

МЕХАНИКА

MECHANICS

Научная статья

УДК 533.72, 66.092-977

doi: 10.17223/19988621/94/6

**Пиролиз полимерных композиционных материалов
при воздействии теплового излучения****Владимир Афанасьевич Архипов¹, Николай Николаевич Золоторёв²,
Евгений Александрович Козлов³, Валерий Тихонович Кузнецов⁴***1, 2, 3, 4 Томский государственный университет, Томск, Россия**¹ leva@niipmm.tsu.ru**² nikzolotorev@mail.ru**³ leva@niipmm.tsu.ru**⁴ leva@niipmm.tsu.ru*

Аннотация. Представлены методика и результаты экспериментального исследования закономерностей пиролиза образцов двух типов полимерных композиционных материалов (органопластика и поликарбоната) при воздействии теплового излучения ксеноновой лампы. Получены значения энергии абляции для плотности лучистого теплового потока в диапазоне $(42 \div 105)$ Вт/см², рассчитанные по измеренной массовой скорости газификации образцов.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, тепловое излучение, пиролиз, энергия абляции, экспериментальное исследование

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Архипов В.А., Золоторёв Н.Н., Козлов Е.А., Кузнецов В.Т. Пиролиз полимерных композиционных материалов при воздействии теплового излучения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 94. С. 67–78. doi: 10.17223/19988621/94/6

Original article

**Pyrolysis of polymer composite materials
under thermal radiation effect****Vladimir A. Arkhipov¹, Nikolay N. Zolotorev²,
Evgeniy A. Kozlov³, Valeriy T. Kuznetsov⁴***1, 2, 3, 4 Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation**¹ leva@niipmm.tsu.ru*

² nikzolotorev@mail.ru

³ leva@niipmm.tsu.ru

⁴ leva@niipmm.tsu.ru

Abstract. The development of industries that actively use polymer composite materials leads to the accumulation of a large amount of waste in terms of spent products and their elements, resulting in serious environmental problems. This paper presents the method and results of an experimental study aimed at solving the urgent problem of recycling polymer composite materials. Recycling is implemented via pyrolysis induced by thermal radiation effect. The URAN-1 setup is used as a source of thermal radiation to generate a directed radiant heat flux of a given power on the sample under study. The experiments are carried using the polymer composite materials based on organoplastic and polycarbonate. The effect of heat flux density and exposure time on ablation rate and energy is revealed and analyzed. For the organoplastic material, the ablation energy decreases from 5.8 to 3.6 kJ/g with an increase in the heat flux density in the range $(42 \div 105)$ W/cm², and for the polycarbonate material, the ablation energy remains constant. The obtained results can be used to optimize the pyrolysis of polymer composite materials when solving the issues of recycling and reducing the volume of environmental pollution.

Keywords: polymer composite material, thermal radiation, pyrolysis, ablation energy, experimental study

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority 2030).

For citation: Arkhipov, V.A., Zolotorev, N.N., Kozlov, E.A., Kuznetsov, V.T. Pyrolysis of polymer composite materials under thermal radiation effect (2025) Pyrolysis of polymer composite materials under thermal radiation effect. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 94. pp. 67–78. doi: 10.17223/19988621/94/6

Введение

С появлением современных полимерных композиционных материалов (ПКМ) стало возможным создание легких, прочных и долговечных изделий, которые находят широкое применение в авиации, ракетно-космической технике, автомобилестроении, строительстве и в других областях промышленности. Изделия и детали из таких материалов после отработки и выполнения своих функций требуют утилизации для предотвращения негативных экологических последствий (образование космического мусора, загрязнение арктического побережья пластиковой тарой для завозимого горючего и оборудования, загрязнение Мирового океана микропластиками и т.д.). Из возможных методов утилизации наиболее распространенными и реализованными на промышленном уровне являются механические способы – измельчение, дробление, прессование и брикетирование твердых бытовых, строительных и промышленных отходов [1]. Особую сложность представляет собой утилизация ПКМ, армированных непрерывными волокнистыми наполнителями, такими как стекловолокно и некоторые марки углеродных волокон. Для таких ПКМ используют, как правило, термические методы утилизации – сжигание, пиролиз и газификацию [2, 3].

