

УДК 53.082.14:53.06

## ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСА РЕАКТИВНОЙ СИЛЫ, СОЗДАВАЕМЫЙ ИМПУЛЬСНЫМ ОПТИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ПРИ ПОМОЩИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

А.Г. Саттаров<sup>1</sup>, А.В. Сочнев<sup>1,2</sup>, А.Р. Бикмучев<sup>3</sup>  
albert5519@mail.ru, sochnev.aleksandr@inbox.ru, a.bikmuchev@gctc.ru

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
имени А. Н. Туполева

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет

<sup>3</sup>Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени  
Ю.А. Гагарина

Ключевые слова: лазерный ракетный двигатель, тяга, количество движения, импульс силы, оптический разряд, баллистический маятник

### Аннотация

В данной работе предлагается измерять импульс реактивной силы лазерного ракетного двигателя, полученный при инициировании в камере импульсного оптического разряда наносекундной длительности, при помощи баллистического маятника. Получена формула измерения импульса в зависимости от периода колебаний  $T$ , массы маятника  $m$  и перемещение  $z$  маятника и формула оценки погрешности измерений импульса. Измерения проведены с применением методов математико-статистической обработки данных. Дана оценка значения коэффициента реактивной отдачи  $C_m$ .

### Введение

Теорию использования лазерного источника энергии для создания реактивной тяги активно начали прорабатывать в 70-ых годах [1, 2]. Появление лазеров достаточной мощности послужило толчком к экспериментальным исследованиям [3-9].

При сравнении различных реактивных двигателей, особенно тех, что работают в импульсном режиме, часто используют коэффициент реактивной отдачи  $C_m$

$$C_m = \frac{1}{E} \int F(t) \cdot dt \quad (1)$$

где  $F$  – реактивная сила,  $E$  – подводимая энергия,  $t$  – время действия реактивной силы.

При абляции большинства материалов коэффициент  $C_m \approx 5 \cdot 10^{-4}$  Н·с/Дж и ниже (для экзотермических полимеров эта величина может быть на порядок выше) [3].

Измерение импульсов отдачи порядка  $10^{-6} - 10^{-5}$  Н·с и более (что соответствует энергии лазерного луча порядка  $10 - 1000$  мДж) гораздо проще проводить при помощи баллистического маятника [3].

### Определение импульса баллистического маятника

Теория измерения «мгновенных импульсов» при помощи баллистического маятника довольно проста. Так как время действия силы мало (порядка  $10^{-3}$  с), мало также и перемещение массы за это время, можно считать, что приращение импульса силы  $dF$  преобразуется в равное по значению приращение импульса движущегося тела  $dp$  [10].

В первом приближении можно считать [11]

$$m \frac{dx}{dt} = \int_0^t F \cdot dt \quad (2)$$

где  $m$  – масса груза маятника,  $x$  – перемещение центра массы маятника.

Пусть к центру массы покоящегося в начальный момент маятника приложена в течение очень короткого времени тангенциальная сила  $F$ . Будем рассматривать массу маятника как материальную точку. Предполагается, что момент инерции груза относительно оси его мал по сравнению с моментом инерции его относительно оси подвески.

На рис. 1 представлена принципиальная схема баллистического маятника, где  $h$  – наибольшая высота подъёма центра массы,  $z$  – хорда дуги отклонения центра массы,  $\alpha$  – угол отклонения центра массы маятника.



Рис. 1. Принципиальная схема баллистического маятника

Из закона сохранения энергии следует, что

$$m \frac{u_0^2}{2} = mgl(1 - \cos \alpha) \quad (3)$$

$$u_0^2 = 2gl(1 - \cos \alpha) = 4gl \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

где  $u_0$  – скорость центра массы маятника при прохождении его через положение равновесия,  $g$  – ускорение свободного падения,  $l$  – длина подвеса маятника. Следовательно

$$u_0 = 2l \sqrt{\frac{g}{l}} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

Зная, что хорда  $z = 2l \sin \frac{\alpha}{2}$ , а период колебаний маятника при малой амплитуде  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ , для количества движения  $p$ , которым обладает маятник при прохождении через положение равновесия и которое согласно формуле 2 равно импульсу действующей на маятник в начальный момент силы, можем написать

$$p = mu_0 = \frac{2\pi}{T} mz \quad (6)$$

При малой амплитуде отсчет по хорде и по дуге даёт совпадающие результаты.

