

О возможности повышения эффективности лазерного реактивного двигателя за счёт присоединения массы газа ударных волн

В.В.Аполлонов, В.И.Богданов

На базе результатов исследований реактивных энергодвигательных установок с пульсирующим рабочим процессом, тяга в которых значительно увеличивается за счёт присоединения массы газа, и анализа работы лазерного реактивного двигателя (ЛРД) рассмотрена возможность присутствия этого эффекта и в ЛРД. Выполнены расчётно-теоретические исследования тяговых характеристик пульсирующих реактивных двигателей с присоединением массы газа. Исследования эффекта присоединённой массы газа или продуктов абляции материала рефлектора в ЛРД перспективны для оптимизации газодинамических параметров, обеспечивающих реализацию максимальной тяговой эффективности такого двигателя.

Ключевые слова: газодинамический лазер, лазерный реактивный двигатель, присоединённая масса, резонатор-усилитель тяги, пульсирующий рабочий процесс.

1. Введение

Одним из перспективных ракетных двигателей нового класса является лазерный реактивный двигатель (ЛРД) [1–5]. Это двигатель космического аппарата, проходящего начальную часть траектории под действием направленной на него с поверхности Земли длинной серии лазерных импульсов. ЛРД значительно экономичней традиционных двигателей на химическом топливе. На начальном этапе полёта в качестве рабочего тела применяется атмосферный воздух, а за пределами атмосферы – продукты абляции материала рефлектора или находящегося в нём легко ионизируемого вещества.

Для получения реактивного движения [5] генерируемое лазером импульсно-периодическое излучение фокусируется рефлектором, находящимся на торце ракеты, вблизи своей отражающей поверхности и создаёт периодически повторяющиеся лазерные искры. Искры генерируют в воздухе или в продуктах абляции материала рефлектора ударные волны, которые передают ему часть своего импульса. Частота повторения искр ограничена временем смены газа в рефлекторе и в зависимости от скорости движения ракеты может варьироваться от сотен герц до десятков килогерц.

Для повышения тяговой эффективности ЛРД в работе [5] предложен ряд мер, в частности резонансное объединение ударных волн, генерируемых оптическим пульсирующим разрядом. Показано, что удельную тягу можно увеличить также за счёт трансформации радиальной ком-

поненты ударной волны в продольную компоненту. В итоге тяга может быть увеличена в четыре раза.

Из теории реактивного движения известно, что тяга двигателя определяется из уравнения количества движения Эйлера. В упрощённом виде, без учёта входного импульса (на стенде) и при равенстве расходов воздуха и паров материала, для воздушно-реактивного двигателя тяга определяется как

$$R = Gc + (P_{\text{noz}} - P_{\text{ext}}),$$

где G – расход газа; c – скорость истечения газа; P_{noz} – статическое давление на срезе сопла; P_{ext} – давление окружающей среды.

Для стационарного течения удельная тяга, т.е. тяга, отнесённая к расходу воздуха 1 кг/с, равна скорости истечения газа c при условии $P_{\text{noz}} = P_{\text{ext}}$.

Скорость истечения c в основном определяется параметрами термодинамического цикла. Возможности повышения скорости относительно достигнутого уровня ограничены, например, её температурной зависимостью, пропорциональной \sqrt{T} , а не T , как в случае G ; при этом с ростом выходной скорости растут потери. Для дальнейшего повышения тяговой эффективности целесообразно рассмотреть результаты работы [5] с использованием новых данных о пульсирующем рабочем процессе в реактивных двигателях.

2. Результаты исследований

Ниже приведены результаты исследований, в которых показана возможность повышения тяговой эффективности реактивных двигателей за счёт волнового (ударного) присоединения масс газа в пульсирующем рабочем процессе, и предпринята попытка перенести эти результаты на физическую картину процессов, происходящих в ЛРД.

1. В ПАО «ОДК-Сатурн» были проведены испытания экспериментального пульсирующего воздушно-реактив-

В.В.Аполлонов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38;
e-mail: vapollo@kapella.gpi.ru

В.И.Богданов. ПАО «ОДК-Сатурн», Россия, Ярославская обл., 152903 Рыбинск, просп. Ленина, 163

Поступила в редакцию 19 апреля 2021 г., после доработки – 20 мая 2021 г.

