

УДК 541.15:541.515:543.422.27

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСА ОТДАЧИ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ИК-ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

© 2022 г. И. А. Фролов<sup>а</sup>, С. Р. Аллаяров<sup>а, \*</sup>, Е. М. Толстопятов<sup>б</sup>, А. В. Уткин<sup>а</sup>, П. Н. Гракович<sup>б</sup>, Л. Ф. Иванов<sup>б</sup>, В. М. Макаренко<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, 142432 Россия

<sup>б</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, 246050 Беларусь

\*E-mail: sadush@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 21.08.2021 г.

После доработки 27.08.2021 г.

Принята к публикации 28.08.2021 г.

Исследовано формирование лазерной реактивной тяги от давления газов, выделяющихся из кратера лазерной абляции политетрафторэтилена в вакууме, и реализована модель расчета механического импульса отдачи продуктов абляции на основе гравиметрической кривой, полученной с использованием электронных весов, позволяющих вести прямую съемку в режимах прерывистого с интервалом 5 с и непрерывного в течение 5, 10, 15, 25, 30 с облучения ИК-излучением CO<sub>2</sub>-лазера. Независимо от режима лазерного воздействия, в ходе абляции наблюдается линейная от времени лазерного воздействия потеря веса полимера со скоростью 80 мкН/с. Максимальный механический импульс отдачи, проявляющийся на гравиметрических кривых абляции через  $4.5 \pm 0.3$  с после включения лазера, при непрерывном и прерывистом режимах облучения составляет, соответственно,  $145 \pm 7$  мкН·с и  $90 \pm 20$  мкН·с. При этом увеличение времени воздействия лазера на полимер в обоих режимах облучения приводит к незначительному изменению удельного механического импульса отдачи в пределах  $2.76 \pm 0.06$  мкН·с/Дж. Результаты исследования свидетельствуют о возможности использования мишени из политетрафторэтилена для лазерной реактивной тяги, а методика расчета импульса силы из гравиметрической кривой абляции политетрафторэтилена может быть использована для исследования механизма лазерной абляции других полимерных мишеней.

**Ключевые слова:** ИК-лазер, абляция, политетрафторэтилен, импульс отдачи газообразных продуктов

DOI: 10.31857/S0023119322010053

Для отработки технологий и решения научных задач наиболее широкое практическое применение получили малые космические аппараты. Создание эффективной тяги с использованием энергии направленного излучения лазера для передвижения подобных аппаратов в воздушном и космическом пространстве является одной из актуальных научно-технических проблем и перспективных направлений разработки аэрокосмических транспортных систем [1–5]. Для орбитального маневра малых космических аппаратов наряду с двигателями с лазерной тягой (ЛРД) могут быть использованы реактивные установки на основе химических и электрореактивных двигателей. Однако использование двигателей с лазерной тягой являются более перспективным, поскольку они используют энергию удаленного источника и экологически безопасное рабочее вещество, обеспечивая низкую энергетическую

стоимость тяги, высокий уровень удельного импульса и суммарный импульс.

При значительном количестве запусков аппаратов на околоземную орбиту (свыше 1000 в год) лазерная система может оказаться экономически выгодной [6]. При этом особый интерес представляют лазерные тяги для управления и приведения в движение совсем небольших спутников (1–10 кг). К таким двигательным установкам предъявляются особые требования по массе и мощности, среди которых наиболее важным критерием является низкая масса — менее 1 кг, а также тяга не менее 75 мН [7]. Исходя из этого, в качестве топлива для таких двигателей предлагаются легкие материалы, в частности полимеры, и изучается влияние химического состава полимерных мишеней на импульс отдачи [8]. Лазерная реактивная тяга на основе лазерной абляции (ЛА) твердых материалов формируется в основном при прямой ЛА, когда тяга формируется лишь за счет давления па-

ров испарившегося материала [9], или при комбинированной абляции, когда для формирования тяги дополнительно используется энергия ударной волны, возникающей при оптическом пробое паров испарившегося материала [10], а также при ЛА структурированных материалов [11].

В настоящей работе предметом исследования было формирование лазерной реактивной тяги с использованием давления газов, выделяющихся из кратера ЛА полимерной мишени из политетрафторэтилена (ПТФЭ).

