

**ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ РАЗЛОЖЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ В ПОЛЕ ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**  
**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF BREAKDOWN PROCESSES  
IN COMPOSITES EXPOSED TO HIGH-INTENSITY LASER FIELDS**

*А. Э. Запонов<sup>1\*</sup>, М. В. Сахаров<sup>1</sup>, В. А. Глазунов<sup>2</sup>, Р. А. Тришин<sup>2</sup>, В. А. Мазанов<sup>2</sup>, С. В. Маркин<sup>2</sup>,  
В. В. Кокшаров<sup>2</sup>, А. С. Мелёхин<sup>2</sup>, А. В. Суренко<sup>2</sup>*

*A. E. Zaponov<sup>1\*</sup>, M. V. Sakharov<sup>1</sup>, V. A. Glazunov<sup>2</sup>, P. A. Trishin<sup>2</sup>, V. A. Mazanov<sup>2</sup>,  
S. V. Markin<sup>2</sup>, V. V. Koksharov<sup>2</sup>, A. S. Melekhin<sup>2</sup>, A. V. Sirenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Военная Академия РВСН им. Петра Великого, 143900 г. Балашиха Московской обл., ул. Карбышева д. 8  
<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

<sup>1</sup>Peter the Great SRF Military Academy, 8 Karbyshev Street, Balashikha, Moscow Region 143900

<sup>2</sup>Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

<sup>\*</sup>[nopaz@mail.ru](mailto:nopaz@mail.ru)

Статья посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов разложения композиционных материалов в поле непрерывного лазерного излучения. Описаны оптические схемы проведения экспериментальных исследований и математическая модель разрушения композиционных материалов в поле лазерного излучения. Проведена верификация разработанной математической модели для модифицированного низкомолекулярного полимера Стиросил. Установлено, что максимальная относительная погрешность не превышает 10 %.

This paper deals with theoretical and experimental studies of breakdown processes in composites exposed to continuous laser fields. Optical layouts for experimental studies and the mathematical model of laser-induced breakdown of composites are described. The mathematical model has been verified for the case of modified low-molecular polymer Styrosil. The maximum relative error has been found not to exceed 10 percent.

В настоящее время композиционные материалы (КМ) имеют широкое применение. Чаще всего они используются в качестве теплозащитных материалов корпусов космических аппаратов (КА) для защиты от нагрева, имеющего место при движении в плотных слоях атмосферы. Оптимизация толщины теплозащитного покрытия (ТЗП) очень важна, поскольку уменьшение толщины ТЗП ведет к уменьшению массы корпуса КА, а следовательно, к возможности увеличения массы приборного отсека. Для моделирования тепловых нагрузок, характерных для КА при входе в плотные слои атмосферы, в лабораторных условиях используются мощные непрерывные лазеры. Поэтому задача исследования процессов взаимодействия непрерывного лазерного излучения (ЛИ) с КМ [1–4] является весьма актуальной.

Целью данной работы являлось исследование процессов нагрева, разложения и уноса массы КМ на примере модифицированного низкомолекулярного полимера (МНП) Стиросил в поле непрерыв-

ного интенсивного ЛИ и выявление закономерностей протекающих при этом физико-химических процессов.

Экспериментальные исследования проведены в два этапа. Эксперименты первого этапа были направлены на определение температурного поля в МНП Стиросил. Целью экспериментов второго этапа являлось определение скорости потери массы для расчета констант химических реакций.

Оптическая схема экспериментальной установки, используемой при проведении исследований первого этапа показана на рис. 1.

Выходной лазерный пучок волоконного лазера проходил через телескопическую систему линз, расширялся до необходимых размеров и падал на исследуемых образцы. В опытах в оптическую схему дополнительно устанавливалась ограничивающая диафрагма для формирования в плоскости образца пучка ЛИ с равномерным распределением интенсивности в пятне.