В настоящей работе представлены методика и результаты экспериментального исследования утилизации образцов ПКМ методом пиролиза при воздействии теплового излучения. Получены количественные характеристики процесса терми-

ческого разложения двух типов материалов в зависимости от плотности потока интегрального теплового излучения и времени облучения образца.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования по пиролизу выбранных ПКМ проводились на установке «УРАН-1» [4, 5], схема которой представлена на рис. 1.

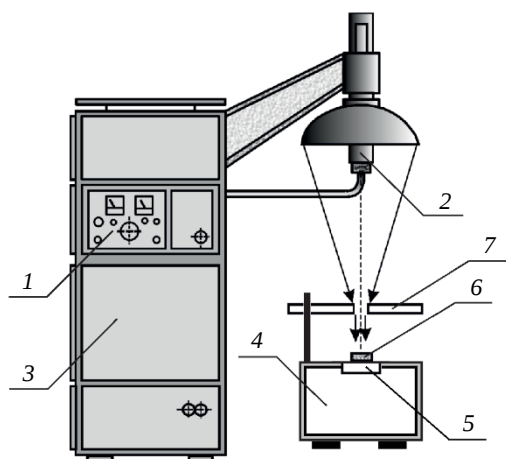


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «УРАН-1»:

1 – блок управления; 2 – ксеноновая лампа; 3 – блок питания; 4 – система регистрации; 5 – фиксатор образца; 6 – исследуемый образец; 7 – затвор

Fig. 1. Design of the “URAN-1” experimental setup:

1, control unit; 2, xenon lamp; 3, power supply; 4, registration system; 5, sample clamp; 6, sample under study; and 7, shutter

Экспериментальная установка состоит из блока управления 1, ксеноновой лампы с эллиптическим отражателем 2, блока питания 3, системы регистрации 4 и области проведения экспериментов – воздействия лучистого теплового потока на исследуемый образец. Блок управления 1 отвечает за подачу напряжения поджигающего импульса на ксеноновую лампу 2 марки ДКСР-10000 и плавную регулировку мощности излучения. Ксеноновая лампа размещается в первом фокусе отражателя, во втором фокусе создается увеличенная проекция поперечного сечения электрической дуги лампы. Блок питания 3 обеспечивает потребляемую мощность установки (20 кВт). Система регистрации состоит из датчика лучистого теплового потока, фотодиодов, реле времени и осциллографа. Эта система позволяет измерять плотность теплового потока, регистрировать время воздействия и фиксировать момент возникновения пламени, а также контролировать условия эксперимента. На рабочем столе в области проведения экспериментов, расположенном в плоскости второго фокуса эллиптического отражателя, находится фиксатор образца 5 с защитным экраном, в который закреплен исследуемый образец ПКМ 6. Для подачи теплового излучения на образец в течение заданного промежутка времени Δt использовался затвор 7, шторки которого приводятся в движение с помощью электропривода. Заслонка защищает ослабители и лепестки затвора от перегрева при включении лампы и во время достижения заданного режима работы. Центральный затвор имеет две шторки, приводимые в движение с помощью электромагнитов.

Распределение интенсивности излучения $\bar{I}_\lambda = I_\lambda / I_{\lambda \max}$ ксеноновой лампы в зависимости от длины волны излучения λ представлено на рис. 2 [4].