Выбор ПТФЭ в качестве рабочего вещества для формирования лазерной тяги обусловлен особенностями его лазерно-индуцированной деструкции. Особенностью процесса ИК-лазерной абляции ПТФЭ является образование неконденсируемых газов ( $C_2F_4$  – около 95%, остальное –  $C_3F_6$ ) и выброс в пространство или накопление на периферии кратера абляции волокно подобного аналога ПТФЭ [12]. Количество фторуглеродов  $C_3$ – $C_4$  в составе продуктов абляции возрастает при повышении давления газов, что, скорее всего, связано с вторичными газофазными реакциями тетрафторэтилена. Таким образом, состав летучих продуктов разложения ПТФЭ, образующихся под действием  $CO_2$ -лазера в вакууме, соответствует его низкотемпературному (800–1000 К) вакуумному пиролизу [13]. Однако, в отличие от пиролиза ПТФЭ, при ЛА до [12] и после  $\gamma$ -облучения полимера [14] наблюдается образование волоконных продуктов в виде “ваты” или “войлока”. Таким образом, установлено, что основным газообразным продуктом (около 95%) лазерно-индуцированной деструкции ПТФЭ является тетрафторэтилен, в отличие от других полимеров, например, у поливинилиденфторида их около 30. Это обстоятельство в случае использования ПТФЭ в качестве рабочего вещества реактивной тяги способствует точному описанию химических процессов, протекающих в рабочем веществе двигателя, что крайне важно для поиска способов оптимизации работы ЛРД.

Еще одной причиной выбора ПТФЭ в качестве топлива для ЛРД является наличие способа эффективного влияния на его скорость и механизм ЛА путем  $\gamma$ -облучения [14, 15]. Радиолиз, проводя химические и физические превращения в структуре ПТФЭ [16], заметно повышает скорость пострадиационной лазерно-индуцированной деструкции [14, 15]. Следовательно, предварительное  $\gamma$ -облучение полимерной мишени может быть использовано для повышения эффективности ЛРД, где в качестве рабочего вещества используется ПТФЭ.

Анализ литературы [5, 17–29] показывает, что одной из важнейших задач при разработке ЛРД является количественное определение импульса отдачи продуктов лазерного воздействия. Как из-

вестно [5, 21, 28], измерение импульса  $I$  и удельного импульса  $C_m$  реактивной тяги обычно проводится на аппаратах с использованием баллистических маятников [18, 19], торсионных маятников [26, 27] и датчиков веса [28, 29], с погрешностью около 10% как для значения  $I$ , так и  $C_m$ . В работе [5] сообщается о возможности снижения погрешности измерений данных параметров работ реактивной тяги до 1% с использованием специально разработанного баллистического маятника и системы, используемой для обнаружения движения маятника.

Целью настоящего исследования была разработка аналитической модели определения механического импульса отдачи на основе данных гравиметрических измерений ИК-лазерной абляции ПТФЭ в вакууме.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