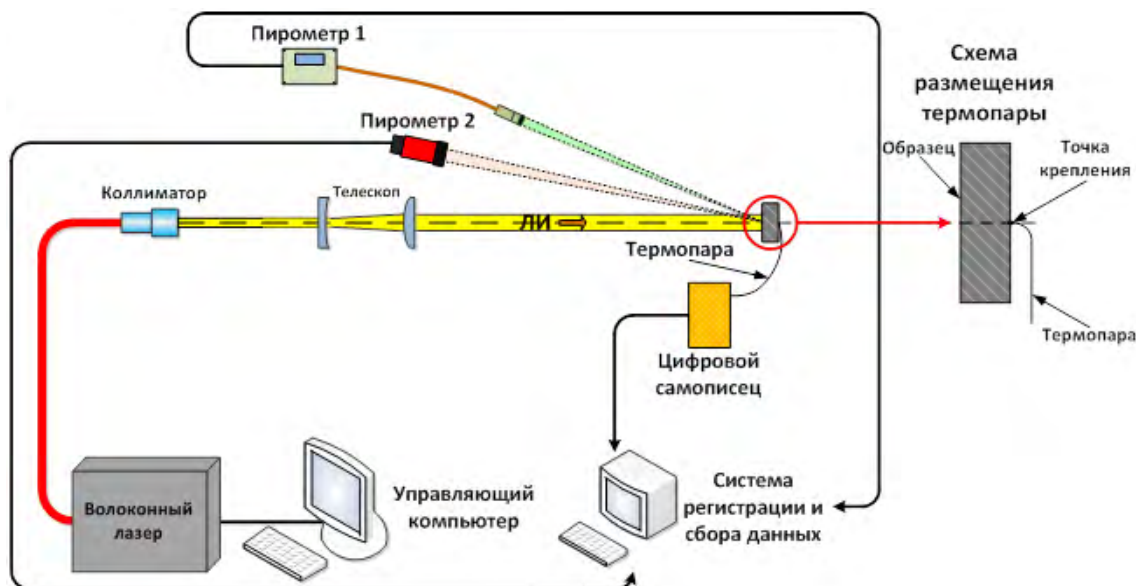


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки, используемой при проведении исследований первого этапа

Энергия ЛЛ измерялась измерителем энергии *Ophir*. Юстировка схемы осуществлялась по излучению пилотного лазера, соосного силовому ЛЛ.

Температура лицевой поверхности образца в зоне воздействия ЛЛ измерялась при помощи двух яркостных пирометров, а на тыльной поверхности образца в зоне воздействия – при помощи термопар. Усиление аналоговых электрических сигналов термопар, преобразование их в цифровой код и последующая регистрация выходных сигналов осуществлялось с помощью цифрового регистратора. Полученные экспериментальные данные записывались и сохранялись в памяти компьютерной рабочей станции при помощи системы автоматизированного сбора данных.

Плотность мощности ЛЛ на образце вычислялась по формуле:

$$q_{eff} = \frac{P_{0,9}}{S_{0,9}}, \quad (1)$$

где  $P_{0,9}$  – мощность ЛЛ на образце по уровню 0,9;  $S_{0,9}$  – площадь пятна ЛЛ по уровню 0,9.

Оптическая схема экспериментальной установки, используемой при проведении исследований второго этапа показана на рис. 2. Юстировка схемы осуществлялась по излучению пилотного лазера, встроенного в волоконный лазер. Выходной лазерный пучок волоконного лазера проходил через линзу, расширялся до необходимых размеров и падал на исследуемый образец.

Средняя плотность мощности ЛЛ на образце определялась по формуле (1).

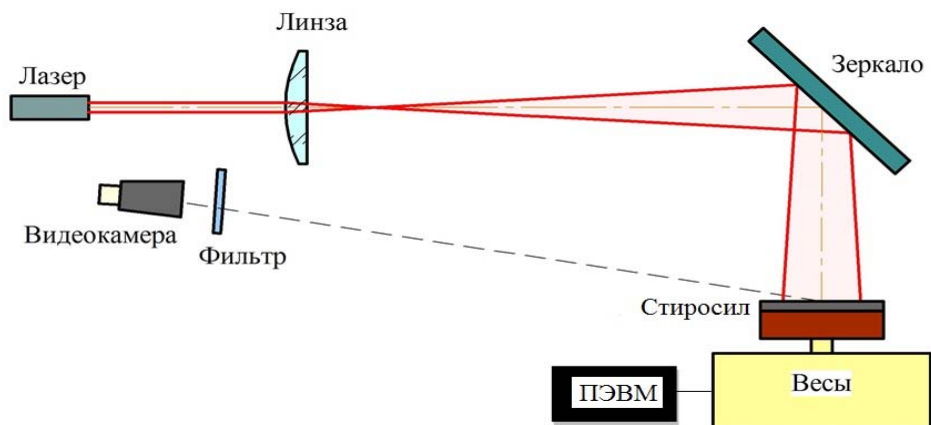


Рис. 2. Оптическая схема экспериментальной установки, используемой при проведении исследований второго этапа

