

УДК 536.46+621.43.05

## **Влияние резонаторов на акустические и тяговые характеристики прямооточной эжекторной камеры при вибрационном горении водорода**

**А.В. Потапкин, Д.Ю. Москвичев**

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: potapkin@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния акустических резонаторов на акустические и тяговые характеристики прямооточной эжекторной камеры сгорания при вибрационном горении водорода. Применялись резонаторы, имеющие одинаковое горло и разные диаметры полостей. Показано, что для имеющих одинаковые объемы резонаторов наибольшие тяговые характеристики достигаются в том случае, если диаметр полости мало отличается от диаметра горла резонатора.

**Ключевые слова:** горение водорода, прямооточная камера, резонаторы, тяговые характеристики.

Горение топлива в камерах сгорания может сопровождаться развитием самоподдерживающихся акустических колебаний. В научной литературе такие процессы принято называть вибрационным горением [1]. В случаях, когда акустические колебания нежелательны, применяют различные способы и устройства для их подавления. Примерами таких устройств являются демпфирующие трубки и резонаторы Гельмгольца [2, 3].

Экспериментальные исследования горения водорода в прямооточной эжекторной камере сгорания при нулевой скорости набегающего потока [4] показали, что увеличение амплитуды акустических колебаний при вибрационном режиме горения водорода может приводить к возникновению силы тяги камеры сгорания. Сила тяги направлена навстречу струе продуктов сгорания. Величина амплитуды колебаний и сила тяги зависят от расхода водорода, положения инжектора водорода в камере сгорания и геометрии входа в камеру сгорания. Вибрационное горение водорода сопровождается формированием зоны низкого давления на входе в камеру сгорания, что и приводит к развитию тяги.

В работе [5] представлены экспериментальные результаты исследования влияния акустического резонатора на тяговые характеристики прямооточной эжекторной камеры сгорания при вибрационном горении водорода. В экспериментах применялся резонатор в виде прямой трубки с диаметром полости, мало отличающимся от диаметра горла резонатора. Амплитуда акустических колебаний зависела

от длины резонатора и положения резонатора на камере сгорания. При присоединении резонатора к средней части камеры сгорания и увеличении амплитуды колебаний наблюдался рост тяговых характеристик камеры. Условия, при которых достигается максимум силы тяги камеры сгорания с резонатором, сформулированы в работе [6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния акустических резонаторов на акустические и тяговые характеристики прямоточной эжекторной камеры сгорания при вибрационном горении водорода.

Камера сгорания и резонаторы представлены на рис. 1. Обозначено:  $L_{\text{и}}$  — положение инжектора водорода,  $D$  — диаметр внутренней полости резонатора,  $L_{\text{п}}$  — положение поршня резонатора,  $L_{\text{р}}$  — положение резонатора на камере сгорания. Длина цилиндрической части камеры сгорания  $L \sim 150$  мм, диаметр — 16 мм. Вход в камеру сгорания выполнен в виде конфузора с тороидальной поверхностью. Диаметр входа — 35 мм, длина — 17 мм.

Горло резонаторов имело длину 15 мм и диаметр 9,8 мм. Диаметры внутренних полостей резонатора 10, 11 и 19 мм (рис. 1, *a*, *b*, *c* соответственно). Полость резонатора перекрывалась поршнем, положение которого изменялось при проведении экспериментов. Ось резонатора перпендикулярна оси камеры сгорания. Резонатор располагался в середине камеры сгорания  $L_{\text{р}}/L = 0,502$ .

Водород подавался через иглу инжектора, которая вводилась в камеру сгорания на глубину  $L_{\text{и}}/L = 0,338$ . Инжектор механически развязан с камерой сгорания.