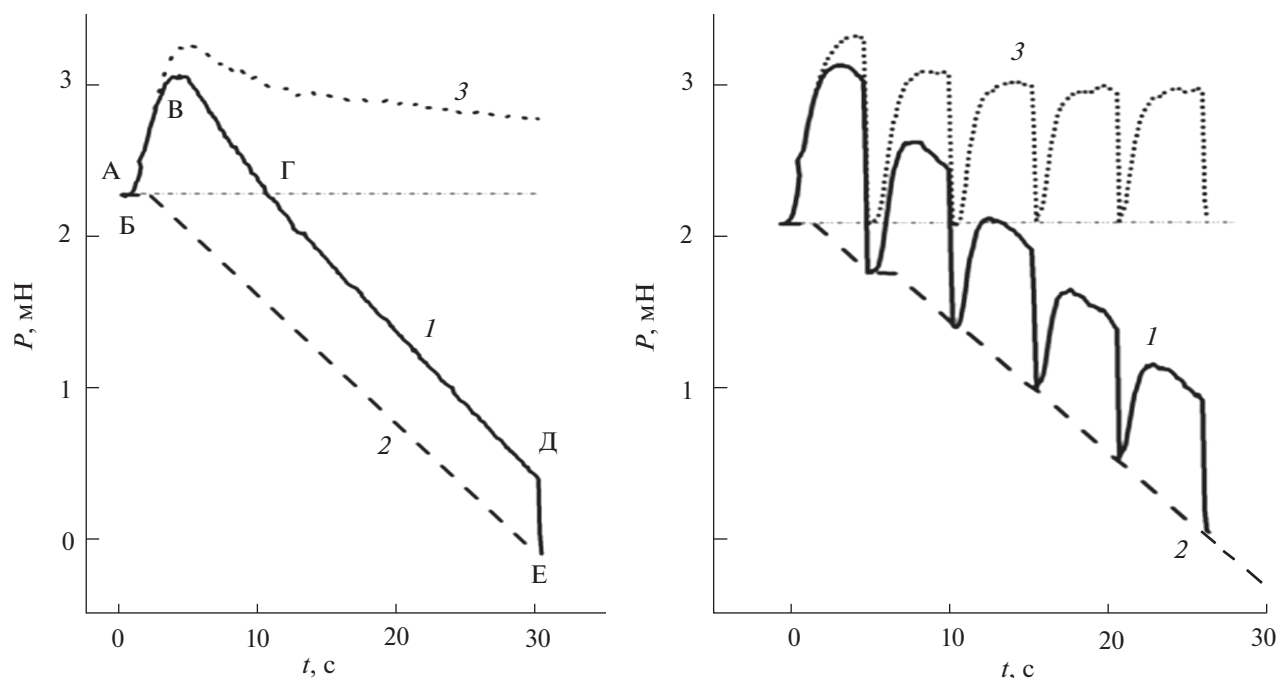
В работе были использованы образцы ПТФЭ в виде листов, приобретенные на ООО “Завод полимеров КЧХК” под торговой маркой “Ф-4”. Они в дальнейшем не подвергались дополнительной очистке.

Облучение лазером проводилось в вакуумной камере установки ВУП-4, подробно описанной ранее [14, 30], дополнительно оборудованной газовым лазером ЛГН-703 (длина волны 10.6 мкм, диаметр луча на поверхности мишени 9 мм). Для ввода излучения в камеру абляции использовалось вакуум-плотное окно из монокристалла NaCl. Камера абляции откачивалась диффузионным насосом до начального давления не выше 1 Па. Перед экспериментом лазер включался на “прогон” в течение 5 мин для стабилизации мощности и модовой структуры луча. Луч лазера направлялся в центр мишени. Мощность луча на поверхности мишени составляет 40 Вт. Электронные весы, измеряющие изменение нагрузки на платформу весов от веса полимерной мишени и от давления механического импульса отдачи вылетающих из кратера абляции газообразных продуктов, находились в вакуумной камере установки ВУП-4. Используемые электронные весы позволяли вести прямую съемку гравиметрических изменений во время ЛА с точностью 0.1 мг, и шагом 0.1265 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гравиметрическая кривая изменения нагрузки на электронные платформенные весы во время абляции ПТФЭ в вакууме от момента включения (точка  $A$ ) и до отключения лазера (точка  $D$ ) представлена на рис. 1, кривая  $I$ .

Для выяснения влияния режима облучения лазером на ход гравиметрической кривой ЛА облу-



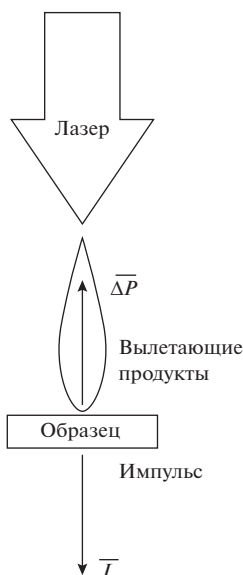
**Рис. 1.** Зависимость общей нагрузки на платформу весов (1, 4), изменения веса полимерной мишени (2, 5) и давления на платформу весов от импульса механической отдачи продуктов ЛА (3, 6) от времени воздействия лазера на ПТФЭ. Измерения проводились при непрерывном лазерном облучении полимера в течение 30 с (1, 2, 3) и в течение 25 с при прерывистом лазерном облучении с длительностью импульса облучения 5 с (4, 5, 6).

