

УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРЯМОТОЧНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

В. К. Баев, Д. Ю. Москвичев, А. В. Потапкин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Экспериментально исследовано влияние резонатора на тяговые характеристики прямооточной камеры сгорания при вибрационном горении водорода. В качестве камеры сгорания использовалась цилиндрическая труба с конфузорным входом. Ось резонатора перпендикулярна оси камеры сгорания. Показано, что тяговые характеристики камеры сгорания зависят от положения резонатора относительно камеры и от линейных размеров резонатора.

В работе [1] описаны результаты исследования горения водорода в прямооточной эжекторной камере сгорания постоянного сечения. Обнаружено, что существует область параметров (расход водорода, положение инжектора), в которой наблюдаются интенсивные акустические колебания с частотой $1500 \div 2000$ Гц, хорошо соответствующей характерным временам горения водорода [2] при уровне звукового давления в пределах $120 \div 130$ дБ, измеренного относительно эффективного давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па на расстоянии 75 мм перед входом в камеру сгорания.

При описании вибрационного горения воспользуемся терминологией [3, 4], где различаются две стадии вибрационного горения: начальная, характеризующаяся невысоким уровнем звукового давления с частотой колебаний, соответствующей собственной частоте камеры сгорания, и стадия, переход к которой сопровождается резким возрастанием амплитуды пульсаций.

В экспериментах [1] было установлено, что в отличие от начальной стадии вибрационного горения, когда уровень звукового давления не превышает 120 дБ и измерения показывают наличие силы сопротивления (т. е. силы, приложенной к камере сгорания и направленной в сторону истечения продуктов сгорания), переход во вторую стадию горения сопровождается развитием интенсивных пульсаций (≈ 130 дБ) и тяги (силы, направленной навстречу струе продуктов сгорания) при наличии конфузора на входе в камеру сгорания. В результате предварительных экспериментов было установлено, что сила тяги приложена к конфузору и ее величина зависит от формы поверхности конфу-

зора. Основываясь на предположении о возникновении колебаний в результате критических (с точки зрения существования пламени) явлений, было высказано предположение, что увеличение тяги может быть достигнуто размещением на камере сгорания резонатора — полости, замкнутой по отношению к окружающей атмосфере и имеющей открытый выход в зону горения. Эксперименты проведены с резонатором в виде цилиндрической трубки с размещенным внутри поршнем, положение которого изменялось при проведении эксперимента. Ось резонатора перпендикулярна оси камеры сгорания. Резонатор размещался вблизи входа, в середине камеры или вблизи выхода из камеры сгорания [5].

Схемы установки и камеры сгорания с резонатором показаны на рис. 1. Цилиндрическая камера сгорания собиралась из трубчатых элементов, к одному из которых присоединялся резонатор. Перестановка элементов позволяла менять положение резонатора относительно камеры сгорания, при этом длина цилиндрической части камеры сгорания L менялась от 147 до 150 мм. Внутренний диаметр $D = 16$ мм, внутренняя поверхность конфузора имела форму тора с наибольшим диаметром 35 мм и длиной 17 мм.

Камера сгорания с резонатором закреплялась на пантографе так, что имела возможность только продольного перемещения. Продольная сила (тяга или сопротивление) F регистрировалась тензovesами, в прорезь штанги которых вводился язычок, закрепленный на камере сгорания. Свободный ход язычка в прорези составлял десятые доли миллиметра. Температура продуктов сгорания измеря-

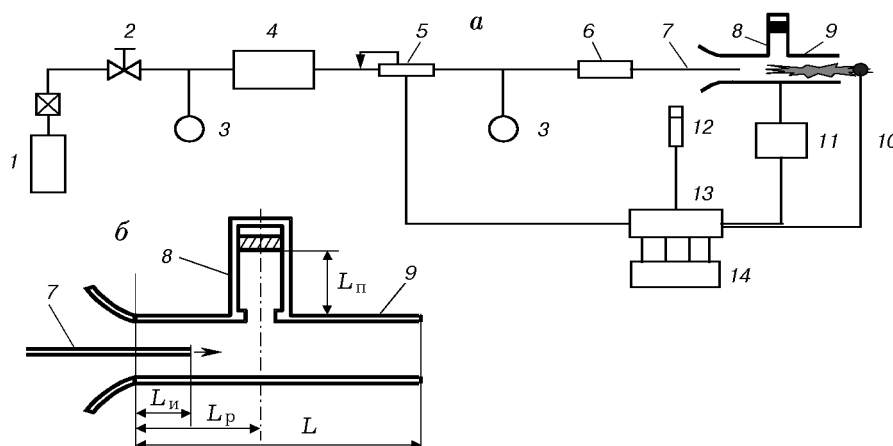


Рис. 1. Схема установки (а). Камера сгорания (б):

