

07; 12

© 1992

СИЛА РЕАКТИВНОЙ ТЯГИ В ЛАЗЕРНОМ ДВИЖИТЕЛЕ

Р.А. Л и у к о н е н, А.М. Т р о ф и м е н к о

Возможность использования лазеров для ускорения в атмосфере материальных тел давно изучается как теоретически [1, 2, 4], так и экспериментально [3, 5]. Перспективность этого метода очевидна, однако, экспериментальных данных в настоящее время еще недостаточно для точного прогнозирования параметров лазерной системы, способной ускорить материальные тела (полезные грузы) до необходимых скоростей.

Настоящая работа посвящена исследованию ускорения мишеней специальных конструкций в атмосфере с использованием лазерной системы, излучающей импульсы длительностью 40 мкс и энергией до 4 кДж в моноимпульсе или 0.2–0.9 кДж при частоте следования 100 Гц. В качестве материала мишеней использовались полимеры типа полиметилметакрилата и медные полированные пластины различного профиля размером 15 x 15 см²; в качестве рабочего тела, создающем реактивную тягу, в лазерном двигателе использовались либо пары материала мишени, либо плазма воздуха при оптическом пробое на поверхности. Ускорение мишеней измерялось по отклонению маятника, длина подвеса которого составляла 155 см. Импульс силы реактивной отдачи определялся как $I = 2\pi Mx/T$, где x – отклонение маятника, T – период его колебаний, а его масса могла быть изменена в пределах $M = 0.2\text{--}3.15$ кг. Для регистрации отклонения маятника от вертикального положения применялся электронномеханический метод измерения угла, точность которого составляла ± 0.25 угловых градуса.

Количество импульсов в серии изменялось в пределах от одного до 100. Таким образом, длительность воздействия излучением на мишени в зависимости от условий эксперимента составляла от 40 мкс (моноимпульсный режим) до одной секунды.

В моноимпульсном режиме в экспериментах изучалась зависимость удельного импульса реактивной отдачи от плотности энергии лазерного излучения при образовании плазмы на медных мишенях, поверхность которых полировалась до зеркального качества и оставалась плоской, либо, когда на ней формировалась матрица из параболических отражателей (см. рис. 1, а). В частотно-периодическом режиме исследовалась зависимость силы реактивной тяги от средней мощности излучения на частоте 100 Гц при использовании различных типов лазерных двигателей.

Изучение этих вопросов представляет интерес с точки зрения использования в экспериментах реальных лазерных систем, параметры которых наиболее близко позволяют прогнозировать характе-

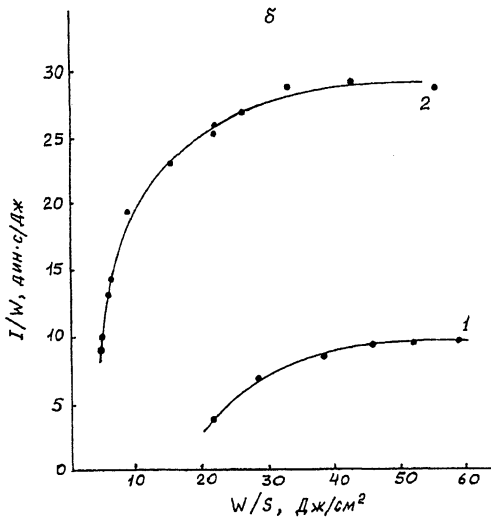
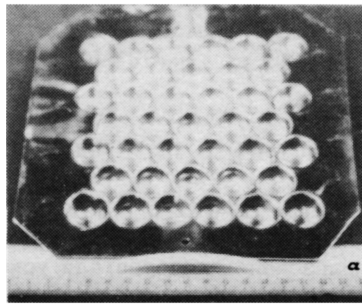


Рис. 1. Лазерный реактивный движитель МЛД-2 (а) и его динамические характеристики (б); удельный импульс отдачи при образовании плазмы на поверхности медной полированной мишени (1) и на МЛД-2 (2).