чение полимерной мишени проводилось двумя способами. В первом случае, серия образцов полимерной мишени подвергалась ИК-лазерному облучению непрерывно в течение 5, 10, 15 и 30 с. Приведенная на рис. 1 кривая 1 представляет собой зависимость общей нагрузки на весы от времени непрерывного облучения в течение 30 с. В другом варианте режима облучения полимерная мишень облучалась с длительностью импульса облучения 5 с, в течение 25 с. Результаты прерывистого режима облучения приведены на рис. 1 в виде гравиметрической кривой 4 зависимости изменения общей нагрузки на платформу весов в каждом промежутке времени лазерного воздействия (их пять штук).

Известно [14, 30], что начальный период абляции ПТФЭ под действием лазерного излучения проходит через несколько стадий, длительность которых зависит от интенсивности излучения. На первой стадии мишень нагревается, в отдельных местах до температуры красного свечения (порядка 1000 К). Длительность этой стадии составляет несколько секунд при средней интенсивности излучения  $50 \text{ Вт/см}^2$  (кривая *АВ*, рис. 1). Вторая стадия продолжительностью 1–2 с характеризуется образованием газовых пузырей за счет термодеструкции и формированием развитого рельефа поверхности на всем аморфизованном приповерхностном слое – расплав ПТФЭ вспенивается.

Газообразные продукты, которые вылетают из кратера абляции с определенной скоростью, создают импульс силы. Импульс силы давит на мишень, создавая добавочный вес, тем самым увеличивается нагрузка на платформу весов (кривая *ВВ*, рис. 1). В то же время, потеря веса полимерной мишени в результате абляции приводит к снижению веса образца. Схематичное представление общей нагрузки на платформу весов проиллюстрировано на рис. 2.

На третьей стадии ЛА развивается процесс локального образования волокон в местах, где интенсивность облучения наибольшая. Волокна длиной в несколько сотен микрометров отрываются и выносятся абляционным потоком из зоны облучения. В зоне облучения исчезает свечение в видимой области, что свидетельствует о снижении температуры, и происходит возрастание относительной скорости потери веса полимерной мишени, на графике появляется точка максимума (точка *В*, рис. 1). На четвертой стадии происходит объединение газовых потоков от отдельных микрообластей, температурное поле в пределах кратера абляции выравнивается. Данная стадия идет до момента отключения лазера (точка *Д*, рис. 1). При этом в точке *Г* на рис. 1 потеря веса полимерной мишенью за прошедший промежуток времени ЛА (от точки *В* до точки *Г*) равна механическому импульсу отдачи газообразных продуктов за единицу времени в точке *Г*. Данный мо-

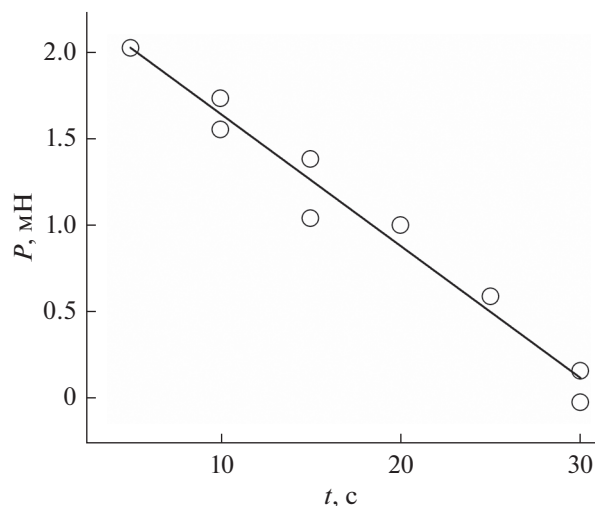


**Рис. 2.** Схематичное представление общей нагрузки на платформу весов в ходе ЛА полимера в вакууме. Здесь  $I$  – механический импульс отдачи, создаваемый газообразными продуктами, вылетающими из кратера абляции в момент регистрации;  $\Delta p$  – вес продуктов абляции, вылетевших из кратера абляции от начало абляции до момента точки регистрации.

мент лазерной абляции схематично показано на рис. 2. После отключения лазера происходит остывание мишени, прекращается выделение газообразных продуктов абляции и останавливается лазерно-индуцированная термическая деструкция полимера. В результате исчезает добавочный вес от импульса отдачи продуктов ЛА (кривая  $DE$ , рис. 1). Это позволяет использовать данный отрезок гравиметрической кривой для количественного определения значения механического импульса отдачи продуктов ЛА. В нем после отключения лазера наблюдается падение нагрузки на платформу весов, равной импульсу отдачи от газообразных продуктов лазерной абляции. Следовательно, значение падения показания на весах на отрезке  $DE$  равноценно механическому импульсу отдачи газообразных продуктов ЛА в точке  $D$ .