Для определения значения  $S$  до пусков в место крепления облучаемого образца устанавливался анализатор профиля пучка ЛИ Spiricon, с использованием которого снимался профиль лазерного пучка при мощности ЛИ в плоскости образца  $P = 250$  Вт. Распределение энергии ЛИ в пятне облучения подчинялось закону Гаусса и аппроксимировалось формулой:

$$q(r) = \frac{-P \exp(-r^2 / r_0^2)}{\pi r_0^2}, \quad r_0^2 = \frac{r_n^2}{\ln(0,1)}, \quad (2)$$

где  $r_n$  – радиус пятна ЛИ в плоскости образца;  $r$  – расстояние от центра пятна облучения.

В ходе экспериментов проводилось измерение массы образцов во время воздействия ЛИ. Для этого образцы устанавливались на аналитические весы, подключенные к ПЭВМ. Показания весов с частотой от 1 до 10 Гц в зависимости от скорости уноса массы передавались в ПЭВМ. Полученные данные в дальнейшем использовались для построения зависимостей уноса массы образца от времени облучения.

Для определения пороговой плотности мощности ЛИ, при которой происходят характерные повреждения МНП Стиросил, образцы разрезались поперек по оси воздействия ЛИ и проводилась съемка разреза при помощи цифрового микроскопа. Далее снимки обрабатывались с использованием программного продукта, предназначенного для анализа графических файлов, с целью определения размера зоны характерного повреждения. Для сопоставления уноса материала на изображении зоны повреждения накладывался график распределения плотности мощности ЛИ в пятне, полученный по выражению (2). На рис. 3 приведен разрез кратера, образовавшегося в образце МНП Стиросил после облучения ЛИ с плотностью мощности  $q_{\text{ср}} = 700$  Вт/см<sup>2</sup>, и наложенного

на него графика распределения плотности мощности  $q(r)$  в области воздействия.

Расчетная модель взаимодействия непрерывного ЛИ с МНП Стиросил, используемая для описания теплового воздействия ЛИ на МНП Стиросил, базируется на известных уравнениях сохранения в многокомпонентных средах [3, 4]. В расчетной модели учтены следующие процессы: объемное поглощение КМ; пиролиз связующего; конвективное охлаждение газообразными продуктами пиролиза поверхностных слоев материала; химические реакции между стеклянным наполнителем и коксовым остатком; лучистая теплопроводность; поглощение ЛИ в продуктах термодеструкции материала; зависимость теплофизических характеристик материала от температуры и скорости нагрева.

Нагрев КМ ЛИ с учетом указанных процессов описывается нестационарным уравнением теплопроводности:

$$\rho(T, n_i) c(T, n_i) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T, n_i) \frac{\partial T}{\partial x} - c_g G(T) T \right) + W_{\text{хим}}(T) + W_{\text{ЛИ}}(T), \quad (3)$$

где  $\rho(T, n_i)$ ,  $c(T, n_i)$ ,  $\lambda(T, n_i)$  – плотность, теплоемкость и теплопроводность материала, зависящие от температуры;  $n_i$  – массовая доля кокса, наполнителя и связующего ( $i$  – кокс, нап, связ);  $c_g$  – теплоемкость газа;  $G(T)$  – расход газообразных продуктов термического разложения;  $W_{\text{хим}}(T)$  – объемный источник, характеризующий энергию затраченную на химические реакции;  $W_{\text{ЛИ}}(T)$  – объемный источник поглощенной энергии ЛИ,

