

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНОЙ ПРЯМОТОЧНОЙ ЭЖЕКТОРНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ ВОДОРОДА

А. В. Потапкин, В. Л. Долматов, А. И. Трубицын

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск, potapkin@itam.nsc.ru

Экспериментально определены зависимости тяги прямоточной эжекторной камеры сгорания от ее геометрических размеров при вибрационном горении водорода. В качестве камеры сгорания использовалась цилиндрическая труба, к которой присоединялись конфузорные насадки на входе и диффузорные насадки на выходе. Показано, что существуют предельные размеры входного насадка и предельная длина камеры, обеспечивающие максимальную тягу.

Ключевые слова: прямоточная камера сгорания, вибрационное горение, тяговые характеристики.

Для прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) вопрос о месте приложения реактивной силы и ее величине хорошо изучен [1, 2]. Известно, что в стационарных условиях при нулевой скорости набегающего потока ПВРД не создает тяги, однако при нестационарном (пульсирующем) горении в камере сгорания и нулевой скорости набегающего потока ПВРД может создавать тягу. Примерами являются двигатели с механическими клапанами ракеты-снаряда Фау-1 и двигатели с аэродинамическими клапанами [2, 3]. Пульсирующее горение обеспечивает избыточное давление в камере сгорания двигателя, за счет чего формируется нестационарная тяга.

Исследование вибрационного горения водорода в трубах в эжектируемом потоке воздуха [4] показало, что при развитом вибрационном горении на входе в трубу возникает зона низкого давления. Эта особенность течения может быть использована для формирования тяги. Тяга зависит от геометрии входа в трубу, положения инжектора водорода относительно концов трубы и от расхода водорода.

Известен эффект понижения давления на входе газовых эжекторов. Этот эффект используется в эжекторных усилителях тяги реактивных двигателей [1]. Если рассматривать инжектор водорода как сопло реактивного двигателя, то реактивную силу, возникающую при истечении водорода из инжектора, можно усилить с помощью эжектора. В стационарных течениях коэффициент усиления тяги оценен и при неограниченном увеличении диаметра эжектора его предельное значение равно двум.

На практике, как правило, удается получить увеличение тяги реактивного двигателя на $20 \div 30$ %. По сравнению с этим в нестационарных режимах истечения газа из сопла реактивного двигателя в эжекторный усилитель тяга может быть увеличена на $100 \div 125$ % (эффект присоединенных масс воздуха) [5].

В настоящей статье представлены результаты экспериментов с нестационарным горением водорода в эжекторных камерах сгорания. Показано, что эффект снижения давления на входе в эжектор может быть использован для создания тяги прямоточных камер сгорания при нулевой скорости набегающего потока воздуха или для усиления тяги реактивного двигателя при организации нестационарного горения внутри эжектора.

На рис. 1,а показана схема эксперимента. В качестве камеры сгорания использовалась стальная трубка длиной 150 мм с внутренним диаметром 16 мм толщиной стенки 1 мм. Камера сгорания размещалась в лабораторном помещении и закреплялась на пантографе так, что могла перемещаться только в продольном направлении. Газообразный водород подавался в камеру сгорания через иглу инжектора и принудительно воспламенялся в начале эксперимента внешним пламенем. Внутренний диаметр иглы инжектора 1,2 мм. Система подачи водорода механически развязана с камерой сгорания.

Измерения тяги проводились тензовесами, к штанге которых прикреплялась камера сгорания. Статическое давление эжектируемого воздуха регистрировалось датчиком давления,