Интенсивность излучения в ультрафиолетовой области ($\lambda < 0.38$ мкм) составляет 0.5 кВт (9%), в видимой области ($0.38 < \lambda < 0.78$ мкм) – 2 кВт (36%), в инфра-

красной области ($\lambda > 0.78$ мкм) – 3 кВт (55%). Установка обеспечивала стабильность излучения во времени не ниже 95% и равномерное распределение лучистого теплового потока в пятне диаметром 10 мм не ниже 90%. Максимальная мощность излучения, падающая на образец, составляла ~ 0.6 кВт и соответствовала интегральному излучению абсолютно черного тела при температуре $\sim 3\,110$ К (см. рис. 2). Отклонение от фокальной плоскости по оптической оси на расстояние 1 мм вызывает изменение плотности лучистого теплового потока не более чем на 5%.

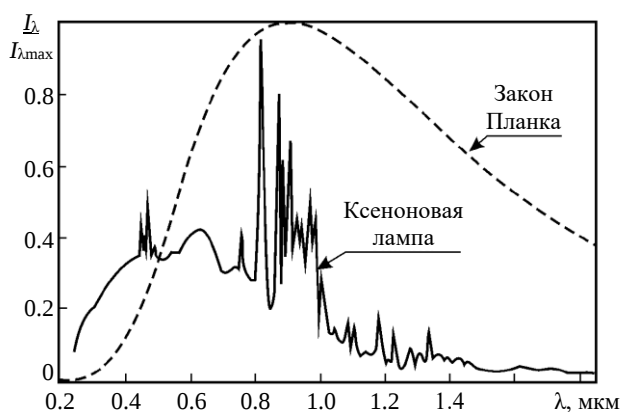


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения ксеноновой лампы по спектру

Fig. 2. Spectral distribution of the xenon lamp radiation

При проведении экспериментов проводилась скоростная видеосъемка процесса пиролиза, а также измерялась скорость пиролиза в зависимости от интенсивности теплового излучения и времени экспозиции.

Методика проведения экспериментов

Плотность теплового потока излучения при проведении экспериментов варьировала в диапазоне $q = (42 \div 105)$ Вт/см², а время воздействия теплового излучения Δt изменялось от 3.1 до 15.2 с. Необходимые значения плотности лучистого теплового потока в фокальном пятне получены с использованием ослабителей излучения и постепенного изменения электрической мощности напряжения, подаваемого на ксеноновую лампу. Интенсивность теплового потока излучения, действующего на образец, измерялась калориметрическим методом.

Калориметр представляет собой медный диск (диаметр 10 мм, высота 3 мм, масса 1.49 г), в который впаяна медь-константановая термопара диаметром 0.15 мм. Облучаемая поверхность калориметра покрыта тонким слоем ламповой сажи для снижения коэффициента отражения теплового излучения $k_0 \approx 0$ [6]. Плотность потока излучения рассчитывалась по формуле [7] для измеренной в эксперименте скорости нагрева $\Delta T / \Delta t$ медного диска:

$$q = \frac{mc}{(1-k_0)S} \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (1)$$

где m – масса диска, c – удельная теплоемкость меди, k_0 – коэффициент отражения, S – площадь облучаемой поверхности диска, ΔT – изменение температуры за время Δt .

После проведения градуировки калориметра проводилась серия экспериментов по облучению образцов ПКМ.

Величина массовой скорости пиролиза на единицу облучаемой поверхности определялась по формуле

$$M = \frac{M_0 - M_1}{tS} = \frac{\Delta M}{tS}, \quad (2)$$

где M_0 – начальная масса образца, M_1 – масса образца после опыта, Δt – время облучения, S – площадь облучаемой поверхности образца.

Время облучения Δt выбиралось на участке равномерного нарастания ΔM на графике: $t_1 < t < t_2$ (см. ниже рис. 3). Масса исследуемого образца ПКМ измерялась до облучения и после воздействия лучистого теплового потока с помощью электронных весов марки AND GX-200 с классом точности II и погрешностью измерения 0.001 г. Для каждого типа образца ПКМ проводились пять дублирующих измерений и их статистическая обработка.

Линейную скорость газификации определяли на стационарном участке процесса, фиксируя массу образца за конкретный временной интервал.

$$u = \frac{M}{\rho}, \quad (3)$$

где ρ – плотность исследуемого материала.