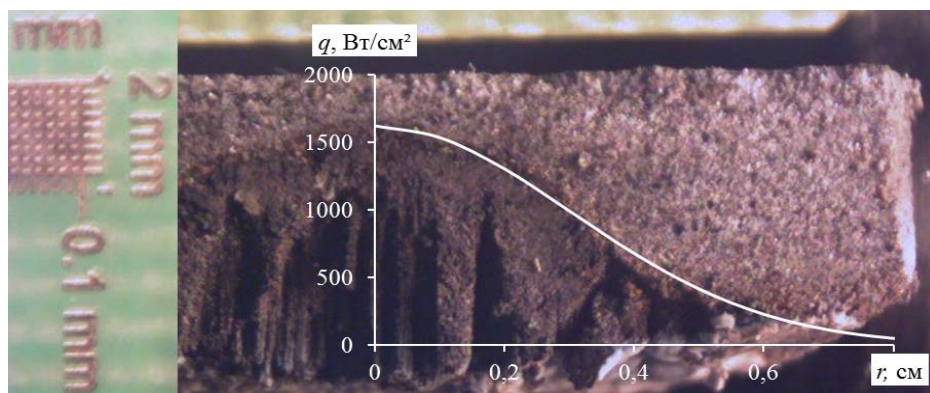


Рис. 3. Разрез кратера, образовавшегося в образце МНП Стиросил после облучения ЛИ, и распределение плотности мощности ЛИ в области воздействия

определяемый по закону Бугера с учетом отражения и поглощения излучения в продуктах терморазрушения материала:

$$W_{\text{ЛИ}}(T) = q_0(1 - R_0(T))(1 - \theta(T)) \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right), \quad (4)$$

где  $q_0$  – плотность мощности падающего ЛИ;  $R_0(T)$  – коэффициент отражения ЛИ поверхностью материала;  $\theta(T)$  – коэффициент, учитывающий ослабление ЛИ в продуктах терморазрушения КМ, зависящий от массовой скорости уноса материала;  $\delta$  – глубина проникновения ЛИ.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda(T, n_i)$  в (2) является функцией температуры, а также состава материала, изменяющегося в ходе химических реакций. При высоких температурах необходимо учитывать не только изменение с температурой теплопроводности твердого каркаса, но и перенос тепла излучением [5]. При этом эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda(T, n_i)$  является суммой коэффициента теплопроводности  $\lambda_T(T, n_i)$  и коэффициента лучистой теплопроводности  $\lambda_{\text{Л}}(T)$  [3]:

$$\lambda(T, n_i) = (1 - \Pi(T))\lambda_T(T, n_i) + \Pi(T)\lambda_{\text{Л}}(T), \quad (5)$$

где  $\Pi(T)$  – пористость материала;  $\lambda_{\text{Л}}(T) = 2\varepsilon^2\sigma T^3 h$ ;  $\varepsilon$  – степень черноты;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $h$  – характерный размер пор [4, 6].

Расход газообразных продуктов  $G(T)$  определяется из уравнения непрерывности с общепринятыми допущениями [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\Pi(T)\rho_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\Pi(T)\rho_g v_g) = \\ = -\frac{\partial}{\partial x}(\Pi(T)j_g(T)) + w_g(T), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Pi(T)$  – пористость материала;  $j_g(T)$  – диффузионный поток газов;  $w_g(T)$  – массовая скорость образования химических компонентов в результате реакций, отнесенных к единице объема пористой среды.

Первое допущение в модели заключается в том, что пренебрегается гидравлическим сопротивлением пористого каркаса, возможностью накопления газа внутри пор:  $\frac{\partial}{\partial t}(\Pi\rho_g) = 0$ . Второе

допущение – процесс диффузии не учитывается, так как скорость диффузионных потоков существенно меньше скорости газа по направлению к внешней поверхности. С учетом принятых допущений и выражения  $w_g(T) = -\frac{\partial\rho}{\partial t}$ . Проинтегрировав его по  $L$  получим:

$$G(T) = \Pi(T)\rho_g v_g = -\int_L^x \frac{\partial\rho}{\partial x} dx, \quad (7)$$

где  $L$  – толщина образца.

Изменение плотности разлагающегося вещества с учетом пиролиза и химических реакций, используемое в расчетной модели, описывается уравнением:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = (\rho_K - \rho)B \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (8)$$

где  $B$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_a$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\rho_K$  – плотность кокса.

