате термоокисления и, как следствие, снижением диффузионных ограничений. При обозначенных степенях превращения продукты термоокислительной деструкции, как правило, представляют собой смесь термостойких высококипящих олигомерных соединений и низкомолекулярных, в том числе газообразных, веществ [12; 13]. Дальнейшее повышение температуры, примерно до 300–350 °С, приводит к дегазации и испарению низкокипящих компонентов этой смеси вплоть до степеней превращения примерно 0,6–0,8. В свою очередь, на поверхности образца скапливаются продукты деструкции, препятствующие проникновению кислорода вглубь материала, что отражается в нисходящем наклоне кривой E_a от x . Кроме того, этим эффектом можно объяснить увеличение антипирецирующих свойств исследуемых полимеров с ростом содержания диметакрилата ФОМ-II [0].

Следует отметить, что характер конверсионных зависимостей материалов, содержащих ФОМ-II в количестве 60 % масс. и выше, независимо от модели расчета, существенно отличается. После степени превращения около 0,7 эффективная энергия активации начинает снижаться более интенсивно, пока не достигнет значений около 5–20 кДж/моль. Отсутствие этого эффекта в остальных случаях, вероятнее всего, связано с меньшим количеством сформировавшихся термостойких продуктов в виду более низкого количества фосфора в структуре образцов. Это подтверждают результаты термогравиметрии, представленные на рис. 1. Дальнейшее повышение эффективной энергии активации связано с термоокислительной деструкцией этих продуктов.

Вывод

Таким образом, на основании проведенных термогравиметрических исследований были рассчитаны значения эффективной энергии активации и предэкспоненциального множителя термоокислительной деструкции сополимеров, полученных на основе ди(1-метакрил-окси-3-хлорпрокси-2-)метилфосфоната, 2-гидроксипропилметакрилата и растворенного в них поливинилбутирала. Увеличение доли фосфорсодержащего диметакрилата в рецептуре полимеров способствует росту выхода бо-

лее термостойких продуктов деструкции на более поздних стадиях термоокисления. Полученные результаты расчетов можно использовать при прогнозировании срока службы изделий на основе исследуемых объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яцукович, А. Г. Срок сохранения огнезащитной эффективности как критерий качества термовспенивающихся огнезащитных красок / А. Г. Яцукович // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2013. – № 1(33). – С. 15–22.
2. Орджоникидзе, О. С. Термокинетическое моделирование процессов разложения октогена и CI-20 на основе данных термического анализа / О. С. Орджоникидзе, Н. В. Муравьев, К. А. Моногаров [и др.] // Горение и взрыв. – 2010. – № 3. – С. 240–245.
3. Марьяндышев, П. А. Термогравиметрическое и кинетическое исследование торфа и гидролизного лигнина / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, В. К. Любов // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 12. – С. 20–27.
4. Пат. 2 284 330 Российская Федерация, МПК С 07 F 9/09, 9/40. Способ получения фосфорхлорсодержащих метакрилатов / И. А. Новаков, Г. Д. Бахтина, А. Б. Кочнов; патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2005121804/04; заявл. 11.07.2005; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27
5. Koga, N. Ozawa's kinetic method for analyzing thermoanalytical curves: history and theoretical fundamentals / N. Koga // Journal of thermal analysis and calorimetry. – 2013. – Vol. 113, № 3. – P. 1527–1541. – DOI 10.1007/s10973-012-2882-5.
6. Friedman, H. L. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry / H. L. Friedman // Journal of polymer science part C: polymer symposia. – 1964. – Vol. 6, № 1. – P. 183–195. – DOI: 10.1002/polc.5070060121.
7. Борисов, С. В. Термоокислительная деструкция и горение сополимеров на основе растворов поливинилбутирала в смеси метакриловых мономеров / С. В. Борисов, Д. Р. Кувшинова, Д. А. Кудрявцева [и др.] // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12(283) / ВолгГТУ. – 2023. – С. 78–85. – DOI 10.35211/1990-5297-2023-12-283-78-85.
8. Kinetic analysis of the thermooxidative degradation of poly(vinyl-chloride) in poly(vinyl chloride)/methyl methacrylate-butadiene-styrene blends 2. Nonisothermal degradation / N. S. Vradecic, B. Andricic, I. Klaric, T. Kovavic // Polymer degradation and stability. – 2004. – Vol. 90. – 455–460. – DOI:10.1016/j.polyimdegstab.2005.04.017.
9. Lifetime prediction of thermo-oxidative degradation of a modified epoxy resin and its glass fiber composite in air atmosphere and correlation with long-term aging behavior / M. Demleirner, L. Endner, H. Ruckdaschel // Polymer degradation and stability. – 2025/ – vol. 242. – DOI: 10.1016/j.polyimdegstab.2025.111686.
10. Using the Friedman method to study the thermal degradation kinetics of photonicly cured electrically conductive adhesives / H. W. Cui, J. Jiu, T. Sugahara, S. Nagao // Journal of thermal analysis and calorimetry. – 2015. – Vol. 119. – P. 425–433. – DOI:10.1007/s10973-014-4195-3.
11. Long-term thermo-oxidative degradation modeling of a carbon fiber reinforced polyimide composite: multistep degradation behaviors and kinetics / Y. Liu, X. Z. Mo, B. W. Lan