Оценка погрешности косвенных измерений количества движения  $p$ .

Согласно формуле 5 величина  $p$  определяется независимыми величинами  $T, m, z$ .

Найдём погрешность следующим образом[12]

$$\Delta p = \bar{p} \sqrt{\left(\frac{\partial \ln p}{\partial T}\right)^2 \Delta T^2 + \left(\frac{\partial \ln p}{\partial m}\right)^2 \Delta m^2 + \left(\frac{\partial \ln p}{\partial z}\right)^2 \Delta z^2} \quad (7)$$

где  $\frac{\partial \ln p}{\partial T}, \frac{\partial \ln p}{\partial m}, \frac{\partial \ln p}{\partial z}$  частные производные натурального логарифма функции  $p$  по  $T, m, z$  соответственно.  $\Delta T, \Delta m, \Delta z$  – общая погрешность серии измерений (доверительный интервал) величин  $T, m, z$  соответственно.  $\bar{p}$  – среднее значение импульса.

Вычислив частные производные натурального логарифма функции  $p$  и подставив в формулу 7, учитывая, что  $\frac{\Delta T}{T} = \delta_T, \frac{\Delta m}{m} = \delta_m, \frac{\Delta z}{z} = \delta_z$ , получаем следующее выражение для определения погрешности измерения импульса реактивной силы:

$$\Delta p = \frac{2\pi}{\tilde{T}} \tilde{m} \tilde{z} \sqrt{\delta_{\tilde{T}}^2 + \delta_{\tilde{m}}^2 + \delta_{\tilde{z}}^2} \quad (8)$$

где  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{M}$ ,  $\tilde{z}$  – средние значения непосредственно измеряемых величин, а  $\delta_{\tilde{T}}$ ,  $\delta_{\tilde{m}}$ ,  $\delta_{\tilde{z}}$  – относительная погрешность величин  $T$ ,  $m$ ,  $z$  соответственно.

### Результаты измерений

Работа лазерного источника основана на явлении генерации лазерного излучения активной средой (далее - активный элемент). В качестве активного элемента используется кристалл  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ , в котором, при оптической накачке возникает инверсная населенность уровней, обеспечивающая дальнейшую стимулированную эмиссию фотонов. Для обеспечения эффективной передачи излучения ксеноновой лампы в активный элемент используется диффузный отражатель. Активный элемент, ксеноновая лампа и диффузный отражатель объединены в единый конструктивный узел - квантрон.

С помощью резонатора осуществляется накопление необходимой энергии в активном элементе. В излучателе лазера используется кольцевая схема резонатора. Резонатор сформирован зеркалами, поворотной призмой и поляризатором. Кроме того внутри резонатора находятся фазовая пластинка, а также узел электрооптического затвора и поляризатор. Поляризатор вместе с фазовой пластиной образуют выходное зеркало с регулируемым коэффициентом отражения.

Электрооптический затвор выполнен на основе ячейки Поккельса и предназначен для осуществления работы излучателя в режиме модулированной добротности. Часть лазерного излучения, отраженная от поляризатора, направляется назад в резонатор при помощи возвратного.

При выполнении экспериментов энергия накачки для квантрона составила 27 Дж, а энергия на выходе: 500 мДж, длительность импульса 10-13 нс. Как известно оптический пробой возникает когда интенсивность излучения  $S$  или электрическое поле  $E$  световой волны превосходят некоторое пороговое значение ( $S \geq 10^5$  МВт/см<sup>2</sup>,  $E \geq 6 \times 10^6$  В/см для воздуха).

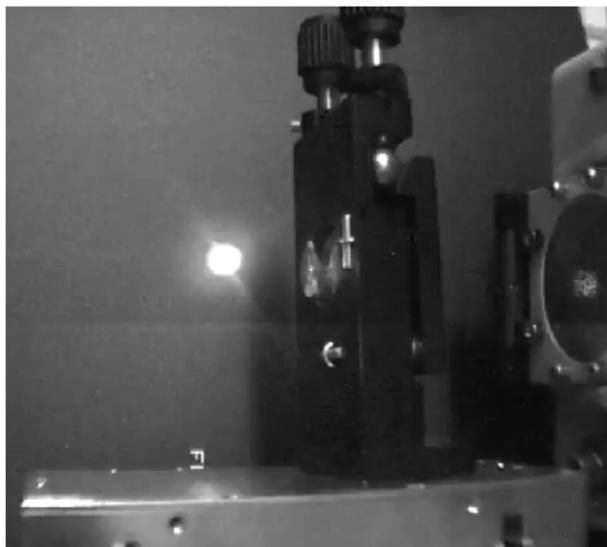
Длительность импульса лазерного излучения 10 нс, энергия импульса 500 мДж, тогда пиковая мощность импульса составляет 50 МВт (длина волны 1062 нм, диаметр луча 8 мм).