Необходимая для начала газификации энергия (энергия абляции) рассчитывалась с использованием формулы [8]

$$E = q \cdot S \frac{(1-k)t}{\Delta M}, \quad (4)$$

где k – коэффициент отражения поверхности исследуемого образца.

Усредненный коэффициент отражения исследуемых ПКМ измеряли на шаровом фотоэлектрическом фотометре ФМШ-56М в диапазоне длин волн $(0.36 \div 1.1)$ мкм. Погрешность измерения коэффициента отражения не превышает 1%.

Результаты исследований

Выбор полимерных композиционных материалов в качестве объекта исследования проводился совместно со специалистами Омского государственного технического университета [9]. Для экспериментов было выбрано два типа перспективных полимерных композиционных материалов: органопластик на основе пара-арамидной ткани с эпоксидным связующим ЭДТ-10, тип образца ПКМ (ОП), и поликарбонат марки РС-022 с углеродными добавками, тип образца ПКМ (ПК). Выбранные материалы рекомендованы как наиболее применяемые для конструктивных элементов в промышленности, ракетно-космической области и не уступают по своим характеристикам традиционно используемым сплавам алюминия. Для проведения эксперимента из предоставленных пластин ПКМ были изготовлены образцы с диаметром 10 мм. В табл. 1 приведены толщина исследуемых образцов h , значения плотности ρ , удельной теплоемкости c , коэффициента теплопроводности при 25°C $\lambda_{\text{ПКМ}}$ и измеренные усредненные коэффициенты отражения образцов k .

С учетом энергетических характеристик ксеноновой лампы ДКсР-10000 получены усредненные коэффициенты отражения образцов ПКМ. Характеристики исследуемых образцов ПКМ также приведены в табл. 1.

Характеристики исследуемых ПКМ

Тип образца	h , мм	ρ , г/см ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	k
ПКМ (ОП)	1	1.06	1 200	0.154	0.33
ПКМ (ПК)	2	1.23	1 260	0.304	0.11

Типичная зависимость потери массы образца ΔM от времени воздействия тепловым излучением приведена на рис. 3.

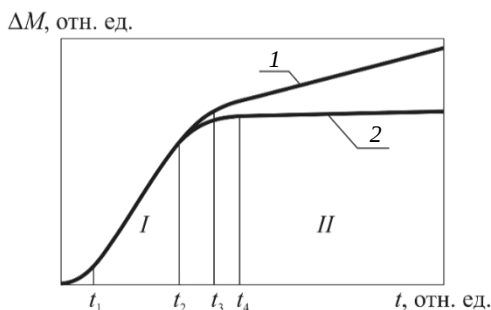


Рис. 3. Зависимость потери массы от времени облучения для полимеров:

1 – режим без затухания образца; 2 – режим с затуханием образца

Fig. 3. Dependence of the mass loss on the irradiation time for polymers in the mode (1) without and (2) with sample attenuation

На рис. 3 отмечены следующие времена процесса: t_1 – время нестационарной абляции, t_2 – время абляции ПКМ до образования коксового слоя, t_3 – время нарастания коксового слоя, t_4 – время до начала режима равновесия между подводом энергии и ее диссипацией [8].

Видно, что по достижении времени t_4 наблюдается равновесие между подводом энергии и ее отводом за счет конвекции, теплопроводности и т.д. Толщина коксового слоя уже не нарастает, он остается раскаленным. Такой режим можно назвать режимом самостабилизации абляции с затуханием. В этом режиме коксовый слой увеличивается за счет нарастания до момента времени t_4 . В режиме самостабилизации абляции происходит равномерное движение фронта химической реакции вглубь образца, что приводит к образованию коксового слоя и его равномерному уносу.

