

ИМПУЛЬСНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Сагтаров А.Г.¹, Кононенко О.Д.², Бикмучев А.Р.², Сочнев А.В.¹, Зиганшин Б.Р.¹

¹КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, г.Казань, albert5519@mail.ru

²ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок

Ключевые слова: приповерхностный импульсный оптический разряд, интенсивность лазерного излучения, точечный взрыв, ударная волна, импульсный лазерный ракетный двигатель, микро-спутник.

В качестве альтернативного варианта для выполнения задач ориентации, стабилизации малых космических аппаратов (МКА) можно использовать импульсный лазерный ракетный двигатель (ИЛРД) на основе получения в цилиндрической камере импульсного оптического разряда (ИОР) или приповерхностного оптического разряда (ИПОР) в среде рабочего газа, например, воздуха, азота, водорода, аргона, гелия, и т.д. Импульсный оптический разряд можно рассматривать как мгновенное выделение энергии, что аналогично процессу точечного взрыва. Энергия сфокусированного лазерного излучения переходит в энергию ударной волны и излучения. На основе экспериментальных работ выявлено, что в энергию ударной волны переходит до 25% энергии вкладываемого в одиночный импульс лазерного излучения.

На рис.1 приведена фотография импульсного оптического разряда в атмосферном воздухе, схема фокусировки импульсного лазерного излучения в камере двигателя и микро-спутник с импульсным лазерным ракетным двигателем.

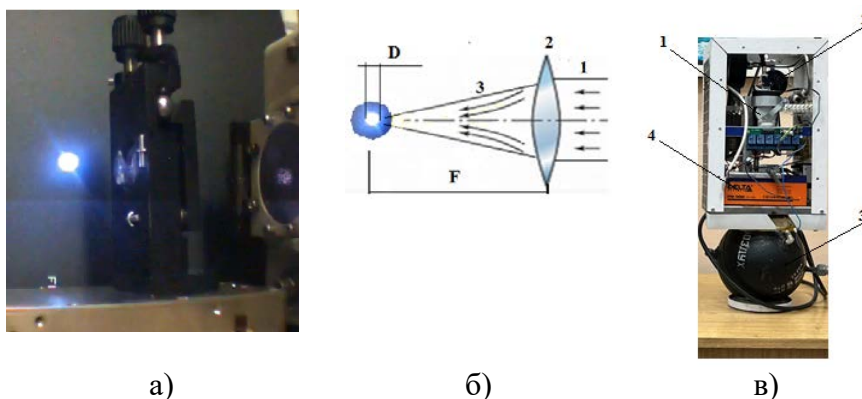


Рис.1 - Фотография а), б) схема возникновения импульсного оптического разряда в атмосферном воздухе, где 1-подвод лазерного излучения, 2 –линза собирающая, с F –фокусным расстоянием, 3-область концентрации лазерного излучения, D- диаметр фокусировки лазерного излучения, в) микро-спутник с импульсным лазерным ракетным двигателем, 1-импульсный лазер, 2-лазерный ракетный двигатель, 3- шар-баллон с воздухом, 4-аккумулятор

Моделирование осуществлялось с момента, когда разница между давлением окружающей средой и давлением на ударной волне составляет 21,1 раз. Этот момент времени берется вследствие потери автомодельности, т.е. учитывает условие влияния среды на движение волны. Для осуществления численного расчета требовалось рассчитать входные параметры ударной волны при помощи уравнений теории точечного взрыва Седова-Тейлора.

Давление газа P_2 за фронтом ударной волны равно

$$p_2 = 21,1 \cdot p_1, \quad (1)$$

где P_1 – давление внешней окружающей среды [Па].

Координата сферической ударной волны r_2 [м] определяется

$$r_2 = l \cdot r^0 \quad (2)$$

где r^0 - безразмерный радиус.

Безразмерный радиус определяем по формуле

$$r^0 = \left(\frac{E_0}{\rho_1}\right)^{\frac{1}{\nu}} \quad (3)$$

где E_0 выделившаяся при импульсном приповерхностном оптическом разряде энергия [Дж], ν – параметр, равный 1, 2 и 3 при плоском, цилиндрическом и сферическом взрыве соответственно.