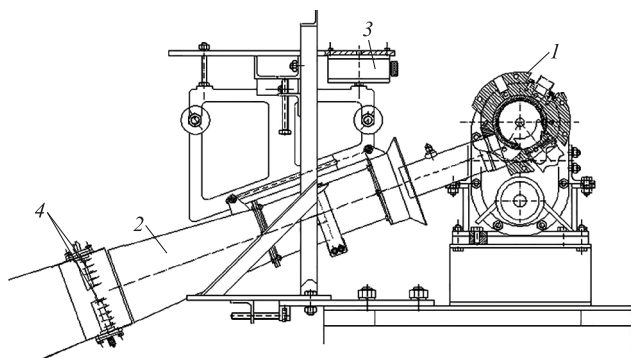


Рис.1. ПуВРД с золотниковой камерой сгорания и эжекторным усилителем тяги:

1 – ПуВРД; 2 – эжекторный канал; 3 – датчик измерения силы; 4 – датчики измерения полного давления и температуры газа.

ного двигателя (ПуВРД), выполненного на базе высокочастотной золотниковой камеры сгорания (КС) постоянного объёма ($V = \text{const}$) нового типа [6, 7] как с эжекторным усилителем тяги (ЭУТ) (рис.1), так и без него.

Результаты измерений тяги (тяговой стенкой) двигателя без ЭУТ и её расчётов при допущении квазистационарности процесса истечения газа показали, что измеренная тяга R примерно в два раза (в зависимости от частоты вращения золотника n) превышает расчётное значение (рис.2). Это подтверждает известное теоретическое исследование единичного цикла (одномерного разлёта продуктов детонации – газа) [8], которое показало возможность увеличения импульса в атмосфере в три раза по сравнению с вакуумом за счёт присоединения атмосферной массы ударной волной.

В работе [8] также показано, что при взаимодействии газа с атмосферой происходит колебательный процесс, в определённые моменты которого газ движется обратно к источнику. Этот отработанный газ может стать присоединённой массой для следующего цикла. При скажности рабочих пульсаций, близкой к нулю, возможно использование части отработанной цикловой массы струи газа (её хвостовой части, имеющей меньшую скорость, чем фронт) в качестве присоединённой массы (рис.3).

Результаты испытаний ПуВРД с ЭУТ представлены на рис.4–6 в виде зависимостей измеренных усилий на ЭУТ, динамического напора и пульсаций давления на выходе из эжекторного канала от частоты вращения золотника n [6].

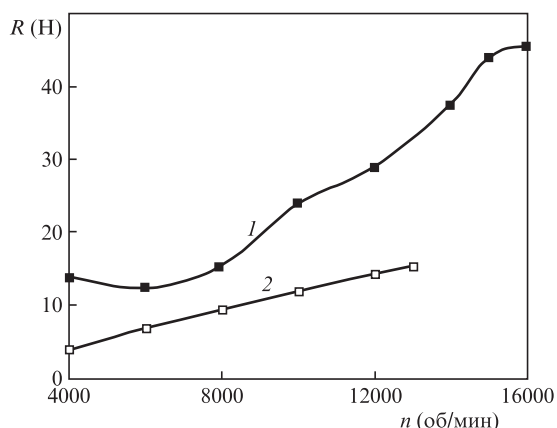


Рис.2. Экспериментальная (1) и расчётная (2) зависимости тяги ПуВРД без ЭУТ от частоты вращения золотника.

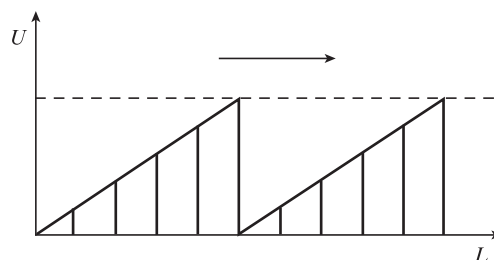


Рис.3. Типичное распределение скорости U цикловых масс газа по длине эжекторного канала L .

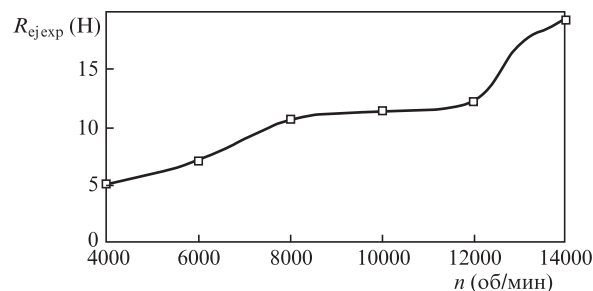


Рис.4. Зависимость измеренных усилий на эжекторном канале от частоты вращения золотника.