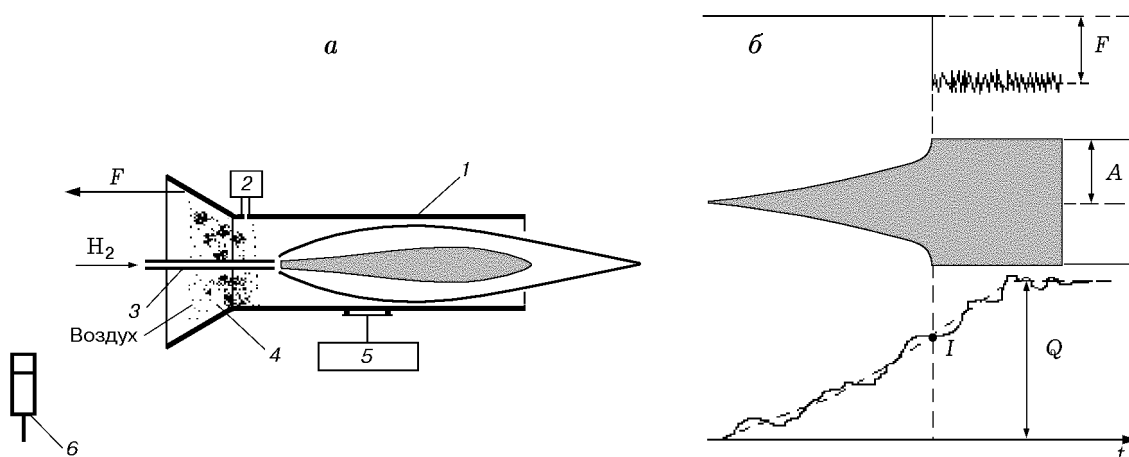


Рис. 1. Схема эксперимента:

a — установка: 1 — труба (камера сгорания), 2 — датчик статического давления, 3 — инжектор водорода, 4 — область низкого давления, 5 — тензвесы, 6 — микрофон; *b* — пример записи параметров в эксперименте: F — сила тяги, A — амплитуда звуковых колебаний перед входом в камеру сгорания, Q — объемный расход водорода, t — время, I — точка перехода от вибрационного горения к стадии развитого вибрационного горения

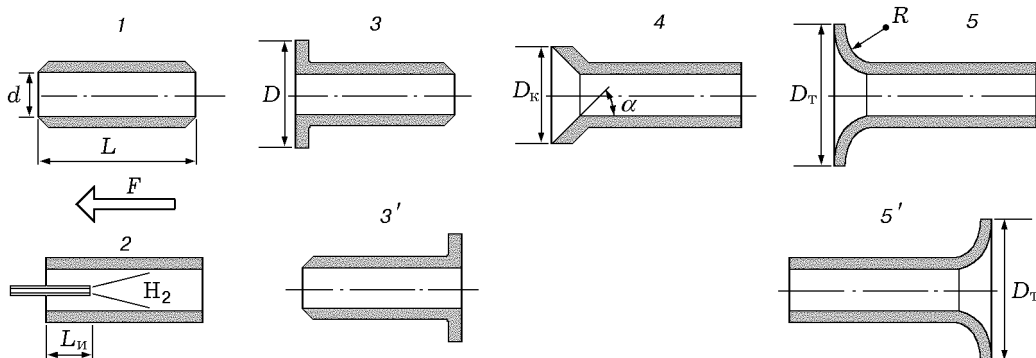


Рис. 2. Геометрия камеры сгорания:

$L = 150$ мм, $d = 16$ мм, $D = 30$ мм, $D_k = 28$ мм, $D_T = 35$ мм, $\alpha = 14^\circ$, $L_{ш}/2L \approx 0,195$

установленным в месте сопряжения трубы и конфузорного насадка. Акустические измерения выполнялись измерителем шума и вибраций ИШВ-1, оснащенный конденсаторным микрофоном М-101, размещенным перед входом в камеру на расстоянии, равном половине длины камеры. Расход водорода определялся по перепаду давления на наборе шайб, установленных в водородной трассе, с помощью преобразователя разности давлений «Сапфир-22ДД». Результаты измерений одновременно выводились и записывались на многоканальном шлейфовом осциллографе Н-117. Подробная схема системы измерений и регистрации данных приведена в [6]. Пример качественной

регистраграммы представлен на рис. 1, *б*. При обработке результатов использовались осредненные значения объемного расхода водорода Q и тяги F (см. соответствующие штриховые линии на рис. 1, *б*). Точкой I отмечен переход от вибрационного горения к стадии развитого вибрационного горения. Как видно из рисунка, переход сопровождается скачкообразным изменением измеряемых параметров. Расшифровка регистраграммы выполнялась по тарировочным зависимостям, полученным в предварительных экспериментах. Тарировка тензвесов выполнена с помощью механического грамметра. Ошибка измерений силы $\pm 0,01$ Н. Погрешность измерения звукового давления в диапа-