Камера сгорания с резонатором закреплялась на пантографе так, что имела возможность только продольного их перемещения. Продольная сила (тяга или сопротивление)  $F$  регистрировалась тензовесами. Измерения амплитуды звуковых колебаний  $A$  выполнялись с помощью конденсаторного микрофона М-101 на расстоянии 75 мм перед входом в камеру сгорания. Сигнал с микрофона выводился на “Измеритель шума и вибраций” ИШВ-1. Расход водорода  $Q$  определялся с помощью преобразователя разности давлений Сапфир-22ДД по перепаду давления на гидросопротивлении в трассе подачи водорода. Для измерения скорости эжектированного потока воздуха использован термоанемометр постоянного сопротивления. Датчик термоанемометра имел следующие характеристики нити: длина  $\sim 2$  мм, диаметр — 5 мкм, диаметр державки — 2 мм, ток перегрева — 10 мА. Нить датчика термоанемометра с помощью державки вводилась в плоскость стыка конфузора и цилиндрической части камеры сгорания. При этом державка датчика была параллельна оси трубы, а нить датчика — перпендикулярна радиусу камеры сгорания и располагалась посередине между стенкой трубы и инжектором водорода. Показания приборов записывались на 12-ти канальный шлейфовый осциллограф Н117 и персональный компьютер IBM PC.

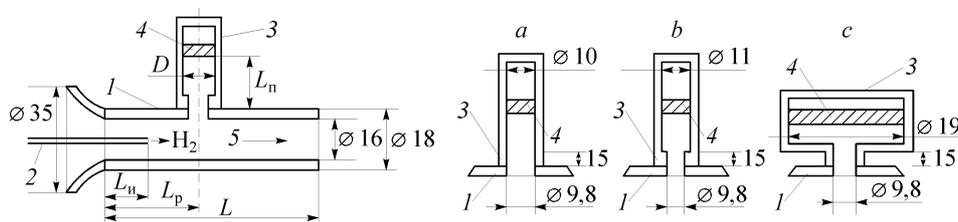


Рис. 1. Камера сгорания и резонаторы.

Положение элементов камеры сгорания:  $L_{\text{п}}$  — поршень резонатора,  $L_{\text{и}}$  — инжектор водорода,  $L_{\text{р}}$  — резонатор; 1 — камера сгорания, 2 — инжектор водорода, 3 — резонатор, 4 — поршень резонатора, 5 — направление истечения продуктов сгорания.

Ошибка измерений тяги составляла  $\pm 0,01$  Н. Акустические измерения проводились относительно эффективного давления  $2 \cdot 10^{-5}$  Па в диапазоне частот  $20 \div 18000$  Гц с относительной погрешностью не более 2%. Разница между мгновенным значением расхода водорода и осредненным значением, полученным при обработке осциллограмм, не превосходила  $\pm 0,02$  г/с. По серии измерений построен коридор ошибок при измерениях скорости потока воздуха. Относительная погрешность при этом в диапазоне  $5 \div 40$  м/с составляла  $19 \div 7$  %.

На рис. 2 результаты экспериментов для резонаторов с  $D = 11$  и  $19$  мм представлены в виде сводных трехмерных графических зависимостей силы тяги  $F = F(L_{\text{п}}/L, Q)$  и соответствующей амплитуды звуковых колебаний  $A = A(L_{\text{п}}/L, Q)$ . По осям аппликат отложены значения измеренных сил  $F$  (в ньютонах) и амплитуд колебаний  $A$  (в децибелах). Положительная величина  $F$  — сила тяги, отрицательная величина — сила сопротивления. По осям ординат отложены расходы водорода  $Q$ , г/с, по осям абсцисс — относительное положение поршня резонатора  $L_{\text{п}}/L$ . Нижнему положению поршня резонатора соответствует  $L_{\text{п}}/L = 0,1$  ( $L_{\text{п}}$  совпадает с длиной горла резонатора). Зависимости для резонаторов с  $D = 11$  и  $19$  мм на рис. 2, *a*, *b* представлены соответственно.