Рассмотрим результаты исследования пиролиза рассматриваемых ПКМ при воздействии теплового потока. На рис. 4, 5 приведены фотографии исходных образцов и образцов после воздействия лучистой энергией. Глубина коксового слоя ($l = u_1 t$) увеличивается с ростом плотности теплового потока и времени его воздействия на образец ПКМ. Видно, что при значении плотности теплового потока $q > 70$ Вт/см² и времени экспозиции ~ 6 с образец из ПКМ (ОП) толщиной 1 мм разрушается практически полностью.

Необходимо отметить, что для каждого конкретного полимера и определенной плотности мощности лазерного излучения существуют строгие кинетические закономерности, определяющие соотношение между скоростью нарастания и удаления коксового слоя. Так, при воздействии излучения $q < 50$ Вт/см² на образцы из поликарбоната образование коксового слоя нарастает (увеличивается) до 3 и более

миллиметров. При увеличении мощности теплового потока излучения до $q > 200 \text{ Вт/см}^2$ образование коксового слоя на поверхности не наблюдается, так как скорость его формирования равна или меньше скорости абляции в результате сублимации [10]. Теплофизические параметры, связанные с морфологией и структурой пор кокса (размер, замкнутость или открытость и т.д.), оказывают значительное влияние на скорость нарастания коксового слоя и его изолирующие от излучения свойства. Такие параметры необходимо учитывать при измерении абляционной стойкости.

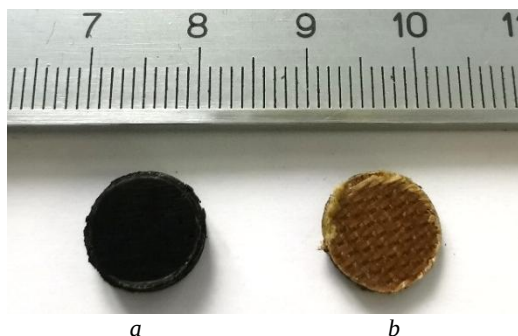


Рис. 4. Фотография исходных образцов из ПКМ (ПК) (a) и ПКМ (ОП) (b)
Fig. 4. Photo of the initial samples made of (a) PCM (PC) and (b) PCM (OP)



Рис. 5. Фотографии образцов ПКМ (ПК) (a) и ПКМ (ОП) (b)
после воздействия лучистого теплового потока
Fig. 5. Photos of the samples made of (a) PCM (PC) and (b) PCM (OP)
after exposure to a radiant heat flux

С учетом суммарной потери массы ΔM , времени экспозиции Δt , величины поглощенной энергии излучения были рассчитаны значения энергии абляции E , величина которой характеризует затраты для газификации единицы массы в установившемся режиме разрушения ПКМ. Результаты оценочных расчетов E по формуле (4) для ПКМ (ОП) и ПКМ (ПК) приведены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2

Значения энергии абляции ПКМ при воздействии лучистой энергии в среде воздуха

q , Вт/см ²	ПКМ (ОП)		ПКМ (ПК)	
	u , см/с	E , кДж/г	u , см/с	E , кДж/г
42	$(3.9 \pm 1.3) \cdot 10^{-3}$	5.8 ± 0.5	$(5.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	5.2 ± 0.2
70	$(7.1 \pm 2.5) \cdot 10^{-3}$	5.4 ± 0.6	$(10.1 \pm 1.1) \cdot 10^{-3}$	5.1 ± 0.2
105	$(16.0 \pm 6.5) \cdot 10^{-3}$	3.6 ± 0.6	$(14.2 \pm 3.9) \cdot 10^{-3}$	5.1 ± 0.2

Результаты оценки необходимой энергии для разрушения исследуемых в настоящей работе ПКМ достаточно хорошо согласуются с численными оценками энергии разрушения головного обтекателя ракеты-носителя «Союз-2.16», приведенными в работе [11].