При достижении температуры начала уноса  $T_{\text{ун}}$  начинается унос с поверхности материала. Для определения скорости уноса массы используется уравнение Кнудсена – Ленгмюра [8]:

$$G(T) = a \frac{P^{\text{H}} - P_v}{\sqrt{2\pi \frac{R}{M} T}}, \quad (9)$$

где  $a$  – коэффициент аккомодации (физический смысл которого – доля задерживающих столкновений молекул газа с твердой поверхностью);  $M$  – молекулярная масса паров;  $P^{\text{H}}$  – давление насыщенного пара;  $P_v$  – парциальное давление испаряющихся компонентов.

Полная скорость сублимации углерода определяется как сумма скоростей сублимации отдельных соединений углерода (C, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>), рассчитанных по кинетическому уравнению Кнудсена – Ленгмюра (8). При этом необходимо задавать коэффициенты аккомодации для каждого из соединений.

Расчеты выполнены как в собственном программном продукте, так и в пакете программ ЛОГОС [9]. Результаты расчетов различаются не более чем на 0,5 %, однако время необходимое для расчета в пакете программ ЛОГОС на ~5 порядков меньше, чем в собственном программном продукте. В результате расчетов получены зависимости яркостной температуры лицевой поверхности МНП Стиросил, уноса массы, глубины прококс-





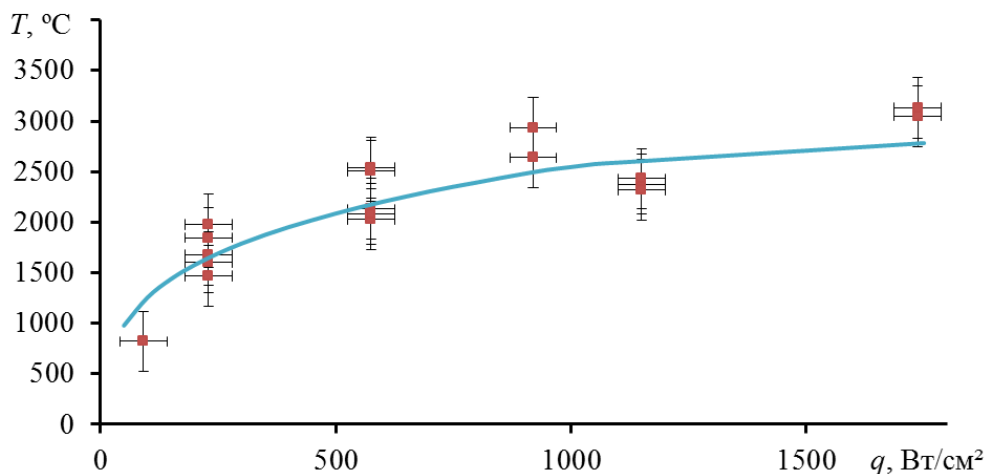


Рис. 7. График зависимости яркостной температуры МНП Стиросил от плотности мощности ЛИ

На рис. 8 сравниваются расчетные зависимости температуры тыльной поверхности полимерного образца с МНП Стиросил от времени после начала облучения ЛИ различной интенсивностью с аналогичными зависимостями, полученными в проведенных экспериментах [12].

Из анализа графиков на рис. 5–8 следует, что разработанная расчетная модель взаимодействия непрерывного ЛИ с МНП Стиросил является адекватной, так как получена удовлетворительная сходимость теоретических и экспериментальных исследований. Максимальные относительные погрешности скорости уноса МНП Стиросил с единицы площади, глубины прококовки и уноса МНП и яркостной температуры от плотности мощности ЛИ, а также температуры на тыльной поверхности МНП Стиросил от времени после начала облучения при различных режимах не превышают 10 %.

Таким образом, в данной работе поставлена и решена задача теоретического и эксперименталь-

ного исследования процессов разложения КМ в поле непрерывного ЛИ на примере МНП Стиросил. Установлены зависимости скорости уноса МНП Стиросил с единицы площади, глубины прококовки и уноса МНП и яркостной температуры от плотности мощности ЛИ, а также температуры на тыльной поверхности МНП Стиросил от времени после начала облучения при различных режимах. Разработана и верифицирована расчетная модель взаимодействия непрерывного ЛИ с модифицированным низкомолекулярным полимером Стиросил. Получена удовлетворительная сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований. Модель может быть использована при оптимизации толщины ТЗП корпусов КА, обосновании требований стойкости корпусов к действию интенсивных тепловых потоков и при прогнозировании поведения КМ КА в поле интенсивного лазерного излучения.