Представляет интерес изменение параметров в диапазоне частот вращения золотника 12000–13000 об/мин. При изменении n на 8,3% усилие на ЭУТ R_{ej_exp} увеличилось на 41% (табл.1). При этом резко изменилось поле скоростей на выходе из ЭУТ – произошло уменьшение скорости потока в пристеночной области канала. Для объяснения явления была выполнена расчётная оценка изменения тяги на ЭУТ R_{ej_calc} по параметрам потока на его выходе и проанализированы экспериментальные и расчётные результаты [9].

Табл.1. Экспериментальные и расчётные значения тяги ЭУТ в зависимости от частоты вращения золотника.

n (об/мин)	R_{ej_calc} (Н)	R_{ej_exp} (Н)
12000	10.18	12.14
13000	10.23	17.15

Примечание. Измерения проводились с помощью тензометрического датчика типа ДСТ (погрешность $\pm 0.1\%$).

По расчётной оценке усилие на эжекторном канале при увеличении n с 12000 до 13000 об/мин увеличилось всего на 0,5%, в то время как измеренное усилие возросло на 41%. Рассмотрим противоречие между расчётными и экспериментальными данными с учётом изменения поля скоростей в этом диапазоне частот вращения золотника.

Резкое уменьшение скорости потока в пристеночной области эжекторного канала (рис.5) можно объяснить его отрывом в диффузорной части канала. Известно [10], что отрыв пограничного слоя всегда связан с образованием вихрей в результате взаимодействия прямого и обратного течений, и это возможно в случае колебательного процесса. В этом процессе и может происходить присоединение массы, повышающее тягу [8], т.е. одна и та же масса воздуха может создавать тягу сначала как активная, а затем как присоединённая. При этом происходит преобразование кинетической энергии (динамического напора) в импульс, что и объясняет противоречие между измеренной тягой и её расчётной оценкой по динами-

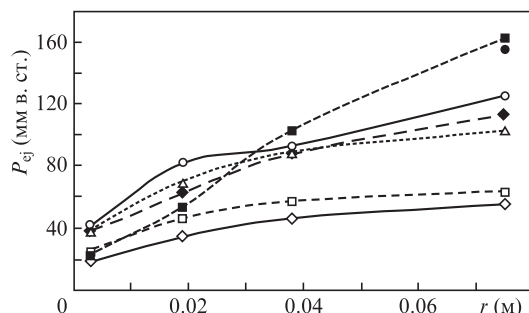


Рис. 5. Распределение измеренного водяными пьезометрами динамического напора в радиальном направлении на выходе эжекторного канала при $n = 4000$ (◇), 6000 (□), 8000 (△), 10000 (○), 12000 (◆), 13000 (■) и 14000 об/мин (●).

ческому напору. Можно предположить, что при $n = 12000$ об/мин имеет место умеренное присоединение массы газа без отрыва потока, а при $n = 13000$ об/мин – более интенсивное, с отрывом потока, и, возможно, уже неоднократное присоединение в резонансном колебательном процессе одной и той же массы газа (назовём это присоединением собственной массы газа).

Для подтверждения присоединения собственной массы газа, а также для исключения возможного присоединения внешней массы на выходе эжекторного канала (на расстоянии 10–20 мм) устанавливался цилиндрический экран. Испытания показали [9], что динамика усилия на эжекторном канале не изменилась, значения усилий с экраном и без него мало отличались для одних и тех же частот пульсаций. Характерным является и то, что динамика амплитуды пульсаций ΔP , измеренных на выходе эжекторного канала датчиком ЛХ-610, для $n > 12000$ об/мин такая же, как динамика усилия, измеренного на эжекторном канале.

Отметим, что взаимодействие масс в пульсирующей газовой струе приводит к потерям на удар. При этом чем выше упругость газа, тем большая часть кинетической энергии газа при ударе преобразуется в импульс.

2. В Центре Гленна НАСА при экспериментальных исследованиях пульсирующего ЭУТ с резонансным устройством на входе [11] получен КПД эжекторного процесса на уровне 1.15, что противоречит законам сохранения. Отмечено обратное (назад) течение газа в определённые промежутки времени. Авторы исследования не смогли дать этому объяснения. Противоречие разрешается при условии использования одной и той же массы воздуха сначала в качестве активной, а затем как присоединённой (не учтённой) массы в колебательном процессе.