Приведенные зависимости показывают, что тяга  $F$  формируется при одинаковых значениях расхода водорода  $0,18 < Q < 0,27$  г/с. Видна корреляция между поведением амплитуды колебания  $A$  и силы тяги  $F$ . Наибольшим значениям  $A$  отвечают наибольшие значения силы тяги, а уменьшение величины  $A$  ведет к уменьшению тяги  $F$  и развитию силы сопротивления. При одинаковых  $L_{\text{п}}/L$  увеличение диаметра полости резонатора приводит к снижению уровня звука и развитию силы сопротивления. Например, при  $L_{\text{п}}/L = 0,31$  для  $D = 11$  мм и расходе

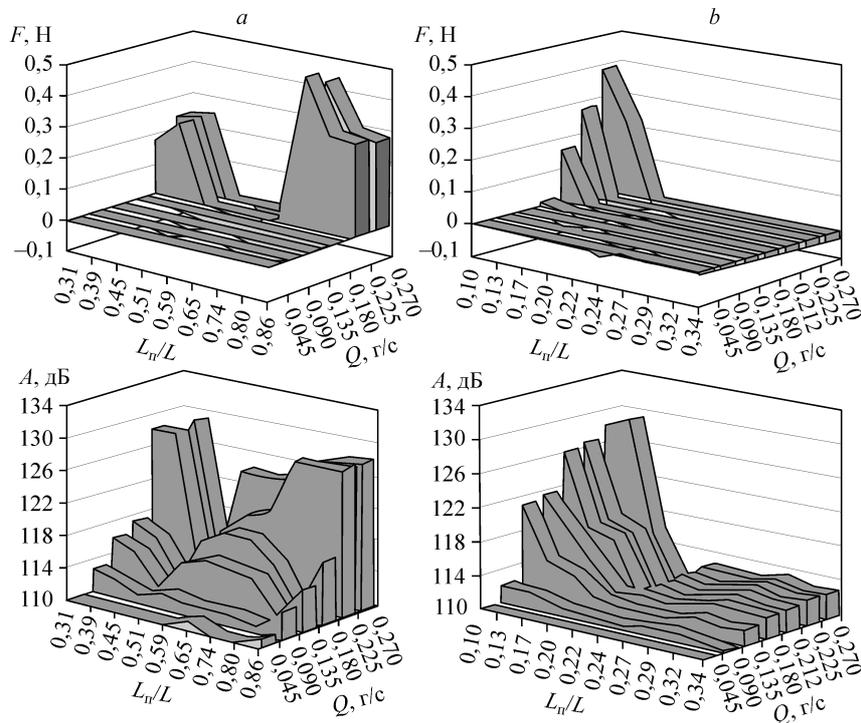


Рис. 2. Корреляция тяги  $F$  и амплитуды звуковых колебаний  $A$ .  
Диаметры полости резонатора 11 (*a*), 19 (*b*) мм.

$Q = 0,27$  г/с уровень звука  $A \sim 128$  дБ и соответствующая сила тяги камеры сгорания  $F \sim 0,25$  Н, а для  $D = 19$  мм и  $L_{\text{п}}/L = 0,31$  при любых расходах водорода  $Q$  уровень звука  $A$  меньше 114 дБ и развивается сила сопротивления, т. е. резонатор с диаметром 19 мм является звукопоглотителем Гельмгольца. Для резонатора с диаметром 11 мм увеличение  $L_{\text{п}}/L$  приводит к последовательной смене силы тяги на сопротивление и снова к развитию силы тяги. Максимальная сила тяги  $F \sim 0,48$  Н достигалась при  $L_{\text{п}}/L = 0,736$  и расходе водорода  $Q = 0,225$  г/с, при этом удельный импульс  $F/Q = 2130$  м/с. Для резонатора с  $D = 19$  мм удельный импульс принимает положительные значения только в области параметров  $Q > 0,15$  г/с и  $0,1 < L_{\text{п}}/L < 0,174$ . Наибольшее значение импульса  $I \sim 1220$  м/с достигается в точке  $L_{\text{п}}/L = 0,1$ ,  $Q = 0,27$  г/с. При увеличении  $L_{\text{п}}/L$  развивается сила сопротивления и удельный импульс становится отрицательным.