1 — баллон с водородом, 2 — редуктор, 3 — манометр, 4 — пульт, 5 — расходомер, 6 — координатник, 7 — инжектор водорода, 8 — резонатор, 9 — камера сгорания, 10 — термопара, 11 — тензосенсоры, 12 — микрофон, 13 — измерительные приборы, 14 — записывающая аппаратура

лась хромель-алюмелевой термопарой, помещенной в факеле, на расстоянии 20 мм за выходом из камеры сгорания. Акустические измерения выполнялись конденсаторным микрофоном М-101. Расход водорода определялся по перепаду давления на гидросопротивлении с помощью преобразователя разности давлений Сапфир-22ДД. Водород подавался в камеру сгорания через иглу инжектора, которая вводилась в камеру на глубину $L_{и}$. Все показания приборов записывались на шлейфовом осциллографе Н-117.

Типичная регистрограмма показана на рис. 2. Кроме записей изменения параметров в эксперименте, приведены осредненные значения, которые использовались при обработке экспериментальных данных. Вертикальная штрихпунктирная линия делит рисунок на две области: слева от линии — зона увеличения расхода водорода (зона I), справа — зона уменьшения расхода водорода (зона II). Все представленные ниже зависимости относятся к зоне I.

На рис. 3,а показана зависимость силы сопротивления F^- и тяги F^+ от объемного расхода водорода Q при температуре водорода $16 \div 20$ °С и нормальном атмосферном давлении. Соответственно на рис. 3,б приведены уровни измеренного звукового давления. Данные соответствуют положению инжектора $L_{и}/L = 0,338$ и положению поршня в резонаторе $L_{р}/L = 0,736$. На кривых уровня звукового давления переход из начальной стадии вибра-

ционного горения во вторую стадию виден как мгновенный рост амплитуды звуковых колебаний A при увеличении Q . Смещение резонатора вниз по потоку приводило к уменьшению расхода водорода, при котором этот переход наблюдался. На начальной стадии вибрационного горения перемещение резонатора от входа в каме-

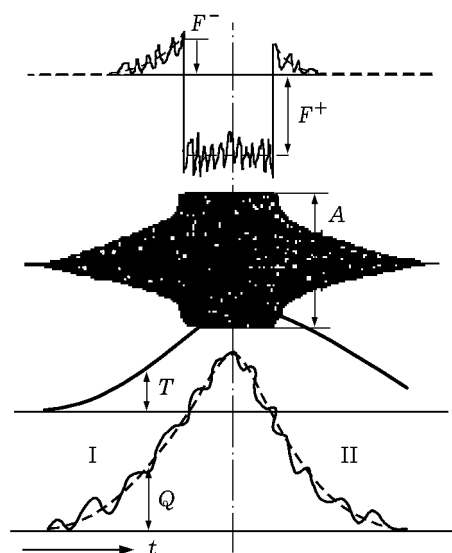


Рис. 2. Регистрограмма:

сплошные линии — эксперимент, штриховая линия — осреднение; затемненная область — запись амплитуды звуковых колебаний A , F^- — сила сопротивления, F^+ — сила тяги, T — температура факела, Q — расход водорода, t — время; I — зона увеличения расхода водорода, II — зона его уменьшения

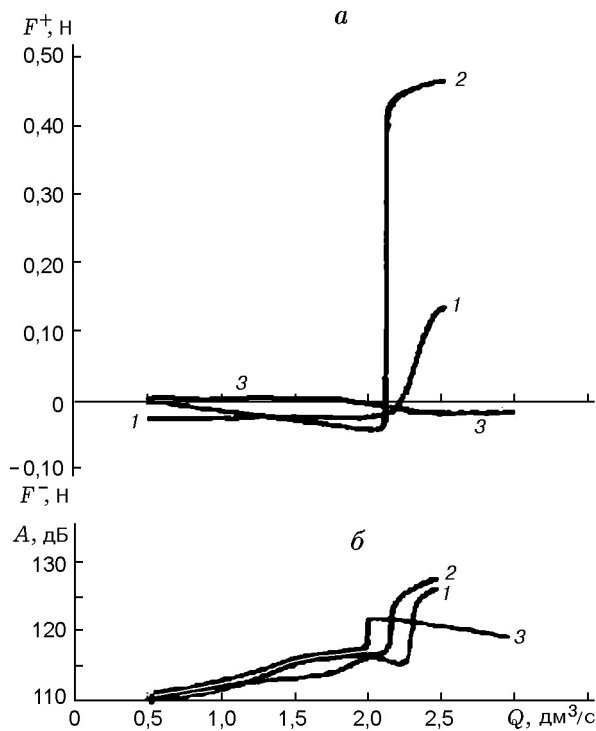


Рис. 3. Влияние положения резонатора и расхода водорода на тяговые (а) и акустические (б) характеристики камеры сгорания:

