

## ЛАЗЕРНЫЙ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

*А.И.Барчуков, Ф.В.Букин, В.И.Конов, А.М.Прохоров*

Обсуждается конкретный вариант лазерного воздушно-реактивного двигателя, в котором рабочим телом является только атмосферный воздух, а нагревающим его "топливом" – электромагнитное излучение, посылаемое на летательный аппарат посредством лазерного пучка с Земли или другого летательного аппарата.

Идея использования лазерного источника энергии, расположенного вне ускоряемого аппарата, для создания реактивной тяги уже обсуждалась в литературе [ 1, 2]. В этих работах, однако, речь шла главным образом об испарительном механизме тяги, возникающей за счет испарения рабочего тела ракеты над действием падающего на его поверхность излучения. Основной интерес создания таких устройств заключается в решении на их основе проблемы многократного использования мощных энергетических установок, обеспечивающих вывод космических аппаратов на заданную траекторию: множество ракет-носителей заменяется одной стационарной лазерной установкой, расположенной на Земле. Для осуществления такой программы, однако, необходимы лазеры, обладающие "суперпараметрами" – непрерывной мощностью  $P \gg 10^9$  вт и угловой расходимостью излучения  $\phi \ll 10^{-5}$  рад [ 1,2].

В настоящей статье рассматривается гораздо более скромная, но практически более легко реализуемая задача. Речь идет о создании лазерных воздушно-реактивных двигателей (ЛВРД), которые были бы предназначены для ускорения летательных аппаратов (ЛА) в пределах земной атмосферы и в которых единственным рабочим телом служил бы атмосферный воздух. Таким образом, отличие ЛВРД от традиционных

ВРД должно заключаться в том, что вместо химического топлива, которое несет ЛА с обычным ВРД, в ЛВРД для нагрева воздуха предлагается использовать электромагнитное излучение, посылаемое на ЛА лазерным пучком с поверхности Земли (или другого ЛА).

Для реализации основной идеи ЛВРД — использовать лазерное излучение для нагрева поступающего в двигатель атмосферного воздуха — необходимо, чтобы интенсивность излучения в области нагрева была бы достаточно велика, и воздух обладал бы значительным (нелинейным) поглощением с эффективной длиной пробега фотонов, не превышающей размеров области нагрева. С другой стороны, в самом лазерном пучке, распространяющемся через атмосферу, интенсивность наоборот должна быть ниже порога нелинейного поглощения. Это в частности означает, что ЛВРД непременно должен включать в себя фокусирующее устройство.

Необходимый высокий уровень поглощения лазерного излучения внутри области нагрева может быть реализован только за счет образования и поддержания в течение всего времени облучения оптического разряда в воздухе, находящемся в этой области. Существует несколько режимов самоподдержания оптических разрядов в газах [3], но не все из них могут быть использованы для эффективной и устойчивой работы ЛВРД. Мы рассмотрим сейчас лишь один конкретный вариант ЛВРД, исследованный нами как теоретически, так и экспериментально<sup>1)</sup>.

В этом варианте ЛВРД работает в пульсирующем (импульсно-периодическом) режиме в соответствии с таким же характером работы лазера. Каждый импульс излучения без существенного поглощения проходит через атмосферу и попадает на параболическую отражающую поверхность, которая находится в хвостовой части ЛА и жестко связана с ним.

Импульсная интенсивность излучения в фокальной области этой поверхности должна превышать порог оптического пробоя находящегося там воздуха. Практически наиболее целесообразно использовать  $\text{CO}_2$ -лазеры (или другие, работающие в дальнем ИК диапазоне, если таковые будут созданы с необходимым уровнем средней мощности и большим КПД), поскольку в дальнем ИК диапазоне порог пробоя воздуха (и вообще газов) может быть существенно снижен путем помещения в фокальную область вспомогательной твердой мишени, инициирующей низкороговой пробой (см. [4, 5]). При атмосферном давлении порог пробоя воздуха на длине волны  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$  при этом снижался до значений  $10^6 + 10^7 \text{ вт/см}^2$  (при длительности импульса  $\tau \sim 10^{-5} + 10^{-6} \text{ сек}$ ) [4, 5].

Оптический пробой воздуха внутри фокальной области, обладая свойствами взрыва, возбуждает в окружающем ее воздухе ударную волну, которая при своем распространении оказывает давление на отражающую поверхность, служащую, таким образом, одновременно и приемником давления. Если к приходу последующего импульса область около отражающей поверхности успевает заполниться холодным воздухом с исходными параметрами, то в результате импульсно-периодического облучения должна возникнуть последовательность ударных волн со средней

<sup>1)</sup> Более подробные результаты этих исследований будут опубликованы в другом месте.

силой давления (тяги)  $F_{\text{ср}} = I / T$ , где  $I$  — полный механический импульс, передаваемый ЛА одной ударной волной,  $T$  — период следования импульсов излучения.