Следует отметить, что ход гравиметрических кривых лазерной абляции ПТФЭ в ходе непрерывного облучения в течение 5, 10, 15 и 25 с имеет тот же вид, что и при непрерывном облучении в течение 30 с (кривая  $I$ , рис. 1). На них наблюдаются характеристические точки ( $B$ ,  $B$ ,  $G$ ,  $D$ ,  $E$ ), регистрируемые на гравиметрической кривой  $I$  на рис. 1, но в соответствующих данным временам облучения температурных областях.

На рис. 3 приведена зависимость экспериментально определенной потери веса полимерной мишени  $\Delta p$  от момента включения до момента выключения лазера при разных временах лазер-



**Рис. 3.** Зависимость потери веса полимерной мишени из ПТФЭ от времени лазерной абляции.

ного воздействия в режимах, как прерывистого с интервалом 5 с облучения, так и непрерывного облучения. Как видно, независимо от режима облучения в ходе лазерной абляции ПТФЭ наблюдается линейная от времени воздействия лазера потеря веса полимерной мишенью со скоростью около 80 мкН/с.

Для сравнительного анализа импульса силы, наблюдаемой в ходе ЛА различных материалов в работе [5] предложена следующая зависимость:

$$I = \int_0^t F_t(t) dt, \quad (1)$$

где  $I$  – импульс [мкН · с],  $F_t$  – создаваемое усилие на мишень [мкН · с] за время воздействия лазера  $t$  [с]. Согласно уравнению (1), импульс силы за конечный промежуток времени равен определенному интегралу от элементарного импульса силы, где пределами интегрирования являются моменты начала и конца промежутка времени действия силы.

При оценке эффективности ЛРД, особое внимание уделяется значению удельного механического импульса отдачи  $C_m$ :

$$C_m = \frac{I}{E} = \frac{\int_0^t F_t(t) dt}{\int_0^t N_t(t) dt}, \quad (2)$$

где  $E$  – энергия лазерного луча [Дж],  $N_t$  – мощность лазерного луча [Дж/с].

С использованием уравнений (1) и (2) был посчитан удельный механический импульс отдачи при лазерной абляции ПТФЭ в вакууме. Полу-

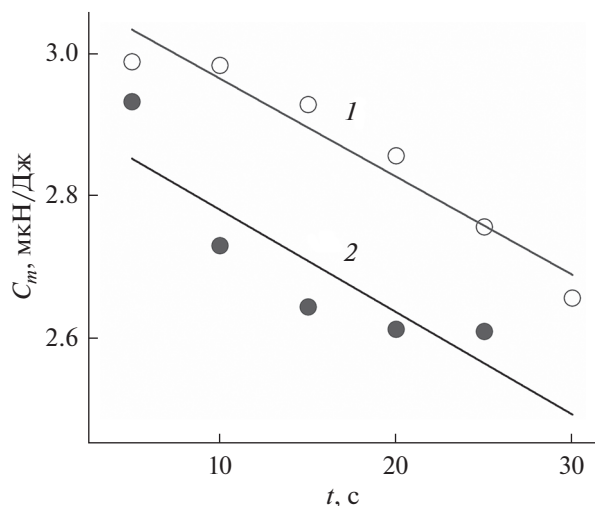


Рис. 4. Зависимость удельного импульса механической отдачи от времени воздействия лазера непрерывно в течение 30 с (1) и с перерывами через каждый 5 с (2).

ченные результаты представлены на рис. 4 в виде зависимости удельного импульса реактивной отдачи от времени воздействия лазера, как в режиме непрерывного воздействия лазера (кривая 1), так и прерывистого облучения с интервалом 5 с (кривая 2). Видно, что увеличение времени воздействия лазера на ПТФЭ в обоих режимах облучения приводит к незначительному изменению удельного механического импульса отдачи в пределах  $C_m = 2.76 \pm 0.06$  мкН/Дж. В работе [8] было получена близкая к этому величина удельного импульса реактивной отдачи  $C_m = 1.8$  мкН/Дж, в ходе исследования мишени из ПТФЭ в качестве топлива для лазерно-электрического гибридного двигателя малой тяги.