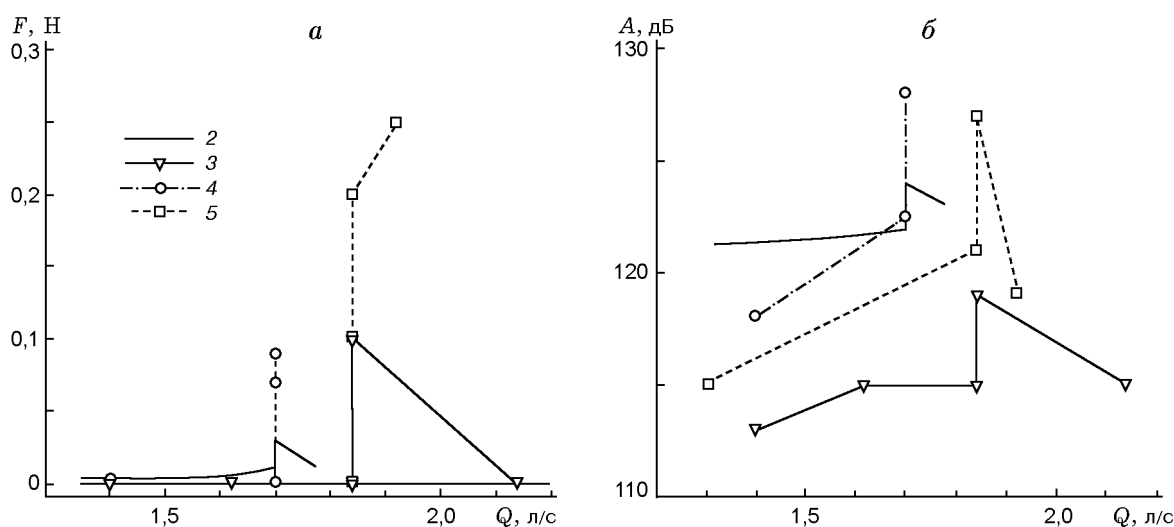


Рис. 3. Тяга и уровень звуковых колебаний в камерах сгорания различной геометрии: номера линий соответствуют номерам камер на рис. 2

зоне 30 ÷ 130 дБ составляла ±2 дБ. Относительная погрешность измерения расхода водорода ±0,5 %. Разница между мгновенным значением расхода водорода и осредненным значением, полученным при обработке регистрограмм, в большинстве экспериментов не превосходила ±0,2 л/с.

Камеры сгорания с насадками схематично показаны на рис. 2. В качестве насадков применялись плоская шайба, конфузор в виде усеченного конуса (обозначен индексом «к»), конфузор или диффузор с поверхностью в форме тора (обозначен индексом «т»). Для указанных камер изменение тяги F и уровня звука A в зависимости от расхода водорода Q приведены на рис. 3. Для камеры 1 (трубка с острыми кромками) $F = 0$ при всех расходах водорода. Для камеры 2 (трубка с ровно срезанными торцами) $F_{\max} = 0,03 \div 0,04$ Н. Для камер сгорания 3–5 (насадки установлены на входе в камеру сгорания) $F = 0,09, 0,1$ и $0,25$ Н соответственно. Видна корреляция записей тяги F и уровня звука A . По результатам измерений установлено, что при смене режимов горения происходит внезапное изменение уровня звука от 120 до 130 дБ и выше и значение $A = 120$ дБ может считаться пороговым значением уровня звука, после которого наблюдаются эффекты увеличения тяги эжекторной камеры сгорания. При расположении насадков на выходе из камеры сгорания (камеры 3' и 5') $F \approx 0,02$ Н.

На рис. 4 представлены результаты измерений и некоторые оценки для камеры 5 (см.

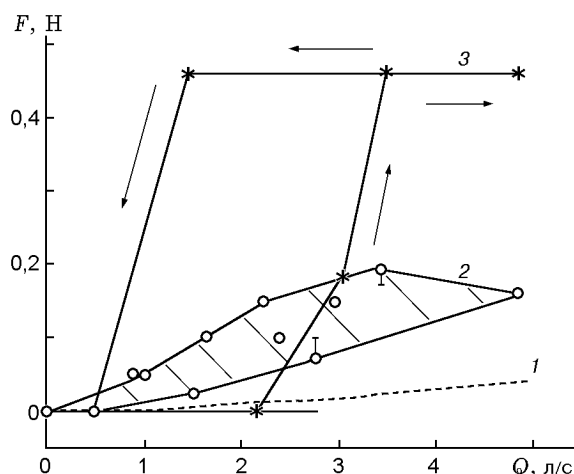


Рис. 4. Зависимость тяги от расхода водорода: $L = 210$ мм, $d = 18$ мм, $D_T = 22$ мм, $R = 11$ мм, $L_{и}/2L = 0,167$; 1 — несжимаемая жидкость, 2 — эксперимент без горением, 3 — эксперимент с горением