[et al.] // Chinese journal of polymer science. – 2020. – Vol. 38. – P. 1202–1213. – DOI: 10.1007/S10118-020-2425-7.

12. Салимгареева, В. Н. Термическая деструкция и стабилизация полиметилметакрилата / В. Н. Салимгареева, С. В. Колесов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 7. – С. 3–11.

13. Молодова, А. А. Термоокислительная деструкция композиций целлюлозная ткань-акриловые сополимеры / А. А. Молодова, Н. В. Волкова, Д. Н. Емельянов [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2010. – Т. 83, № 11. – С. 1879–1884.

REFERENCES

1. Yatsukovich, A. G. The duration of preservation of flame-retardant effectiveness as a quality criterion for heat-foaming flame-retardant paints / A. G. Yatsukovich // Emergency situations: prevention and elimination. – 2013. – No. 1(33). – P. 15–22.

2. Thermokinetic modeling of octogen and CI-20 decomposition processes based on thermal analysis data / O. S. Ordzhonikidze, N. V. Muravyov, K. A. Monogarov [et al.] // Gorenje i vzv. – 2010. – No. 3. – P. 240–245.

3. Maryandyshev, P. A. Thermogravimetric and kinetic investigation of peat and hydrolyzed lignin / P. A. Maryandyshev, A. A. Chernov, V. K. Lyubov // International Journal of Experimental Education. – 2014. – No. 12. – P. 20–27.

4. Pat. 2 284 330 Russian Federation, IPC C 07 F 9/09, 9/40. Method of obtaining phosphor-chlorinated methacrylates / I. A. Novakov, G. D. Bakhtina, A. B. Kochnov; appl. Volgograd State Technical University. – Режим доступа: URL: <https://patents.google.com/patent/RU2284330C1/ru>.

5. Koga, N. Ozawa's kinetic method for analyzing thermoanalytical curves: history and theoretical fundamentals / N. Koga // Journal of thermal analysis and calorimetry. – 2013. – Vol.

113, № 3. – P. 1527–1541. – DOI 10.1007/s10973-012-2882-5.

6. Friedman, H. L. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry / H. L. Friedman // Journal of polymer science part C: polymer symposia. – 1964. – Vol. 6, № 1. – P. 183–195. – DOI: 10.1002/polc.5070060121.

7. Thermooxidative degradation and gorenje of copolymers based on polyvinylbutyral solutions in a mixture of methacrylic monomers / S. V. Borisov, D. R. Kuvshinova, D. A. Kudryavtseva [et al.] // Izvestiya VSTU. – 2023. – No. 12(283). – P. 78–85. – DOI 10.35211/1990-5297-2023-12-283-78-85.

8. Brown, M. Reactions of solids / M. Brown, D. Dollimore, A. Galway. – Moscow: Mir, 1983. – 360 p.

9. Investigation of solid-phase processes in mixtures of metakaolin and sodium hydroxide using isoconversion analysis / N. E. Gordina, V. Y. Prokofiev, A. P. Khramtsova [et al.] // Journal of Physical Chemistry. – 2018. – Vol. 92, No. 5. – P. 796–803. – DOI 10.7868/S0044453718050205.