На гравиметрических кривых ЛА как при непрерывном, так и при прерывистом режиме облучения лазером, максимальный механический импульс отдачи ( $I_{\max}$ ) проявляется через  $4.5 \pm 0.3$  с после включения лазера. В среднем его значение при непрерывном режиме облучения составляет  $145 \pm 7$  мкН · с (кривая 1, рис. 5). На рис. 5 кривая 2 представлены расчетные величины максимального механического импульса отдачи в каждом из пяти этапов прерывистого режима облучения ПТФЭ. При таком режиме облучения, среднее значение  $I_{\max} = 90 \pm 20$  мкН · с, что на  $35$  мкН · с ниже, чем в случае непрерывного способа облучения полимерной мишени.

## ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

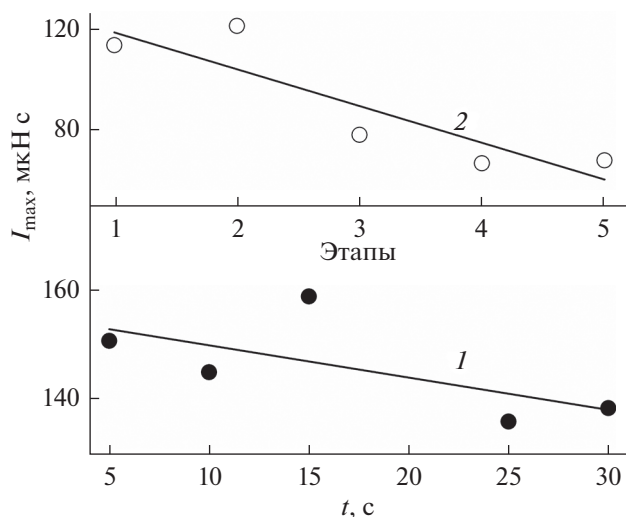


Рис. 5. Максимальный механический импульс отдачи при лазерной абляции образцов ПТФЭ, облученных непрерывным (1) и прерывистым (2) режимах лазерного воздействия.

- на примере лазерной абляции ПТФЭ разработан способ определения механического импульса отдачи газообразных продуктов из гравиметрической кривой изменения нагрузки на платформу электронных весов, позволяющих вести прямую съемку данных абляции в вакууме;

- обнаружено, что на гравиметрической кривой ЛА, снятой при разных временах лазерного воздействия в режимах, как прерывистого с интервалом 5 с облучения, так и непрерывного в течение 5, 10, 15, 25 и 30 с облучения имеются характерные области, позволяющие количественно определить давления импульса отдачи газообразных продуктов. В одной из них импульс отдачи газообразных продуктов за единицу времени равняется потере веса полимера за прошедший промежуток времени абляции. Момент отключения лазера, когда падение нагрузки на платформу весов равно импульсу отдачи газообразных продуктов абляции, также может использоваться для определения его значения;

- проведено графоаналитическое разложение гравиметрической кривой ЛА в кривые потери веса ПТФЭ и механического импульса отдачи, создаваемого вылетающими из кратера абляции газообразными продуктами. Разработанная методика расчета импульса силы из гравиметрической кривой абляции ПТФЭ может быть использована для исследования ЛА других полимеров;

- установлено, что в ходе лазерной абляции ПТФЭ происходит линейная от времени облучения лазером потеря веса полимером со скоростью 80 мкН/с и наблюдается незначительное изменение удельного механического импульса отдачи в пределах  $C_m = 2.76 \pm 0.06$  мкН/Дж. При этом