Скорость газовой среды за фронтом V_2 [м/с] ударной волны

$$V_2 = \frac{2a}{\gamma+1} (1-q) \cdot q^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

где γ - показатель адиабаты, a - скорость звука [м/с], q – безразмерная переменная, определяемая как

$$q = \frac{a^2}{D^2} \quad (5)$$

Скорость распространения ударной волны D [м/с]

$$D = 0,4 \left(\frac{E}{\rho_1}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot r^{-\frac{3}{2}} \quad (6)$$

где ρ_1 – плотность невозмущенной среды [кг/м³], r_2 - координата сферической ударной волны [м], E – величина, связанная с E_0 следующим образом

$$E_0 = 1,175 \cdot E \quad (7)$$

Для численного моделирования использовалось программное обеспечение Ansys Fluent 17.2. Длина поля 0,02 м, высота 0,015 м, решатель на основе плотности (density-based solver), нестационарное время (transient time), 2D постановка задачи, ортогональность сетки 1. Выходное условие Pressure-outlet с проницаемыми стенками и давлением 101325 Па на бесконечности. Для расчета применялась невязкая модель жидкости, воздух выбран в качестве идеального газа. Давление окружающей среды 101325 Па, температура 293 К. Исходный радиус ударной волны равняется 0,001285 м, давление на ударной волне 2,14 МПа, скорость газовой среды V_2 до 1040 м/с. С учетом полученных экспериментальных данных о времени вылета ударной волны из цилиндрического канала выявлено, что в энергию ударной волны переходит около 8% энергии лазерного импульса.

В расчетах применялась невязкая модель жидкости, в качестве рабочего тела выбран воздух, как идеальный газ.

В результате моделирования получены параметры распространения ударной волны внутри цилиндрической камеры и газа за ударной волной. Можно выделить начальный этап, отражение ударной волны от стенок камеры, и выход ударной волны с выносом основной части газа из камеры в окружающую среду. В первые моменты времени (1-10 нс) скорость распространения ударной волны достигает 50-70 км/с, соответственно скорость газовой среды за ударной волной достигает 30-40 км/с, однако уже к моменту 300-500 нс, в результате торможения в атмосферной среде, скорость распространения ударной волны существенно снижается до нескольких км/с. Результаты расчета изменения скорости фронта ударной волны D по времени, при разных значениях энергии в одиночном лазерном импульсе показаны на рис.2.

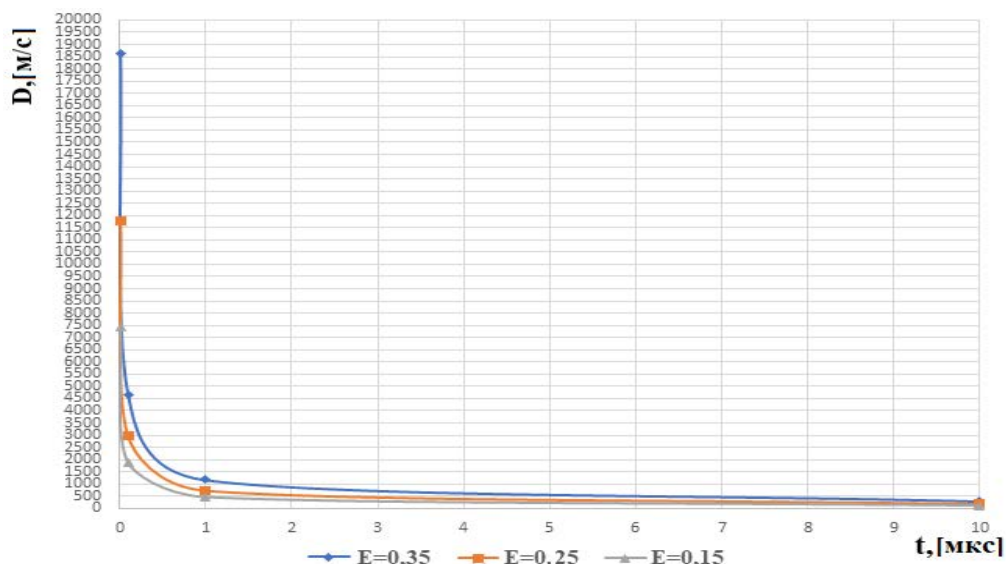


Рис.2 - График изменения скорости фронта ударной волны, где D — скорость распространения ударной волны [м/с], t — время распространения ударной волны, в [мкс]

Проводились экспериментальные исследования скорости движения ударной волны высокоскоростной камерой Memrecam НХ-4, позволяющей осуществить съемки в 1 млн.кадров в секунду. На рис.3 приведены результаты съемки распространения ударной волны (УВ) от ИОПР, в случае энергии в одиночном импульсе 0.35 Дж.