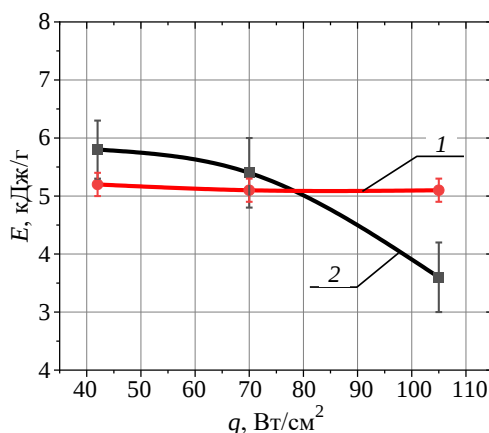


Рис. 6. Зависимость энергии абляции ПКМ от плотности теплового потока:

1 – образец ПКМ (ПК); 2 – образец ПКМ (ОП)

Fig. 6. Ablation energy of the PCM as a function of the heat flux density:

(1) PCM (PC) and (2) PCM (OP) samples

Необходимо отметить, что значения E не являются постоянными при изменении интенсивности воздействующего излучения: при увеличении плотности теплового потока значения E уменьшаются и стабилизируются. Изменения величины E могут быть связаны с дополнительными затратами энергии на прогрев полимера при длительном облучении и низкой плотности мощности (увеличение конвективных теплопотерь и отток через теплопроводность). При $q > 40$ Вт/см² доля энергии на нагрев полимерного образца сильно снижается [12, 13].

Расчет величины E включает в себя учет потери массы за счет суммарного воздействия множества процессов. К таким процессам могут относиться рост конверсии мономеров с выделением низкомолекулярных продуктов, разрывы главных и

боковых цепей, деполимеризация, унос фрагментов и олигомерных продуктов и т.д. При определении конечной энергии абляции полимера необходимо учитывать и минимизировать потери энергии за счет конвекции, переизлучения и других факторов.

При воздействии теплового потока на композиционные материалы в воздушной среде может начаться процесс горения, который усиливает и усложняет процесс разрушения [14]. Разрушение перестает быть чем-то поверхностным и может достигать глубоких слоев. Появление пламени у поверхности образца наблюдалось в опытах при пиролизе на воздухе исследуемых композиций ПКМ (ОП) и ПКМ (ПК). Однако свечение пламени слабое, и после окончания внешнего теплового воздействия горение образца прекращалось. По-видимому, прекращение горения образца связано с образованием коксового слоя на его поверхности, который выполняет роль защитного экрана [15].

Заключение

Анализ полученных результатов показал, что с ростом теплового потока увеличиваются потеря массы вещества и линейная скорость пиролиза. При увеличении времени экспозиции от 3 до 15 с линейная скорость пиролиза, как правило, снижается в связи с появлением на поверхности образца коксового слоя, который экранирует лучистый тепловой поток и затрудняет выход газообразных продуктов пиролиза из глубоких слоев образцов ПКМ.

Получено, что образцы органопластика на основе пара-aramидной ткани и эпоксидного связующего ЭДТ-10 имеют наименьшие временные затраты до полного сгорания (включая армирующие арамидные волокна), что соответствует и меньшим энергетическим затратам на сжигание по сравнению с образцами из поликарбоната.

Показано, что для материала из органопластика происходит снижение значения энергии абляции от 5.8 до 3.6 кДж/г при увеличении плотности теплового потока в диапазоне $(42 \div 105) \text{ Вт/см}^2$, а для материала из поликарбоната значение энергии абляции оставалось постоянным.

Результаты оценки необходимой энергии для разрушения исследуемых ПКМ достаточно хорошо совпадают с численной оценкой энергии разрушения головного обтекателя ракеты-носителя «Союз-2.1б», приведенной в работе [11].