10. Maryandyshev, P. A. Analysis of thermogravimetric data of various types of wood / P. A. Maryandyshev, A. A. Chernov, V. K. Lyubov // Chemistry of solid fuels. – 2015. – No. 2. – P. 59. – DOI 10.7868/S0023117715020085.

11. Speight, J. G. Lange's handbook of chemistry / J. G. Speight. – New York City: McGraw Hill Professional. – 2005. – 1623 p.

12. Salimgareeva, V. N. Thermal degradation and stabilization of polymethylmethacrylate / V. N. Salimgareeva, S. V. Kolesov // News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. – 2007. – Vol. 50, No. 7. – P. 3–11.

13. Thermo-oxidative degradation of cellulose fabric-acrylic copolymers compositions / A. A. Molodova, N. V. Volkova, D. N. Yemelyanov [et al.] // Journal of Applied Chemistry. – 2010. – Vol. 83, No. 11. – P. 1879–1884.

S. V. Borisov, Yu. N. Kamenev, A. B. Kochnov, M. A. Vaniev, I. A. Novakov

THERMO-OXIDATIVE DEGRADATION OF POLYMERS BASED ON A PHOSPHORUS-CONTAINING DIMETHACRYLATE MODIFIED WITH POLYVINYL BUTYRAL

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Sergey V. Borisov, borisov.volgograd@yandex.ru

Annotation. Based on the Ozawa-Flynn-Wall and Friedman isoconversion models, the values of the activation energy and the preexponential multiplier of the Arrhenius equation for the process of thermo-oxidative degradation of copolymers were calculated, which were obtained on the basis of di(1-methacryloxy-3-chloropropoxy-2-methylphosphonate, 2-hydroxypropylmethacrylate and polyvinyl butyral dissolved in them. It was established that an increase in the proportion of the phosphorus-containing dimethacrylate in the copolymer composition promotes the formation of more highly thermostable destruction products at the later stages of thermo-oxidation, shifting the processes into the diffusion-controlled region. The obtained calculation results can be used to predict the service life of products based on the studied materials.

Keywords: phosphorus-containing dimethacrylate, thermo-oxidative destruction, activation energy, the preexponential multiplier

Acknowledgments: Equipment from the Physicochemical Research Methods Center of Common Use at Volgograd State Technical University was used in this study.

Funding: This study was supported by Volgograd State Technical University (from funds under the Priority 2030 development program under agreement No. 075-15-2025-063) as part of research project No. 17/658-24.

For citation: Borisov S. V., Kamenev Yu. N., Kochnov A. B., Vaniev M. A., Novakov I. A. Thermo-oxidative degradation of polymers based on a phosphorus-containing dimethacrylate modified with polyvinyl butyral. Izvestiya VSTU. 2025; 12(307): 98–106. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-98-106.

Information about the authors:

Sergey V. Borisov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of CTEP of VSTU

e-mail: borisov.volgograd@yandex.ru

Yuri N. Kamenev – Postgraduate student of the Department of CTEP of VSTU

e-mail: kamenev45@mail.ru

Alexander B. Kochnov – engineer-researcher of VSTU

e-mail: koch@vstu.ru

Marat A. Vaniev – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of CTEP of VSTU

e-mail: vaniev@vstu.ru

Ivan A. Novakov – Academician of the RAS, Professor, Doctor of Chemical Sciences, Head of the Department of FAHP VSTU

e-mail: ianovakov@vstu.ru

Contribution of the authors:

Sergey V. Borisov – development and sample preparation of polymer samples, performing calculations, writing the text of the article.

Yuri N. Kamenev – performing calculations, literature review, editing the text of the article.

Alexander B. Kochnov – synthesis of di-(1-methacryloxy-3-chloro-2-propyl)methylphosphonate, editing the text of the article.

Marat A. Vaniev – formulation development, task assignment, editing the text of the article.

Ivan A. Novakov – formulation development, task assignment, editing the text of the article.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025, доработана 13.11.2025, подписана в печать 03.12.2025

The article was submitted 31.10.2025, revised 13.11.2025, accepted for publication 03.12.2025