рис. 2). Эта камера представляет собой кварцевую трубку длиной 210 мм с внутренним диаметром 18 мм, размер конфузора $D_T = 22$ мм, $R = 11$ мм, положение инжектора $L_{и}/2L = 0,167$. Для сравнительного анализа можно провести простую оценку силы, приложенной со стороны эжектируемого воздуха к конфузору. Если предполагать, что коэффициент избытка эжектируемого воздуха $\alpha = 1$, то скорость потока эжектируемого воздуха на входе в конфузор мала и можно пренебречь сжимаемостью воздуха. Предположим, что течение в конфузо-

ре является стационарным и одномерным. Обозначив индексом 0 параметры эжектируемого воздуха на входе в конфузор, индексом 1 — параметры в горле конфузора на входе в камеру сгорания, а индексом x — параметры внутри конфузора, с учетом уравнения неразрывности из уравнения Бернулли получим

$$p_x = p_0 + 0,5\rho(2,38Q)^2 \cdot 10^{-6}(S_0^{-2} - S_x^{-2}),$$

$$F = \int_0^1 (p_x - p_0) dS.$$

После интегрирования

$$F = 0,00177Q^2.$$

Здесь Q — расход водорода, p — статическое давление воздуха, ρ — плотность воздуха, S — площадь поперечного сечения конфузора; размерность F — Н, S — м², Q — л/с. Это решение показано на рис. 4 кривой 1.

Область 2 (со штриховкой) на рис. 4 соответствует результатам измерений силы F при продувке эжектора водородом без горения. Область 2 лежит выше кривой 1. Это говорит о том, что в стационарных режимах эжекции в зону горения должно поступать воздуха больше, чем необходимо для полного сгорания водорода, т. е. $\alpha > 1$. В соответствии с линейной теорией [7] это одно из условий, необходимых для реализации вибрационного горения.

В режиме вибрационного горения зависимость $F(Q)$ имеет более сложный характер (кривая 3 на рис. 4). Видно, что переход к стадии развитого вибрационного горения произошел при $Q = 2,1$ л/с, что привело к развитию тяги. Стрелками показан путь обхода по этой кривой. Гистерезис в зависимости $F(Q)$ типичен и проявляется независимо от размеров камеры сгорания и типа входа в камеру [8]. При реализации развитого вибрационного горения тяга достигает некоторого предельного значения и дальнейшее увеличение Q может сопровождаться как ростом, так и уменьшением F (см. рис. 3) в зависимости от положения зоны горения в камере относительно входа и выхода. Рост Q в условиях развитых пульсаций в потоке может приводить к смещению зоны горения (энерговыведения) в сторону выхода из камеры, при этом меняются условия развития и существования колебаний [7, 9].

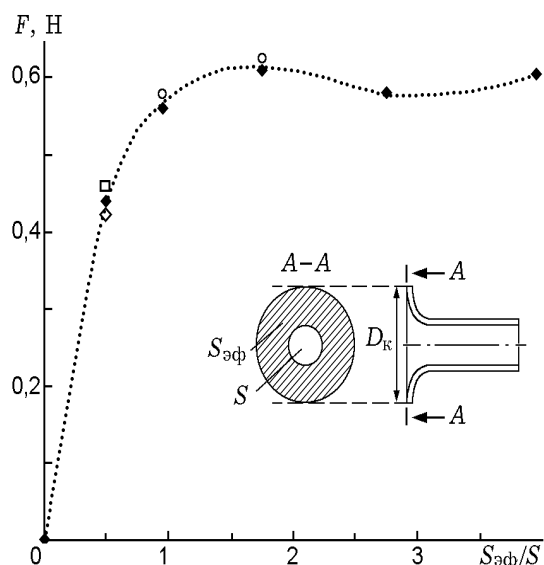


Рис. 5. Зависимость тяги от размеров конфузора:

$L = 210$ мм, $d = 18$ мм, $L/d = 11,67$, $L_{н} = 70$ мм, $L_{н}/2L = 0,167$

Распределение давления по поверхности конфузора иллюстрирует рис. 5. Камера сгорания в этих экспериментах такая же, как и на предыдущем рисунке. Сравнение тяги при различных размерах входа в конфузор выполнены на полке гистерезиса тяги при одинаковых значениях $Q = 5$ л/с (S — площадь поперечного сечения камеры сгорания, $S_{эф}$ — площадь проекции поверхности конфузора на плоскость, ортогональную оси камеры). Видно, что при $S_{эф}/S \gtrsim 1$ значение F практически постоянно. Это означает, что существует предельный размер конфузора, обеспечивающий максимум тяги эжекторной камеры сгорания.