Список источников

1. Петров А.В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 8. С. 60–71.
2. Клинков А.С., Беляев П.С., Однолько В.Г., Соколов М.В., Макеев П.В., Шашков И.В. Утилизация и переработка твердых бытовых отходов : учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2015. 188 с.
3. Трушляков В.И., Федюхин А.В., Давыдович Д.Ю. Разработка комплексной теоретико-экспериментальной методики оценки параметров утилизации методом пиролиза полимерных композиционных материалов на основе поликарбоната и полиэтилена // Химическая физика. 2024. Т. 43, № 4. С. 97–109. doi: 10.31857/S0207401X24040126
4. Лопатина Г.Г., Сасоров В.П., Спицын Б.В., Федосеев А.В. Оптические печи. М.: Металлургия, 1969. 215 с.

5. Basalaev S.A., Kuznetsov V.T., Rashkovskiy S.A. Pyrolysis of boron-containing compositions upon exposure to radiant energy // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. V. 2233. Art. 012011. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2233/1/012011
6. Михеев В.Ф., Ковальский А.А., Хлевной С.С. Зажигание баллиститного пороха световым излучением // *Физика горения и взрыва*. 1968. Т. 4, № 1. С. 3–9.
7. Архипов В.А., Жарова И.К., Гольдин В.Д., Куриленко Н.И., Мамонтов Г.Я. Анализ нестационарного метода измерения интегрального коэффициента излучения // *Теплофизика и аэромеханика*. 2012. Т. 19, № 6. С. 751–760.
8. Саид-Галиев Э.Е., Никитин Л.Н. Абляция полимеров и композитов под действием излучения CO₂-лазера (обзор) // *Механика композитных материалов*. 1992. № 2. С. 152–171.
9. Трушляков В.И., Русских Г.С., Давыдович Д.Ю. и др. Способ разработки полимерного композиционного материала с учетом его последующей утилизации и устройство для его реализации : пат. № 2776312 РФ, C08J 5/04 (2021.08), C08L 23/18 (2021.08). Оpubл. 18.07.2022.
10. Красовский А.М., Толстомятов Е.М. Использование лазерного излучения для формирования полимерных пленок в вакууме на поверхности твердого тела // *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1985. № 1. С. 143–149.
11. Лемперт Д.Б., Трушляков В.И., Зарко В.Е. Оценка массы пиротехнической смеси для сжигания головного обтекателя космической ракеты // *Физика горения и взрыва*. 2015. Т. 51, № 5. С. 121–125. doi: 10.15372/FGV20150514
12. Длугоунович В.А., Снопко В.И. Поведение коэффициента отражения текстолитов при лазерном нагревании // *Инженерно-физический журнал*. 1987. Т. 53, № 2. С. 258–264.
13. Бычков С.Г., Ксандопуло Г.И., Десятков А.В., Бикетов А.А. Разрушение композитных полимерных материалов под действием излучения непрерывного CO₂-лазера // *Механика композитных материалов*. 1985. № 3. С. 547–549.
14. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981. 280 с.
15. Бычков С.Г. Макрокинетика лазерного разрушения эпоксидных композиций: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Тбилиси, 1986. 24 с.

References

1. Petrov A.V., Doriomedov M.S., Skripachev S.Yu. (2015) Tekhnologii utilizatsii polimernykh kompozitsionnykh materialov (obzor) [Technologies for recycling polymer composite materials (a review)]. *Trudy VIAM – Proceedings of VIAM*. 8. pp. 60–71.
2. Klinkov A.S., Belyaev P.S., Odnolkov V.G., Sokolov M.V., Makeev P.V., Shashkov I.V. (2015) *Utilizatsiya i pererabotka bol'shogo kolichestva otkhodov: uchebnoe posobie* [Recovery and processing of solid domestic waste: a textbook]. Tambov: TSTU Publishing House.
3. Trushlyakov V.I., Fedyukhin A.V., Davydovich D.Yu. (2024) Development of a comprehensive theoretical and experimental methodology for evaluating the parameters of recycling by the pyrolysis of plastic based on polycarbonate and polyethylene. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 18. pp. 582–591. doi: 10.1134/S1990793124020325
4. Lopatina G.G., Sazorov V.P., Spitsyn B.V., Fedoseev A.V. (1969) *Opticheskie pechi* [Optical furnaces]. Moscow: Metallurgiya.
5. Basalaev S.A., Kuznetsov V.T., Rashkovskiy S.A. (2022) Pyrolysis of boron-containing compositions upon exposure to radiant energy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2233. Article 012011. pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2233/1/012011
6. Mikheev V.F., Koval'skii A.A., Khlevnoy S.S. (1968) Ignition of a ballistite propellant by light radiation. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 4. pp. 1–4. doi: 10.1007/BF00843062
7. Arkhipov V.A., Zharova I.K., Gol'din V.D., Kurilenko N.I., Mamontov G.Ya. (2012) Analiz nestatsionarnogo metoda izmereniya integral'nogo koeffitsienta izlucheniya [Analysis of a non-stationary method for measuring the integral radiation coefficient]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*. 19(6). pp. 751–760.