При такой пиковой мощности и менисковой линзы с фокусным расстоянием 30 мм возникает оптический пробой воздуха с частотой равной частоте повторения лазерных импульсов (рис.2).

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 3. Длина нитей подвеса составила  $753 \pm 3$  мм. В качестве подвеса использовались нитки армированные хлопкополиэфирные 44ЛХ с линейная плотность 44 текс. Излучение фокусировалось в центр внутреннего объема мишени-сопла (рис.3).

Масса четырех нитей подвеса составила 0,132 г.

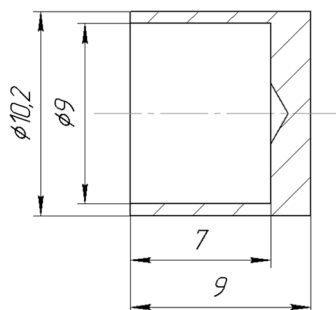
Конструкция мишени-сопла приведена на рис.4.



**Рис.2. Импульсный оптический разряд в воздухе**



**Рис. 3. Отклонение мишени сопла под действием оптического разряда**



**Рис. 4. Конструкция мишени-сопла**

Зная геометрические размеры нетрудно оценить массу мишени-сопла. Для крепления нитей подвеса использовался силикатный клей. Можно считать, что к боковым противоположным сторонам прикреплены параллелепипеды из клея размером  $9 \times 2 \times 1$  мм. Масса мишени-сопла с учётом клея составляет 0,717 г, погрешность оценки не превышает 10%. Нельзя сказать, что масса маятника много больше массы подвеса. Учтём это, приняв что масса подвеса сосредоточена посередине нитей (следовательно,  $z_{\text{п}} = 0,5z$ ):

$$m = m_{\text{м}} + 0,5m_{\text{п}} = 0,783 \text{ г} \quad (9)$$

где  $m$  – масса груза маятника с учётом подвеса;  $m_{\text{м}}$  – масса мишени-сопла,  $m_{\text{п}}$  – масса подвеса.

Произведено 5 замеров, мишень-сопло выставлялась каждый раз заново, для снижения систематической погрешности. Погрешность однократного измерения периода  $T$  составляла 0,2с, хорды  $z$  - 0,5 мм.

Результаты сведены в Таблицу 1.

**Таблица 1. Экспериментальные данные**

№ опыта	$T$ , с	$z$ , мм
1	1,44	4
2	1,18	4
3	1,36	4
4	1,16	3
5	1,28	4
ср. значение	1,284	3,8

Оценим совместную ошибку многократных и однократных измерений [12]: относительная погрешность периода колебаний  $\delta_T = 0,187$ , хорды  $\delta_z = 0,192$ .

Используя формулу 6, определим импульс реактивной силы  $p = 14,55 \cdot 10^{-6}$  Н·с. Погрешность оценим по формуле 8,  $\Delta p = 0,286$  или 28,6%.

Коэффициент  $C_m$ , исследуемой модели импульсного лазерного ракетного двигателя (ЛРД) на оптическом разряде в атмосфере равен  $4,2 \cdot 10^{-5}$  Н·с/Дж, что относительно совпадает с результатами работы [13]. (авторами получено значение коэффициента реактивной отдачи  $C_m = 10-15 \cdot 10^{-5}$  Н·с/Дж при следующих условиях экспериментов: энергия импульса 100 Дж, длительность импульса 15 мкс, длина волны лазерного излучения 10.6 мкм, нормальные условия среды).

### Заключение

При импульсах отдачи порядка  $10^{-6} - 10^{-5}$  Н·с можно вполне успешно применять баллистический маятник. Измерив, период колебаний  $T$ , массу груза  $m$  и его перемещение  $z$  можно найти импульс отдачи, создаваемый оптическим разрядом, по формуле 8 оценить погрешность измерений.

Величина коэффициента  $C_m$  для ЛРД на оптическом пробое воздуха получается на порядок меньше абляционного ЛРД и составляет  $4,2 \cdot 10^{-5}$  Н·с/Дж.