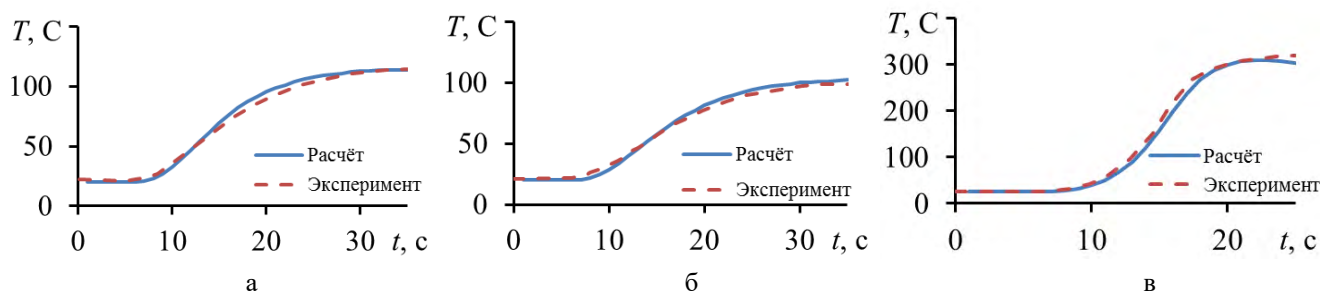


Рис. 8. График зависимости температуры задней стенки МНП Стиросил от времени после начала облучения ЛИ различными режимами: а –  $q = 300$  Вт/см<sup>2</sup>  $t = 5$  с; б –  $q = 460$  Вт/см<sup>2</sup>  $t = 5$  с; в –  $q = 460$  Вт/см<sup>2</sup>  $t = 13$  с

## Список литературы

1. Виноградов Б. А., Перепелкин К. Е., Мещерякова Г. Н. Действие лазерного излучения на полимерные материалы: Научные основы и прикладные задачи. – СПб.: Наука. 2006. Кн. 1. 379 с.; Кн. 2. 443 с.
2. Лазеры: применения и приложения: Учебное пособие / Под ред. А. С. Борейшо. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. 520 с.
3. Тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты при взаимодействии лазерного излучения с веществом: Монография / Под общей ред. проф. Н. С. Захарова, проф. В. Д. Урлина, проф. Н. И. Шенцева. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2004. 425 с.
4. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. 392 с.
5. Шорнхорст, Виксанта. Влияние свойств поверхности, зависящих от направления и длины волны, на лучистый теплообмен // Ракетная техника и космонавтика, 1968, Т. 6, № 8. С. 13–20.
6. Падерин Л. Я., Просунцов П. В., Резник С. В., Фишер В. П. Экспериментальное исследование теплопереноса в пористых полупрозрачных теплозащитных материалах // Инженерно физический журнал, 2005, Т. 78, № 1. С. 60–66.
7. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. Под ред. д-ра техн. наук В. С. Зуева. – М.: «Машиностроение», 1975. 224 с.
8. Афонина Н. Е., Громов В. Г. Применение метода конечного объема для численного моделирования на основе уравнений ВУС гиперзвукового обтекания затупленных тел с учетом термохимического разрушения ТЗП. Исследование физико-газодинамических явлений при обтекании тел сверхзвуковым потоком / Под ред. Н. Н. Пилюгина. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. С. 11–49.
9. Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Глазнов В. А. и др. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса: Препринт, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013.
10. Захаров Н. С., Запонов А. Э., Глазнов В. А., Тришин Р. А. Исследование процессов разложения конструкционных полимеров в непрерывном поле лазерного излучения // Двойные технологии», 2018.
11. Zaponov A. E., Sakharov M. V., Tsibikov Z. S. Study of processes of modified low-molecular polymer stirosil decomposition in the field of continuous intense laser radiation // Journal of Physics: Conference Series, 2018. Vol. 946, № 1.
12. Zaponov A. E., Sakharov M. V., Glaznov V. A. etc Teoretical and experimental studies of laser heating of low-molecular polymer Styrosil // Journal of Physics: Conference Series.