Важнейшей характеристикой ЛВРД, определяющей перспективность их создания и использования, является цена тяги, равная отношению  $P_{\text{ср}}/F_{\text{ср}}$ , где  $P_{\text{ср}} = E/T$  — средняя мощность излучения ( $E$  — энергия в одном импульсе). Согласно общим представлениям  $F_{\text{ср}} = \dot{m}_{\text{ср}} u$ , где  $\dot{m}_{\text{ср}}$  — средний за период массовый расход воздуха,  $u$  — некоторая эффективная скорость истечения нагретого воздуха. Пока можно пренебречь противодействием окружающего воздуха, имеем:  $\dot{m}_{\text{ср}} \sim \rho R^3 / T$ ,  $u \sim (E / \rho R^3)^{1/2}$ , где  $R$  — фокусное расстояние отражающей поверхности,  $\rho$  — плотность исходного воздуха в области нагрева. Отсюда получаем:

$$F_{\text{ср}} \sim \frac{\rho R^3}{T} \left( \frac{E}{\rho R^3} \right)^{1/2} = \left( \frac{\rho}{p_e} \right)^{1/2} (R/R_0)^{3/2} P_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где  $p_e$  — внешнее давление воздуха,  $R_0 = (E/p_e)^{1/3}$ . Из (1) видно, что цена тяги  $P_{\text{ср}}/F_{\text{ср}} \propto (R/R_0)^{-3/2}$ , т. е. уменьшается с возрастанием параметра  $R/R_0$ . Однако формула (1) справедлива лишь при условии  $(R/R_0) \ll 1$ , когда противодействие действительно не существенно. При  $(R/R_0) > 1$  оно становится существенным, ударная волна приходит на приемник давления ослабленной и цена тяги начинает снова возрастать. При  $(R/R_0) \sim 1$  должен наблюдаться минимум, что соответствует оптимальному (по силе тяги) режиму работы ЛВРД. На основании теории точечного взрыва с применением теории размерностей (см., например, [6]) можно получить следующую общую формулу:

$$P_{\text{ср}}/F_{\text{ср}} = c_0 \sqrt{\rho/p_e} / [(R/R_0)^{3/2} f(R/R_0, R/D)], \quad (2)$$

где  $c_0 = \sqrt{\gamma p_e / \rho_e}$  — скорость звука в окружающем воздухе,  $D$  — диаметр приемника давления. Безразмерная функция  $f$  учитывает геометрию задачи и влияние противодействия; при изменении параметра  $R/R_0$  от нуля до бесконечности (и фиксированном геометрическом параметре  $R/D$ ) она монотонно убывает. Таким образом, оптимальное значение параметра  $(R/R_0)_{\text{опт}}$ , соответствующее максимуму знаменателя в формуле (2), вообще говоря, зависит от геометрического параметра  $R/D$ , а при заданном  $R_0$  (т. е. заданных  $E$  и  $p_e$ ) оптимальное фокусное расстояние  $R_{\text{опт}}$  зависит от диаметра  $D$ . Можно показать, что

$$R_{\text{опт}} \approx \frac{3}{4} R_0 [1 + \sqrt{1 - (D/3R_0)^2}], \quad (3)$$

причем оптимум существует только в интервале диаметров:  $0 \leq D \leq 3R_0$ .

Из (3) видно, что оптимальный фокус всегда лежит вне параболоида-приемника давления (или на его срезе при  $D_{max} = R_0$ ).

Проведенные нами эксперименты ( $\text{CO}_2$ -лазер с длительностью импульса  $\tau \approx 10^{-6}$  сек) подтвердили эти теоретические выводы. В них измерялся удельный импульс давления  $I/E$  на мишени различной геометрической формы (параболоид, полусфера, конус, диск при  $\rho/\rho_e = 1$ ), возникающий в результате оптического пробоя воздуха одним лазерным импульсом. Тем самым определялась цена тяги  $P_{\text{ср}}/F_{\text{ср}} = (I/E)^{-1}$ , которая должна возникать при импульсно-периодическом облучении; экспериментальные значения  $P_{\text{ср}}/F_{\text{ср}}$  изменяются в пределах  $20 + 50$  кгт/кг в зависимости от геометрического параметра  $R/D$ . Эти значения цены тяги оказываются того же порядка величины, что в настоящее время достигнуто в лучших вариантах электрореактивных двигателей. Для создания тяги  $F_{\text{ср}} \approx 50$  кг, необходимая средняя мощность лазера  $P_{\text{ср}} \approx 10$  Мвт при длительности отдельного импульса  $\tau \sim 10^{-5} + 10^{-6}$  сек и частоте повторения порядка 300 иц.

Основное преимущество ЛВРД перед всеми существующими в настоящее время ракетными двигателями (а также ЛРД с испарительным механизмом тяги), очевидно, заключается в том, что конечный вес ЛА при этом совпадает с его стартовым весом. Если, кроме того, конструктивно удастся приблизить полезный вес ЛА к его полному весу, то можно надеяться, что ЛВРД смогут обеспечить рекордные значения ускорений, приобретаемых ЛА на всей траектории их активного движения.

Физический институт им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
4 декабря 1975 г.

### Литература

- [1] A.R.Kantrowitz. *Aeronautics and Astronautics*, **9**, 35, 1971; **10**, 74,
- [2] A.N.Pirri, M.J.Monsler, P.E.Nebolsine. *AIAA J.* **12**, 1254, 1974.
- [3] Ю.П.Райзер. *Лазерная искра и распространение разрядов*, М., изд. Наука, 1974.
- [4] А.И.Барчуков, Ф.В.Бункин, В.И.Конов, А.М.Прохоров. *Письма в ЖЭТФ*, **17**, 413, 1973.
- [5] А.И.Барчуков, Ф.В.Бункин, В.И.Конов, А.А.Любин. *ЖЭТФ*, **66**, 965, 1974.
- [6] Л.И.Седов. *Методы подобия и размерностей в механике*, М., изд. Наука, 1967.