Поступила 11.02.2015г.

## Литература

1. Бункин, Ф. В. Использование лазерного источника энергии для создания реактивной тяги / Ф. В. Бункин, А.М. Прохоров // *Успехи физических наук* – 1976. – Т.119, №3 – С. 425-446.
2. Райзер, Ю.П. Численное исследование непрерывного оптического разряда в атмосферном воздухе в рамках одномерной модели / Ю.П. Райзер, С.Т. Суржиков // *Теплофизика высоких температур*. 1984. – Т.22, № 1 – С. 29.
3. Локтионов, Е.Ю. Методика экспериментального определения удельного механического импульса отдачи при фемтосекундной лазерной абляции конденсированных сред в вакууме / Е.Ю. Локтионов, А.В. Овчинников, Ю.Ю. Протасов, Д.С. Ситников // *Приборы и техника эксперимента* – 2010. – №4 – С. 140-144.
4. Агейчик, А.А. Детонация рабочих веществ СНО химического состава лазерного реактивного двигателя / А.А. Агейчик, Е.В. Репина, Ю.А. Резунков, А.Л. Сафронов // *Журнал технической физики* – 2009. – Т.79, №3 – С. 76-83.
5. Аполлонов, В.В. Лазерный воздушно-реактивный двигатель: воздействие ударных волн при низких частотах следования лазерных импульсов / В.В. Аполлонов, В.Н. Тищенко // *Квантовая электроника* – 2007. – Т.37, №8 – С. 798-800.
7. Бикмучев, А.Р. Экспериментальное исследование осесимметричного закрученного противоточного потока рабочего газа в оптическом плазмотроне / А.Р. Бикмучев, М.Ф. Вахитов, А.Г. Саттаров, С.Г. Семенова // *Вестник Казанского технологического университета* – 2013. – Т.16, №13 – С. 172-174.
8. Саттаров, А.Г. Разработка и экспериментальное исследование эффективности газодинамического окна лазерных энергетических установок / А.Г. Саттаров, А.Р. Бикмучев // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева* – 2008. – №4 – С. 80-84.
9. Сочнев, А.В. Влияние угла раскрытия конического сопла и его размера на тягу лазерного ракетного двигателя / Сочнев А.В // *Технические науки - от теории к практике* – 2014. – №39 – С. 88-92.
10. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 5 книгах. Книга 1. Механика / И.В. Савельев. – М. : АСТ, 2008. – 336 с.
11. Зельдович, Я.Б. Импульс реактивной силы пороховых ракет / Я.Б. Зельдович, М.А. Ривин, Д.А. Франк-Каменецкий. – М. : Оборонгиз, 1963. – 191 с.
12. Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 88 с.
13. Пат 2266420 Российская Федерация, МПК F02K7/00, F24J2/06, B64G1/26. Аэрокосмический лазерный реактивный двигатель / Агейчик А.А., Егоров М.С, Резунков Ю.А., Сафронов А.Л., Степанов В.В.; патентообладатель ФГУП НИИКИ ОЭП. – № 2003129824/11; заявл. 08.10.03; опубл. 20.12.05.

*A.G. Sattarov<sup>1</sup>, A.V. Sochnev<sup>1,2</sup>, A.R. Bikmuchev<sup>3</sup>*

**MEASUREMENT OF THE MOMENTUM REACTIVE FORCE PRODUCED BY A PULSED OPTICAL DISCHARGE BY MEANS OF A BALLISTIC PENDULUM**

// Transactions of Academenergo. - 2015. – N 1. – P. 75-82.

**e-mail:** albert5519@mail.ru, sochnev.aleksandr@inbox.ru, a.bikmuchev@gctc.ru

<sup>1</sup>*Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev*

<sup>2</sup>*Kazan State Technological University*

<sup>3</sup>*Research Test Cosmonaut Training Center named after Y. A. Gagarin*

**Keywords:** laser rocket engine, thrust, momentum, impulse of force, optical discharge, ballistic pendulum.

**Abstract**

In this paper, we propose to measure the momentum of the laser rocket engine produced at the initiation of the optical pulsed nanosecond discharge in camera , using a ballistic pendulum. We obtained formula for measuring the pulse as a function of the oscillation period T, the mass pendulum m and movement of the pendulum z and formula is derived estimates of measurement error pulse. The experiment was carried out using the methods of mathematical and statistical data processing. The estimation of the coefficient  $C_m$ .