3. В Институте механики МГУ [12] удельные (приведённые к расходу рабочего тела) тяговые параметры пульсирующего процесса, организованного на установке на базе сферического резонатора (рис. 6), в 1.5–2 раза превышали значения, соответствующие квазистационарному расчёту.

Аналогичные экспериментальные работы, проведённые в 2004 г. в НТЦ им. А. Люльки, ещё раз подтвердили данные результаты. Кроме того, при определённых режимах работы была выявлена прямо пропорциональная зависимость тяги от температуры воздуха при постоянном давлении и неизменной геометрии проточной части. Предположительно это можно объяснить тем, что с ростом температуры повышается упругость взаимодейству-

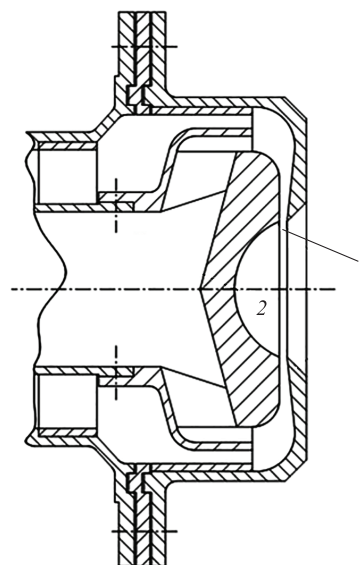


Рис. 6. Схема сферического резонатора: 1 – критическое сечение сопла; 2 – сферическая полость.

ющих цикловых масс газа (они меньше деформируются), и поэтому уменьшаются потери на удар.

Расчётные исследования сферического резонатора-усилителя тяги [13] показали, что в этом случае увеличение тяги происходит в основном за счёт присоединения собственной массы газа в высокочастотном колебательном процессе (рис. 7).

Кроме того, исследовалось изменение скорости течения газа по мере удаления от резонатора. Из анализа полученных результатов следует, что из-за присоединения масс газа эта скорость значительно меньше расчётной скорости для традиционного ВРД со стационарным течением. Скорость течения в критическом сечении сопла также меньше расчётной квазистационарной скорости из-за повышенного давления в сферической области резонатора. Такой резонатор как усилитель тяги может использоваться в качестве выходного устройства (сопла) в реактивных двигателях.

4. Для проверки эффекта увеличения импульса за счёт взаимодействия только собственных масс газа в пульсирующем реактивном двигателе в условиях космоса была создана экспериментальная установка с золотниковым устройством, подобным камере сгорания постоянного

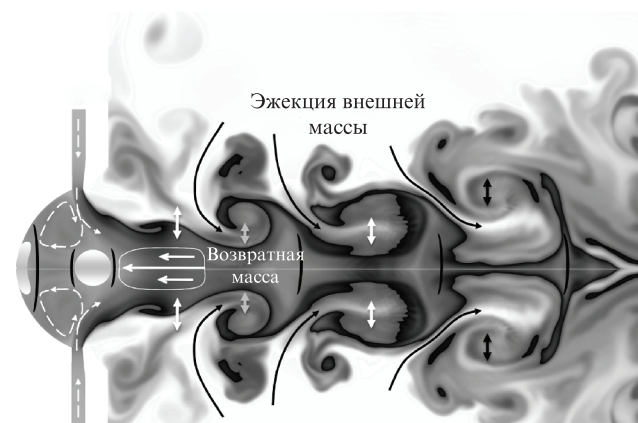


Рис. 7. Визуализация течения в резонаторе.

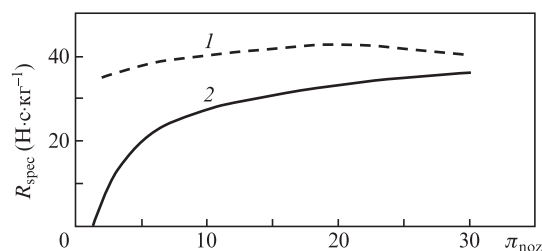


Рис.8. Экспериментальная (1) и расчётная (2) зависимости $R_{\text{спец}}$ от $\pi_{\text{поз}}$.