На рис. 3 для расхода водорода  $Q = 0,225$  г/с показаны зависимости силы тяги  $F$  и амплитуды звуковых колебаний  $A$  от объема  $V_p$ .  $V_p$ , мм<sup>3</sup> — суммарный объем полости резонатора и горла. Линиями  $a$  и  $b$  показаны зависимости для резонаторов с  $D = 11$  мм и 19 мм соответственно. Точка 1 — значение тяги, полученное в экспериментах с камерой сгорания без резонатора. Точка 2 ( $V_p = 1130,9$  мм<sup>3</sup>) соответствует нижнему положению поршня ( $L_{\text{п}}/L = 0,1$ ). Точка 3 — тяга камеры сгорания с резонатором  $D = 19$  мм ( $L_{\text{п}}/L = 0,26$ ). Наибольшее и наименьшее значения силы тяги для камеры сгорания с резонатором  $D = 10$  мм получены в точках 4 ( $L_{\text{п}}/L = 0,67$ ) и 5 ( $L_{\text{п}}/L = 0,4$ ) соответственно.

Для резонатора с  $D = 11$  мм (линия  $a$ ) наибольшее значение тяги  $F \sim 0,48$  Н достигалось при  $V_p \sim 9750$  мм<sup>3</sup> ( $L_{\text{п}} \sim 110$  мм). Для других значений  $V_p$ , полученных за счет изменения длины полости резонатора, наблюдалось уменьшение тяги камеры сгорания. Например, уменьшение  $L_{\text{п}}$  на 10 мм ( $V_p \sim 8800$  мм<sup>3</sup>) приводило к исчезновению тяги. Можно уменьшить объем полости резонатора  $V_p$  (с незначительной потерей тяги  $\sim 3\%$ ) при одновременном уменьшении диаметра и длины полости резонатора. Это показано точкой 4 ( $D = 10$  мм,  $L_{\text{п}} = 100$  мм,  $V_p \sim 7850$  мм<sup>3</sup>). Уменьшение длины полости резонатора (линия  $b$ ) при сохранении его объема (за счет увеличения  $D$  до 19 мм) приводит к подавлению акустических колебаний, развитию силы сопротивления и отрицательному удельному импульсу.

На рис. 4 представлены данные, полученные в эксперименте с камерой сгорания без резонатора. На рис. 4,  $a$  приведена запись амплитуды акустических колебаний  $A(t)$  и скорости потока воздуха  $U(t)$ , нанесены значения средней

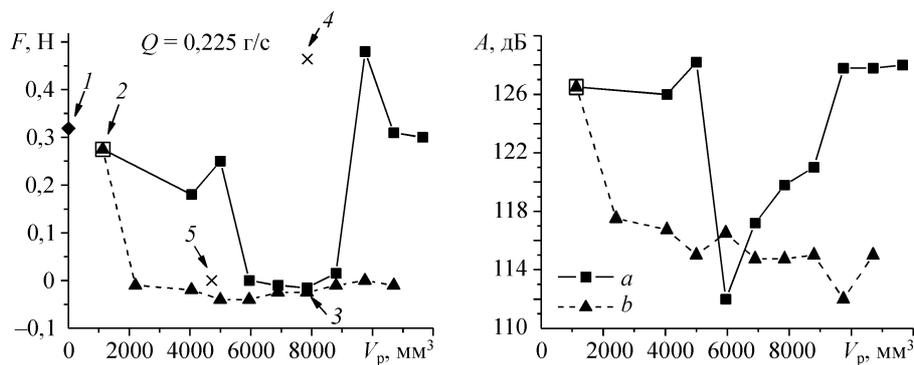


Рис. 3. Зависимости силы  $F$  и амплитуды  $A$  звуковых колебаний от общего объема резонатора. Диаметры полости резонатора 11 ( $a$ ), 19 ( $b$ ) мм.

Камера сгорания без резонатора (1),  $L_{\text{п}}/L = 0,1$  (2), диаметры полости резонатора: 19 мм,  $L_{\text{п}}/L = 0,26$  (3), 10 мм,  $L_{\text{п}}/L = 0,67$  (4), 10 мм,  $L_{\text{п}}/L = 0,4$  (5).