Продольный размер камеры сгорания L существенно влияет на возможность получения вибрационного горения и на величину тяги. В монографии [7] для получения вибрационных режимов горения рекомендуется использовать трубы с относительной длиной $L/d = 30 \div 50$ (горение заранее подготовленной газозвушной смеси). На рис. 6 представлена зависимость тяги от относительной длины камеры. Видно, что начиная с $L/d \approx 12$ тяга слабо меняется, а при $L/d < 8,5$ значение F отрицательное, что обусловлено трением потока о стенки камеры. При этом получение развитого вибрационного горения вообще становится проблематичным. На рисунке вертикальными линиями (за исключением первой) показаны области из-

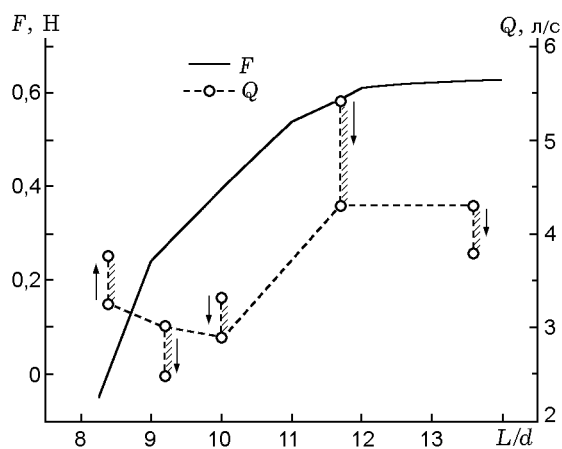


Рис. 6. Зависимость тяги от длины камеры:
 $d = 18$ мм, $L_n/2L = 0,167$, $D_T = 40$ мм

менения Q в зоне гистерезиса. Для сравнения можно указать на результаты работы [4], где использовалась камера с относительной длиной $L/d = 7,5$ и измеренные значения тяги не превосходили $0,05$ Н при $Q > 4$ л/с.

Как показано в [6], использование акустических резонаторов в таких системах позволяет увеличить тягу камеры сгорания. В области гистерезиса удельная тяга F/q эжекторной камеры сгорания с резонатором достигала значения ≈ 4000 м/с (здесь q — массовый расход водорода). Оценки удельной тяги камеры сгорания при развитом вибрационном горении водорода с учетом реактивной силы [10], возникающей при инжектировании водорода, показали, что она может достигать значения 5300 м/с.

Итак, в результате исследований установлено, что процесс вибрационного горения зависит от многих параметров и существуют предельные размеры камеры сгорания, обеспечивающие максимум тяговых характеристик. С учетом реактивной силы струи топлива при применении резонаторов в области гистерезиса возможно достижение величины удельного импульса прямоочной камеры сгорания более 5000 м/с при нулевой скорости набегающего потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
2. **Курзинер Р. И.** Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета. М.: Машиностроение, 1977.
3. **Нестационарное распространение пламени** / Под ред. Дж. Г. Маркштейна; Пер. с англ. М.: Мир, 1968.
4. **Баев В. К., Потапкин А. В., Чусов Д. В.** Влияние термоакустических процессов на силовые характеристики камеры сгорания // Математическое моделирование, аэродинамика и физическая газодинамика. Новосибирск: Изд-во Ин-та теор. и прикл. механики СО РАН, 1995. С. 187–188.
5. **Кудрин О. И., Данилов Ю. И.** Использование массы и энергии пространства как средство повышения экономичности космического полета // Труды пятых чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей Ф. А. Цандера. М.: Знание, 1979. С. 153–171.
6. **Баев В. К., Москвичев Д. Ю., Потапкин А. В.** Управление тяговыми характеристиками прямоочной камеры сгорания пульсирующего горения с помощью акустических резонаторов // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 5. С. 3–6.
7. **Раушенбах Б. В.** Вибрационное горение. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961.
8. **Potapkin A. V., Moskvichev D. Yu., Trubitsin A. I.** Hysterises of the acoustic and thrust characteristics of the ramjet combustion chamber at vibration regimes of fuel combustion // Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research. Novosibirsk: Publ. House of the Siberian Branch of the Russian Acad. of Sciences, 2000. Pt I. P. 171–176.
9. **Стретт Дж. В. (лорд Рэлей).** Теория звука / Пер. с англ. М.: Изд-во техн.-теор. лит., 1955.
10. **Движение ракет.** Введение в теорию полета ракет / А. А. Дмитриевский, В. П. Казаковцев и др.; Под ред. А. А. Дмитриевского. М.: Воен. изд-во, 1968.

Поступила в редакцию 28/XI 2001 г.,
 в окончательном варианте — 20/V 2003 г.