8. Said-Galiev E.E., Nikitin L.N. (1992) Ablation of polymers and composites when exposed to CO₂ laser radiation (review). *Mechanics of Composite Materials*. 28. pp. 97–114. doi: 10.1007/BF00613315
9. Trushlyakov V.I., Russkikh G.S., Davydovich D.Yu., Iordan Y.V., Fateev P.D. (2022) *Sposob razrabotki polimernogo kompozitsionnogo materiala s uchyotom ego posleduyushchey utilizatsii i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method for developing a polymer composite material that accounts for subsequent disposal and an apparatus for its implementation]. RF Patent 2776312.
10. Krasovskiy A.M., Tolstopyatov E.M. (1985) Ispol'zovanie lazernogo izlucheniya dlya formirovaniya polimernykh plyonok na poverkhnosti tverdogo tela [Application of laser radiation to form polymer films on the surface of a solid]. *Poverkhnost'. Fizika, khimiya, mekhanika – Physics, Chemistry and Mechanics of Surfaces*. 1. pp. 143–149.
11. Lempert D.B., Trushlyakov V.I., Zarko V.E. (2015) Estimating the mass of a pyrotechnic mixture for burning the launch vehicle nose fairing. *Combustion Explosion and Shock Waves*. 51(5). pp. 121–125. doi: 10.15372/FGV20150514
12. Dlugunovich V.A., Snopko V.N. (1987) Behavior of the reflection coefficients of textolites under laser heating. *Journal of Engineering Physics*. 53. pp. 928–932. doi: 10.1007/BF00872419
13. Bychkov S.G., Ksandopulo G.I., Desyatkov A.V., Biketov A.A. (1985) Razrushenie kompozitnykh polimernykh materialov pod deystviem izlucheniya nepreryvnogo CO₂-lazera [Destruction of composite polymer materials under the influence of continuous CO₂-laser radiation]. *Mekhanika kompozitnykh materialov – Mechanics of Composite Materials*. 3. pp. 547–549.
14. Aseeva R.M., Zaykov G.E. (1981) *Gorenie polimernykh materialov* [Combustion of polymeric materials]. Moscow: Nauka.
15. Bychkov S.G. (1986) *Makrokinetika lazernogo razrusheniya epoksidnykh kompozitsiy* [Macrokinetics of laser destruction of epoxy compositions]. Dissertation abstract. Tbilisi State University.

Сведения об авторах:

Архипов Владимир Афанасьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом газовой динамики и физики взрыва Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Золоторёв Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: nikzolotorev@mail.ru

Козлов Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Кузнецов Валерий Тихонович – кандидат технических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Information about the authors:

Arkhipov Vladimir A. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Zolotorev Nikolay N. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: nikzolotorev@mail.ru

Kozlov Evgeniy A. (Doctor of Technical Sciences, Professor, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Kuznetsov Valeriy T. (Candidate of Technical Sciences, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 13.12.2024; принята к публикации 10.04.2025

The article was submitted 13.12.2024; accepted for publication 10.04.2025