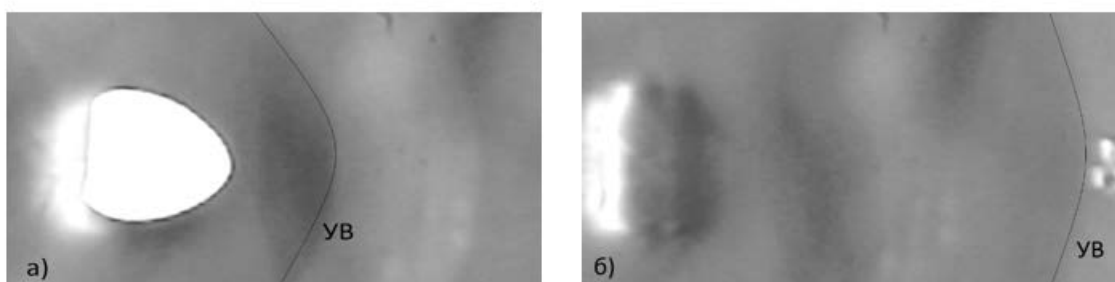


Рис.3 - Результаты съемки распространения ударной волны (УВ) от ИОПР от момента возникновения ИОПР (а) до достижения времени 6 мкс (б)

Как показали эксперименты по измерению скорости распространения УВ в атмосферных условиях с применением скоростной камеры, через момент времени 6.0 мкс от начала возникновения приповерхностного импульсного оптического разряда. Скорость ударной волны составляет порядка 600 м/с, что удовлетворительно согласуется с результатами расчетов (см. рис.2).

Список литературы

1. Sattarov A.G., Ziganshin B.R., Sochnev A.V., Nagulin K.Y., Lapshin S.V. Numerical simulation of gas propagation process behind a shock wave during optical breakdown of air in a cylindrical channel. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1687. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012004
2. Sattarov A.G., Sochnev A.V., Ziganshin B.R. Comparison of initial pressure distributions in shock wave simulation of optical breakdown on surface. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1870. DOI:10.1088/1742-6596/1870/1/012008.

Сведения об авторах

1. Саттаров Альберт Габдулбарович, ученая степень-д.т.н., должность-профессор КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, областью научных интересов является физика лазерной плазмы, применение лазерных технологий в области воспламенения топлива в двигателях

внутреннего сгорания и в авиационных двигателях, лазерные энергетические установки для создания реактивной тяги на основе оптических разрядов-импульсного и непрерывного.

2. Кононенко Олег Дмитриевич, должность инструктор-космонавт-испытатель, заместитель начальника ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина» по подготовке космонавтов, областью научных интересов является технология и методы проведения космических экспериментов при испытании малых космических аппаратов.

3. Бикмучев Айдар Рустемович, ученая степень-к.т.н., должность-научный сотрудник ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина», областью научных интересов является технология и методы проведения космических экспериментов при испытании малых космических аппаратов, исследование характеристик импульсного лазерного ракетного двигателя в космических условиях.

4. Соичев Александр Владимирович, ученая степень-к.т.н., должность-доцент КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, областью научных интересов является разработка и исследование характеристик импульсного лазерного ракетного двигателя на основе оптического разряда.

5. Зиганшин Булат Рустемович, ученая степень-к.т.н., должность-начальник сектора отдела инноваций и коммерциализации интеллектуальной собственности КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, областью научных интересов является разработка и исследование характеристик импульсного лазерного ракетного двигателя на основе приповерхностного оптического разряда.

PULSE LASER ROCKET ENGINE FOR SMALL SPACE VEHICLES ORIENTATION AND STABILIZATION SYSTEMS

Sattarov A.G.¹, Kononenko O.D.², Bikmuchev A.R.², Soichnev A.V.¹, Ziganshin B.R.¹

¹KNITU-KAI named after A.N. Tupolev, Kazan, albert5519@mail.ru

²FSBI "Research Institute of the Yu.A. Gagarin Cosmonaut Training Center",
Star City

In this paper, the authors propose using a pulsed laser rocket engine as an alternative option for performing orientation and stabilization tasks for small spacecraft, based on obtaining a near-surface pulsed optical discharge in a cylindrical absorption chamber in a working gas medium, such as air. The results of numerical calculation of the characteristics of this type of pulsed laser rocket engine are presented using the equations of the Sedov-Taylor point explosion theory.