максимальный механический импульс отдачи, проявляющийся через  $4.5 \pm 0.3$  с после включения лазера, составляет  $145 \pm 7$  мкН · с и  $90 \pm \pm 20$  мкН · с соответственно для режимов непрерывного и прерывистого облучения лазером.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90004 и частичной финансовой поддержке Госзадания АААА-А19-119041090087-4. С белорусской стороны работа поддержана ГПНИ “Физическое материаловедение, новые материалы и технологии”, подпрограмма “Полимерные материалы и технологии” задание 6.67.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Phipps C.R., Luke J.R., McDuff G.G., Lippert T.* // Appl. Phys. A: Mater.Sci. Process. 2003. V. 77. P. 193201.
2. *Myrabo L.N., Lewis J.S.* // Lightcraft. Flight handbook. Canada: Apogee Books. 2009. P. 284.
3. *Черток Б.Е.* // Космонавтика XXI в. Попытка прогноза развития до 2101 г. М.: Издво РТСофт, 2010.
4. *Резунков Ю.А.* // Лазерная реактивная тяга. Изв. Вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. С. 712.
5. *Battocchio P., Terragni J., Bazzanella N., Cestari C., Orlandi M., Burger W.J., Battiston R., Miotello A.* // Measurement Science and Technology, 2021. V. 32. P. 015901.
6. *Larson C.W., Mead jr. F.B., Knecht S.D.* // AIP Conf. Proc. 2003. V. 702. P. 216.
7. *Ou Y., Zhang Y., Wu J., Li J., Tan S., Zhao Y.* // Acta Astronautica, 2021. V. 183. P. 199210.
8. *Phipps C., Luke J., Lippert T.* // Thin Solid Films. 2004. P. 573.
9. *Pakhomov A.V., Thompson M.S., Don A.G.* // AIP Conf. Proc. 2002. V. 664. P.194.
10. *Phipps C.R., Seibert D.B., Rouse R. et al.* // Proc. SPIE. 2000. V. 4065. P. 931.
11. *Yabe T., Nakagawa R., Yamaguchi M. et al.* // 1st Intern. Symp. on Beamed Energy Propulsion. AIP Conf. Proc. 2002. V. 664. P. 185.
12. *Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Калинин Л.А., Рябченко И.Л., Толстопятов Е.М., Красовский А.М.* // Росийский химический журн. 2008. Т. LII. С. 97.
13. *Madorsky S.* // Thermal Degradation of Organic Polymers. N.Y.: Ineterscience, 1964.
14. *Ольхов Ю.А., Аллаяров С.Р., Толстопятов Е.М., Гракович П.Н., Калинин Л.А., Добровольский Ю.А., Диксон Д.А.* // Химия высоких энергий. 2010. Т. 44. С. 63.
15. *Аллаяров С.Р., Ольхов Ю.А., Никольский В.Г., Гракович П.Н., Диксон Д.А.* // Химическая физика. 2014. Т. 33. С. 65.
16. *Ivanov V.S.* // Radiation Chemistry of Polymers Leiden: VSP, 1992. P. 321.
17. *Резунков Ю.А.* // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Сосновый Бор, 2006.
18. *Агейчик А.А., Борисов М.Ф., Егоров М.С., Лашков В.А., Машек И.Ч., Резунков Ю.А., Савельева В.П.* // Оп-тич. журн. 2003. Т. 70. С. 65.
19. *Lakatosh B.V., Abramenko D.B., Ivanov V.V., Medvedev V.V., Krivitsun V.M., Koshelev K.N., Yakunin A.M.* // Laser Physics Letters. 2017. V. 15. P. 016003.
20. *Choi S., Han T., Gojani A. B., Yoh J.J.* // Appl. Phys. A. 2010. V. 98. P.147.
21. *Phipps C.R., Boustie M., Chevalier J.M., Baton S., Brambrink E., Berthe L., Schneider M., Videau L., Boyer S.A.E., Scharring S.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. P. 193103.
22. *Senegačnik M., Jezeršek M., Gregorčič P.* // Appl. Phys. A. 2020. V. 126. P. 136.
23. *Pakhomov A.V., Lin J., Tan R.* // AIAA J. 2006 V. 44. P. 136.
24. *Fishburna J.M., Withforda M.J., Couttsab D.W., Pipera J.A.* // Appl. Surf. Sci. 2006. V. 252. P. 51.
25. *DucThuan T., Akifumi Y., Hiroaki N., Koichi M.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 122. P. 233.
26. *Phipps C.R., Luke J.* // AIAA J. 2002. V. 10. P. 310.
27. *D'Souza B.C., Ketsdever A.D.* // 36th AAI Plasmadynamics and Conf. 2005.
28. *Kremeyer K., Lapeyre J., Hamann S.* // Conf. Proc. 2008. V. 997. P. 147.
29. *Sloane J.B., Sedwick J.R.* // J. Propul. Power. 2020. V. 36. P. 551.
30. *Tolstopyatov E.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 1993.