объёма, с привязкой к вакуумной камере ВК-25 («НПО Машиностроение»), обеспечивающей давление 0.001 МПа (технический вакуум) [14]. На рис.8 представлены итоговые результаты испытаний, которые показали превышение измеренной удельной тяги над расчётной, что свидетельствует о присоединении собственной массы газа. Однако в экспериментах с максимальной степенью понижения давления в сопле $\pi_{\text{поз}} = 30$ отмечено незначительное превышение удельной тяги над расчётной квазистационарной. Это можно объяснить возросшими потерями (как гидравлическими, так и волновыми) из-за неоптимальной проточной части (золотник – выходное устройство). Также возрастают потери на удар взаимодействующих цикловых масс газа.

3. Выводы

Анализ работы [5] с учётом приведённых выше результатов исследований экспериментальных двигательных установок показал:

- с физической точки зрения процессы, протекающие в рефлекторе и установках, в части взаимодействия масс газа или продуктов абляции материала рефлектора могут быть близки к процессам образования ударных волн;

- четырёхкратное увеличение тяги ЛРД [5] может быть дополнительно вызвано эффективным присоединением массы газа (продуктов лазерной абляции материала рефлектора) за счёт резонансного объединения ударных волн;

- расчётное исследование [5] выполнено без учёта эффекта присоединения масс газа (продуктов лазерной абляции); учёт этого эффекта позволит при оптимальных соотношениях газодинамических параметров (частота, скважность рабочих пульсаций) оптимизировать процесс присоединения масс газа (продуктов лазерной абляции) с максимальной эффективностью;

- с целью увеличения тяги ЛРД за счёт присоединения масс газа [5] целесообразно провести дополнительное исследование его тяговых характеристик, отнесённых к расходу газа, создающего тягу (с оценкой скорости его истечения), с использованием современных численных методов; следует также оценить возможность проведения дальнейшей оптимизации параметров процесса присоединения масс газа (продуктов лазерной абляции).

Отметим также, что созданная в ПАО «ОДК-Сатурн» КС ($V = \text{const}$) [15] может быть использована в наземной лазерной установке для подачи импульсов на ЛРД. Её повышенная эффективность, по сравнению с применением традиционной КС ($P = \text{const}$), обеспечивается увеличенной температурой газа (на 10^3 К выше из-за кратковременности воздействия) и по крайней мере вдвое большей скоростью падения температуры в сопле [16].

Данное исследование представляет значительный интерес и с точки зрения оценки эффективности лазерных методов очистки космического пространства от космического мусора и продуктов внеземного происхождения [17].

1. Kantrowitz A.R. *Astronautics and Aeronautics*, **10** (5), 74 (1972).
2. Pirry A., Monsler M., Nebolsine R. *Rakett. Tekh. Cosmonavt.*, **12** (9), 112 (1974).
3. Агеев В.П., Барчуков А.И., Бункин В.Ф., Конов В.И., Прохоров А.М. и др. *Квантовая электроника*, **4**, 2501 (1977) [*Sov. Quantum Electron.*, **7**, 1430 (1977)].
4. Myrabo L.N., Raizer Yu.P. *Proc. 2nd Int. Symp. on Beamed Energy Propulsion* (Sendai, Japan, 2003, p. 534).
5. Аполлонов В.В., Тищенко В.Н. *Квантовая электроника*, **36** (7), 673 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (7), 673 (2006)].
6. Богданов В.И. *Инженерно-физический журнал*, **79** (3), 85 (2006).
7. Bogdanov V.I. *Am. J. Mod. Phys.*, **2** (4), 195 (2013).
8. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. *Физика взрыва* (М.: Наука, 1975).
9. Богданов В.И., Буракова Л.И. *Вестник РГАТУ им. П.А.Соловьёва*, № 3, 90 (2011).
10. Сергель О.С. *Прикладная гидрогазодинамика* (М.: Машиностроение, 1981).
11. Paxson D.E., Wilson J., Dougherty K.T. *AIAA*, paper 3915 (2002).
12. Левин В.А., Смахов Г.Д., Тарасов А.И. Препринт № 42-98 (М.: Институт механики МГУ, 1998).
13. Богданов В.И., Хангалин Д.С. *Вестник РГАТУ им. П.А.Соловьёва*, № 3, 42 (2014).
14. Богданов В.И., Реш Г.Ф., Шишурин А.В. *Вестник РГАТУ им. П.А.Соловьёва*, № 1, 23 (2013).
15. Богданов В.И., Кузнецов С.П. *Вестник СГАУ им. С.П.Королёва*, № 2, 123 (2011).
16. Богданов В.И. Докт. дис. (Москва, МАИ, 2003).
17. Apollonov V.V. *High Power/Energy Lasers in our Life* (New York: Nova Science Publishers, 2016).