ристики лазеров, предназначенных для использования, например, при корректировании орбит искусственных спутников земли. Именно по этой причине опыты проводились с плоскими мишенями или устройствами, в которых испарение вещества или плазмообразование происходит на обширной поверхности.

На рис. 1, б приведены результаты измерений удельных характеристик реактивной отдачи при образовании плазмы оптического пробоя в воздухе на поверхности таких мишеней. Размер пятна облучения достигал $68,6 \text{ см}^2$ и имел форму замкнутого кольца, характерного для лазеров с неустойчивым телескопическим резонатором. На первом графике приведены результаты, полученные на плоской мишени весом $0,857 \text{ кг}$, которые свидетельствуют, что

плазма на поверхности возникает при ~ 20 Дж/см², а величина $1/w$ не превосходит 10 дин·с/Дж. При облучении макета лазерного двигателя (МЛД-2), представляющего собой матрицу из медных параболических зеркал, в фокальной точке которых возникает оптический пробой при плотности энергии 3-5 Дж/см², зарегистрированная величина импульса отдачи значительно выше, а его удельная величина в этом случае достигает ~ 30 дин·с/Дж (рис. 1, б, график 2). Прекращение нарастания величины $1/w$ при увеличении энергии в лазерном импульсе можно объяснить экранировкой поверхности образующейся плазмой и при использованных в эксперименте параметрах излучения достигнутая величина удельного импульса реактивной отдачи, скорее всего, является предельной. Из простых оценок следует, что к 10^8 мкс после оптического пробоя фокусирующие объемы матрицы полностью заполняются плазмой и она начинает расширяться в направлении падающего излучения. При плотности энергии 10-20 Дж/см² это не слишком препятствует достижению излучением сферической полости, но при 30 Дж/см² периферийные слои плазмы начинают сильно ослаблять излучение в режиме волны поглощения (импульсная интенсивность не превышает 10^6 Вт/см²), что резко снижает эффективность преобразования энергии излучения в механический импульс (см. график 2 на рис. 1).

Эксперименты в частотно-периодическом режиме ускорения мишеней в атмосфере проводились с учетом данных рис. 1 и результатов работ [6, 7]. Применялись диэлектрические и металлические мишени, выбирался диапазон плотности энергии (мощности) излучения лазера, в котором влияние экранировки проявлялось бы минимально - импульсная интенсивность была в пределах 100-400 кВт/см².

На рис. 2 приведена величина силы реактивной тяги, возникающей на мишенях при изменении средней мощности излучения в пределах 20-85 кВт. График 1, полученный при ускорении плоской мишени из плексигласа, свидетельствует, что наибольшая достижимая сила тяги не превышает 2.5 Н при длительности серии импульсов 0.47 с, в диапазоне 20-40 кВт наблюдается линейное возрастание силы, однако после 50 кВт наблюдается снижение эффективности преобразования энергии излучения в механический импульс за счет увеличения экранировки. Влияние экранировки устраняется в макете двигателя МЛД-1, в котором излучение достигает поверхности мишени из плексигласа под некоторым углом к поверхности, минуя факел [7]. В этом случае зависимость реактивной тяги от мощности излучения остается линейной во всем исследуемом диапазоне. Максимальная величина силы достигает 5 Н при 80 кВт средней мощности излучения (график 2 на рис. 2).

Третья кривая получена при ускорении в режиме плазмообразования медной мишени - макет МЛД-2. В этом случае достижимое значение F превосходит тягу, реализуемую в испарительном режиме. Наибольшее зарегистрированное в этом случае отклонение маятника соответствует приложенной к мишени силе реактивной тяги 7 Н при плотности лазерной энергии ~ 10 Дж/см².