L_p/L : 1 — 0,274, 2 — 0,502, 3 — 0,724

ру к ее выходу приводило к увеличению звукового давления и снижению сопротивления при неизменном расходе водорода. При неизменном же положении резонатора увеличение расхода водорода приводило к возрастанию сопротивления при росте звукового давления. Противоположная картина наблюдалась за точкой перехода во второй режим горения. Максимальный уровень пульсаций достигался при среднем положении резонатора. В этом режиме наблюдалось трехкратное увеличение тяги по сравнению с тягой в случае размещения резонатора вблизи входа в камеру сгорания (кривые 2 и 1 соответственно). При размещении резонатора вблизи выхода из камеры сгорания возникло сопротивление (кривая 3), а сам резонатор выполнял роль глушителя, так как увеличение расхода водорода сопровождалось снижением звукового давления. Из представленных результатов видно, что с точки зрения получения максимальной тяги наиболее выгоден второй режим вибрационного горения вблизи точки перехода с резонатором, расположенным в средней части камеры сгорания. Причем увеличение расхода водорода, хотя и сопровожда-

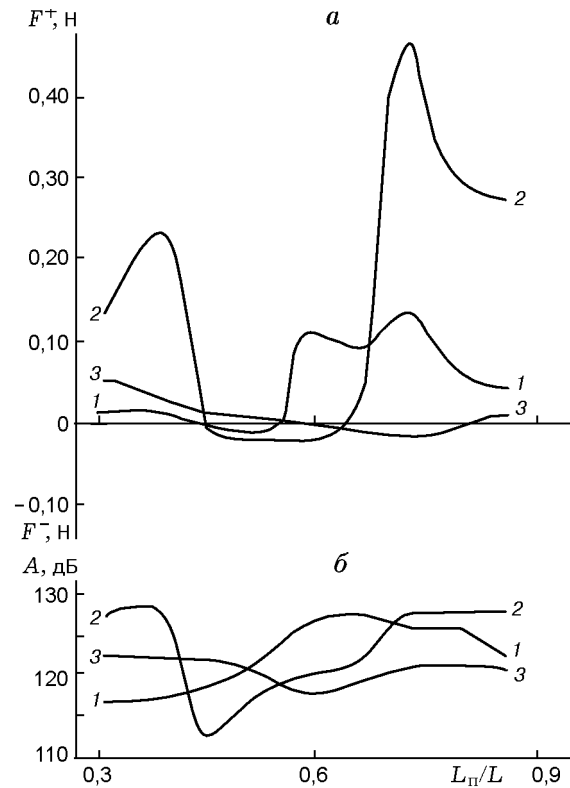


Рис. 4. Зависимость тяговых (а) и акустических (б) характеристик камеры сгорания от размеров и положения резонатора:

L_p/L : 1 — 0,274, 2 — 0,502, 3 — 0,724

ется ростом амплитуды пульсаций, приводит к медленному нарастанию тяги.

Влияние размеров резонатора и его положения на тяговые и акустические характеристики камеры сгорания приведены на рис. 4 при $L_p/L = 0,338$ и $Q = 2,5 \text{ dm}^3/\text{s}$.

В случае расположения резонатора вблизи входа в камеру сгорания (кривая 1) изменение размеров резонатора приводило к последовательной смене тяги на сопротивление. В диапазоне $L_p/L = 0,52 \div 0,74$ наблюдалось развитие тяги до $F^+ = 0,15 \text{ Н}$, что соответствует максимальным амплитудам пульсаций. При $L_p/L > 0,74$ снижение амплитуды пульсаций сопровождалось уменьшением тяги. Аналогичная картина наблюдалась при расположении резонатора в средней части камеры сгорания (кривая 2) при более резких переходах от сопротивления к тяге, и при этом сопротивление и тяга были примерно в три раза больше, чем в предыдущем случае. Максимум тяги достигался в диапазоне $L_p/L = 0,70 \div 0,74$, что также согласуется с максимумом амплитуды