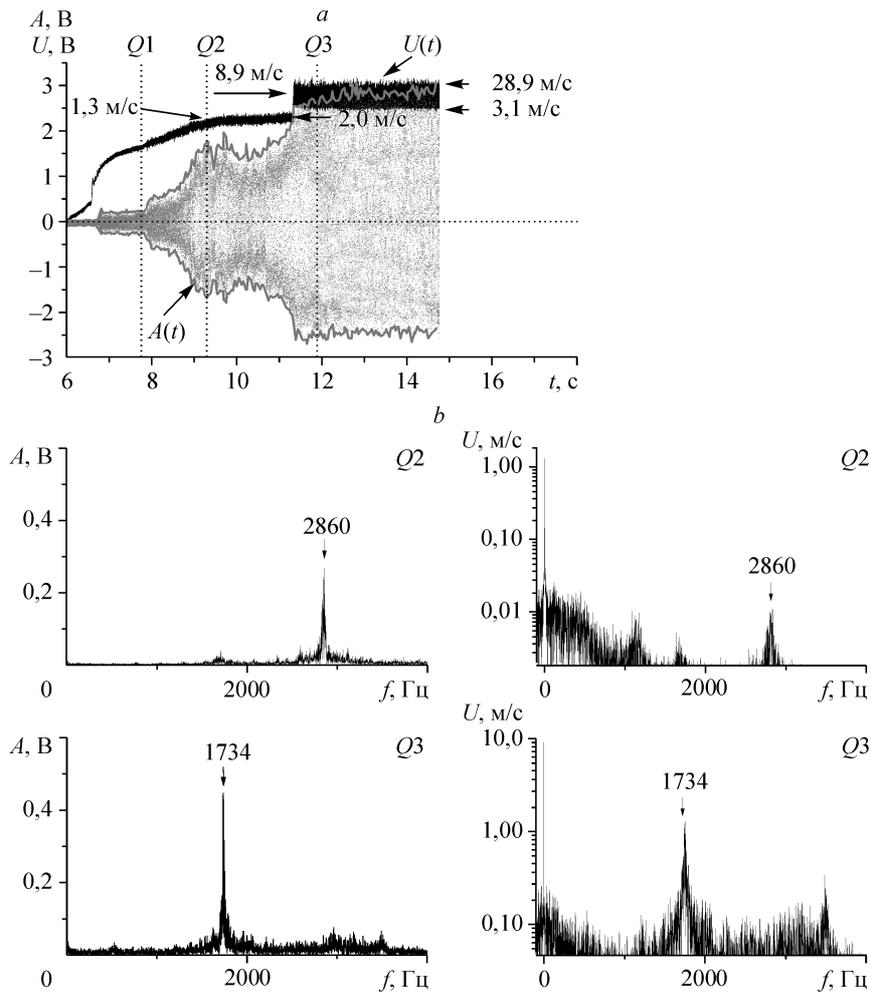


Рис. 4. Эксперимент с камерой сгорания без резонатора.

$a$  — запись амплитуды акустических колебаний  $A(t)$  и скорости потока воздуха  $U(t)$ ,  $b$  — спектры акустических колебаний и пульсаций скорости потока;  $t$  — время в секундах, прошедшее с начала эксперимента,  $f$  — частота колебаний;  $Q$  — расход водорода в разные моменты времени;  $Q1$  — 0,045,  $Q2$  — 0,135,  $Q3$  — 0,225 г/с.

скорости потока, максимальное и минимальное значения скорости в разные моменты времени. На рис. 4,  $b$  для расхода водорода  $Q2$ ,  $Q3$  показаны амплитудно-частотные спектры акустических колебаний, спектры пульсаций скорости потока и значения выделенных частот колебаний. Обозначено:  $t$  — время в секундах, прошедшее с начала эксперимента,  $f$  — частота колебаний,  $Q1$ ,  $Q2$ ,  $Q3$  — значения  $Q(t)$  для некоторых моментов времени.  $Q(t)$  хорошо описывается линейной функцией в интервале изменения расхода водорода от  $Q1$  до  $Q3$  (тяга камеры для  $Q = Q3$  показана точкой  $I$  на рис. 3). Видно, что при плавном изменении расхода  $Q$  наблюдается скачкообразное изменение параметров потока на входе в камеру сгорания. Скачком возрастает средняя скорость эжектированного потока воздуха, амплитуда акустических колебаний и амплитуда колебаний скорости потока. Одновременно с этим изменяется частотный спектр колебаний. Основная частота колебаний меняется с 2860 на 1734 Гц. На этом переходе развивается сила тяги камеры сгорания. Простейшая оценка частоты колебаний в трубе, открытой