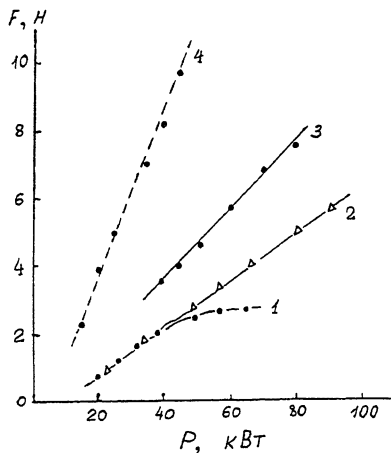


Рис. 2. Сила реактивной тяги лазерных двигателей в зависимости от средней мощности излучения.

1 - плоская мишень из плексигласа, 2 - макет лазерного двигателя МЛД-1, 3 - МЛД-2, 4 - расчет для плоской мишени из СЛАВИТа.

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить эффективность преобразования лазерной энергии в кинетическую:

$$\eta = \frac{E_k}{W} = \frac{mV^2}{2W}.$$

При облучении плоской диэлектрической мишени КПД преобразования не превышает 5%. Увеличить КПД удастся только путем снижения экранирующего влияния испаренного материала. Эффективность преобразования при ускорении МЛД-1, где экранировка сведена к минимуму, увеличивается до 16% при 40 Дж/см². К этой же величине стремится КПД при облучении плоских медных мишеней в плазменном режиме ускорения, но достигается это при 60 Дж/см².

Эффективность преобразования лазерной энергии в механический импульс при ускорении матрицы отражателей в случае, когда ее поперечный размер значительно превосходит диаметр единичной сферы, как в МЛД-2, может приближаться к 40%.

Перспективным мы считаем применение для ускорения материальных тел в атмосфере и в вакууме лазерно-химических реактивных двигателей (ЛХРД) [7]. Учитывая, что удельный импульс отдачи в этом случае даже при облучении плоской мишени может достигать 50-70 дин·с/Дж при эффективности преобразования энергии излучения в механическое движение более 30%, то применение реактивного сопла позволяет значительно увеличить силу реактивной тяги. При этом расход массы рабочего тела, как и затраты лазер-

ной энергии остаются прежними при прочих равных условиях, но эффективность преобразования может достигать 100% и более в зависимости от свойства используемого рабочего тела.

На рис. 2 (график 4) приведен расчет силы реактивной тяги с использованием результатов работ [6, 7] для условий проведенного эксперимента, но в качестве рабочего тела в лазерном двигателе применен материал СЛАВИТ. Из результатов расчета следует, что сила тяги в 10 Н может достигаться при значительно более низких затратах лазерной энергии, что свидетельствует о возможности создания эффективных лазерных двигателей, использование которых в условиях земной атмосферы и космоса будет выгоднее традиционных.

В заключение авторы считают своим долгом с благодарностью отметить активную помощь В.Д. Булаева в организации проведения экспериментов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] P i r r i A.N., W e i s s R.F. AIAA 5 th Fluid and Plasma Dinamics Conference, Boston, 1972; AIAA Paper N 72-719.
- [2] А г е е в В.П., Б а р ч у к о в А.И., Б у н к и н Ф.В., и др. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. В. 12. С. 2501.
- [3] J o n e s L.W. AIAA/SAE/ASME 16 th Joint Propulsion Conference, Hartford, 1980; AIAA-80-1264.
- [4] Космические двигатели: состояние и перспективы. Сб. статей. / Ред. Кейвни Л. М.: Мир, 1988.
- [5] P i r r i A.N., M o n s l e r M.J., N e b o l s i n e P.E. // AIAA J. 1973. V. 12. N 9. P. 1254
- [6] Л и у к о н е н Р.А., Т р о ф и м е н к о А.М. Тез. докл. 8 Всес. конф. по взаимод. оптического излучения с веществом. Ленинград, 1990. Т. 2. С. 185.
- [7] Л и у к о н е н Р.А., Т р о ф и м е н к о А.М. // Письма в ЖТФ, 1992, Т. 18. В. 7. С. 76-80.

Поступило в Редакцию
12 марта 1992 г.