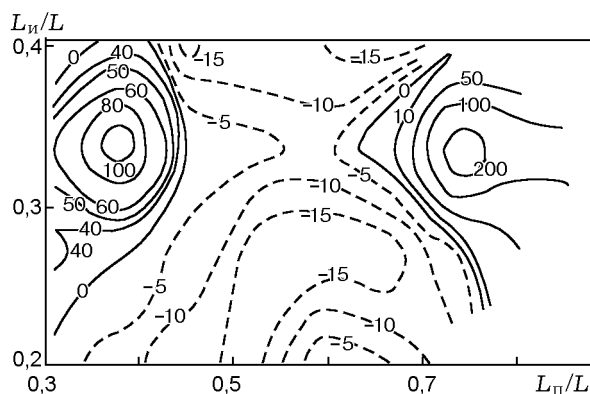


Рис. 5. Зависимость удельного импульса от положения инжектора и линейного размера резонатора: сплошные изолинии — удельные импульсы F^+/Q , с, штриховые — F^-/Q , с

пульсаций. Противоположная картина наблюдалась при положении резонатора вблизи выхода из камеры сгорания (кривая 3). В области $L_{п}/L < 0,54$ уменьшение амплитуды пульсаций сопровождалось уменьшением тяги, но в диапазоне $L_{п}/L > 0,64$ рост пульсаций приводил к увеличению сопротивления.

Дополнением к рис. 4 служит рис. 5. На нем представлены изолинии удельного импульса $I = F/Q$ при фиксированных значениях $L_{р}/L = 0,502$ и $Q = 2,5 \text{ дм}^3/\text{с}$, для которых получены наибольшие значения удельного импульса. Сплошные линии — удельные импульсы $F^+/Q = \text{const}$, штриховые линии — $F^-/Q = \text{const}$. Распределение удельного импульса вдоль линии $L_{н}/L = 0,338$ соответствует кривой 2 на рис. 4. Значение $I \approx 100$ с наблюдалось при $L_{п}/L = 0,388$, значение $I \approx 200$ с — для $L_{п}/L = 0,736$. В интервале $0,45 < L_{п}/L < 0,62$ для любых положений инжектора регистрировалось сопротивление F с удельным импульсом, достигающим значения $I \approx -18$ с. Значения $L_{п}/L$, при которых получены максимальные удельные импульсы, кратны друг другу, что указывает на акустический характер влияния резонатора на тяговые характеристики камеры сгорания.

Сравнение результатов измерений для камеры сгорания без резонатора и с резонатором показало увеличение максимального значения силы тяги от $\approx 0,25$ до $\approx 0,50$ Н при увеличении удельного импульса от ≈ 150 до ≈ 200 с в зоне I (см. рис. 2). При переходе в зону II наблюдался гистерезис в поведении амплитуды звуковых колебаний [6, 7]. При снижении расхода водорода сохранялись режимы с интенсив-

ными пульсациями. Благодаря этому эффекту удельный импульс достигал величины ≈ 200 с в эксперименте без резонатора и ≈ 300 с — с резонатором.

Режимы вибрационного горения с интенсивными пульсациями, при которых развивалась максимальная тяга, сопровождалась снижением температуры продуктов сгорания примерно на 15 %.

Представленные результаты показывают, что тягой прямоочной камеры сгорания можно управлять, меняя положение резонатора, его линейные размеры и расход топлива. Полученные данные свидетельствуют о возможности трансформации части тепловой энергии, выделяющейся при горении, в механическую работу и о транспортировке ее волновым путем.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Баев В. К., Потапкин А. В., Шумский В. В. Проявление нестационарности при исследовании процессов горения. Новосибирск, 1997. (Препр./ РАН. Сиб. отд-ние. ИТПМ; № 6-97).
3. Аввакумов А. М., Чучкалов И. А., Щелков Я. М. Нестационарное горение в энергетических установках. Л.: Недра, 1987.
4. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. М.: Физматгиз, 1961.
5. Baev V. K., Moskvichev D. Yu., Potapkin A. V. The influence of acoustic resonator on the air-breathing combustor operation under pulsation burning of hydrogen // Intern. Conf. on the Method of Aerophysical Research. Novosibirsk: Publ. House of the Siberian Branch of the Russian Acad. of Sciences, 1998. Pt III. P. 55–59.
6. Нестационарное распространение пламени / Под ред. Дж. Г. Маркштейна; Пер. с англ. М.: Мир, 1968.
7. Bardakhanov S. P., Potapkin A. V. Hysteresis regimes in fuel burning processing // Proc. of the Third Russian-Korean Intern. Symp. on Science and Technology, Korus-99. Novosibirsk: Novosibirsk State Techn. Univ., 1999. V. 1. P. 46–49.

Поступила в редакцию 29/IX 1999 г.,
в окончательном варианте — 4/III 2000 г.