с обоих концов, дает частоту  $\sim 1700$  Гц. В этой оценке учтено, что часть камеры сгорания заполнена продуктами горения. Оценка коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в камере сгорания для значения  $Q = Q_2$  дает  $\alpha \sim 0,073$ . Наблюдается вибрационное горение водорода при недостатке окислителя, что согласуется с результатами [1]. Оценка коэффициента  $\alpha$  для  $Q = Q_3$ , полученная для минимального, среднего и максимального значений скорости потока, дает следующие значения:  $\alpha_{\min} \sim 0,105$ ,  $\alpha_{\text{ср}} \sim 0,3$  и  $\alpha_{\max} \sim 0,98$ .

Для камеры сгорания с резонатором (см. точки 2 и 4 на рис. 3) спектры колебаний отличаются от спектров, представленных на рис. 4, *b*, только величиной амплитуды колебаний. Для резонатора с  $D = 10$  мм (точка 4 на рис. 3) растет величина средней скорости потока и увеличивается амплитуда пульсаций скорости потока (примерно в три раза) на частоте 1734 Гц. Минимальное, среднее и максимальное значения скорости потока равны 4,9, 19 и 59,6 м/с соответственно. Оценки коэффициента  $\alpha$  дают следующие значения:  $\alpha_{\min} \sim 0,166$ ,  $\alpha_{\text{ср}} \sim 0,642$  и  $\alpha_{\max} \sim 2,01$ , т. е. режим горения, при котором развивается тяга, характеризуется колебаниями величины  $\alpha$  в диапазоне от  $\alpha_{\min} < 1$  до  $\alpha_{\max} \geq 1$ . При изменении размеров полости резонатора (см. точки 3 и 5 на рис. 3) основная частота колебаний  $\sim 3000$  Гц и колебания имеют малую амплитуду. Средняя скорость потока меньше 2,5 м/с и  $\alpha_{\max} < 1$ . Скачкообразный переход к другому режиму горения не реализуется и тяга отсутствует.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния акустического резонатора на характеристики прямоточной эжекторной камеры сгорания с вибрационными режимами горения водорода. Показано, что наибольшие тяговые характеристики зависят от длины полости резонатора и достигаются при его использовании с диаметром полости, мало отличающимся от диаметра его горла. Применение резонатора, диаметр которого существенно отличается от диаметра горла, приводит к снижению уровня звука, силы тяги и удельного импульса камеры сгорания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. — С. 500.
2. Патнэм А.А. Вибрационное горение с точки зрения практики // Нестационарное распространение пламени / Под ред. Дж. Г. Маркштейна. Пер. с англ. — М.: Мир, 1968. — С. 437.
3. Ахмадеев В.Ф., Корляков В.Н., Козлов Л.Н. и др. Подавление акустических колебаний в камерах сгорания резонансными звукопоглотителями. — М.: НПО Информ ТЭИ, 1991. — С. 48.
4. Потапкин А.В., Долматов В.Л., Трубицын А.И. Экспериментальные исследования тяговых характеристик модельной прямоточной эжекторной камеры сгорания при вибрационном горении водорода // Физика горения взрыва. — 2004. — Т. 40, № 3. — С. 9–13.
5. Баев В.К., Москвичев Д.Ю., Потапкин А.В. Управление тяговыми характеристиками прямоточной камеры сгорания пульсирующего горения с помощью акустических резонаторов // Физика горения взрыва. — 2000. — Т. 36, № 5. — С. 3–6.
6. Potapkin A.V., Pavlov A.A., Moskvichev D.Yu. Peculiarities of ramjet combustion chamber work with resonator under condition of vibration fuel combustion // Proc. 10th Inter. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, 2002. — Pt. 1. — P. 161–167.

*Статья поступила в редакцию 20 июля 2006 г.,  
после переработки — 10 марта 2008 г.*