

7. Фиалков А.Б., Фиалков Б.С. Ионный состав пламен пропан — бутан — воздух при пониженном давлении // ФГВ. — 1985. — 21, № 3. — С. 32—42.
8. Славинская Н.А., Каменецкая С.А., Пшежецкий С.Я. и др. Влияние ионизирующего излучения на кинетику окисления и воспламенения бутана // ЖФХ. — 1960. — 34, № 6. — С. 1169—1175.

107005, г. Москва,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию  
26/1 1992,  
после доработки — 5/IV 1994

УДК 536.46

*А.И. Китаев, С.А. Аbruков, Н.И. Кидин*

### ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫМ ГОРЕНИЕМ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С ПОМОЩЬЮ МОДУЛИРОВАННОГО ПЛАЗМАТРОНА

Приводятся результаты экспериментальной проверки метода диагностики неустойчивого горения по отклику камеры сгорания на гармонические возмущения, генерируемые модулированным (периодическим) электрическим разрядом в канале плазматрона. Исследовался отклик камеры сгорания, близкой к натурной: без горения при продувке окислителя, при сосредоточенном горении пропановоздушных и распределенном горении бензиновоздушных смесей. Показана возможность определения основных акустических характеристик камеры сгорания (резонансные частоты, декремент затухания) в рабочем режиме по отклику на гармонические возмущения, генерируемые модулированным плазматроном, а также возможность демпфирования резонансных колебаний при неустойчивом горении воздействием высокотемпературной струи плазматрона на зону горения.

Одна из проблем на пути создания высокоэффективных камер сгорания — неустойчивость горения, проявляющаяся в виде интенсивных колебаний давления, скорости, температуры и других параметров продуктов сгорания. Неустойчивость горения наблюдается в авиационных и ракетных двигателях, в промышленных печах и топках тепловых электростанций вне зависимости от типа используемого топлива (жидкое, газообразное, твердое). Наиболее разрушительна высокочастотная (акустическая) неустойчивость, известная также как резонансное горение. Частоты колебаний в этом случае близки к соответствующим частотам акустических резонансных колебаний в камере сгорания.

Для диагностики неустойчивости обычно используют метод искусственного возбуждения акустических колебаний в камерах сгорания и исследование реакции (отклика) процесса горения на возмущения [1]. Колебания возбуждаются кратковременным импульсным возмущением, генерируемым обычно с помощью взрывчатых веществ. Другой подход основан на создании в камере сгорания гармонических колебаний давления большой амплитуды в широком диапазоне частот. Последний метод не нашел широкого применения из-за отсутствия излучателей, способных генерировать гармонические возмущения давления в высокотемпературной и химической агрессивной среде при высоких скоростях потока.

Необходимость в таких излучателях несомненна при разработке новых, более экономичных и эффективных энергетических установок. Незначительные изменения в конструкции форсунок или камеры сгорания могут оказать сильное воздействие на устойчивость работы двигателя. Поэтому, как отмечается в обзоре последних работ по неустойчивому горению [2], основные усилия разработчиков ракетных и авиационных двигателей были направлены на то, чтобы изучить отклик форсунок различного типа на осциллирующие возмущения давления и скорости. Использование излучателей типа сирены, пиропатронов, специальных электропневматических или электродинамических излучателей в энергетических установках ограничено

из-за искажений газодинамики потока, узкого диапазона возмущений или невозможностью размещения таких устройств в камере сгорания.

Для диагностики и управления неустойчивым горением в [3] предложен метод генерирования акустических колебаний в камере сгорания при помощи ионизованного газового потока (модулированного электрического разряда). В [4—9] рассматривались различные модели излучения звука пламенем без каких-либо резонансных устройств в режиме электрического разряда с введенными в зону горения электродами. Экспериментальные исследования [10—12], проведенные на простейших лабораторных моделях излучателей и горелочных систем, не позволяют судить о возможности применения этого метода для диагностики и управления неустойчивым горением в натуральных энергетических установках.

В данной работе исследуются возможности метода диагностики и управления неустойчивым горением в энергетических установках, близких к натурным, с помощью акустического излучателя, работающего на основе модулированного электрического разряда в канале плазматрона. Модулированный разряд создавался с помощью амплитудной модуляции в звуковом диапазоне выходного высоковольтного напряжения ВЧ-генератора (несущая частота  $f = 440$  кГц, мощность  $W = 25$  кВт) или с помощью НЧ-усилителя с  $W = 15$  кВт при иницировании разряда дежурной ВЧ-дугой. В экспериментах применялся коаксиальный плазматрон с вихревой стабилизацией дуги. Электрическая мощность плазматрона — до 10 кВт. Высокотемпературные сгустки газоразрядной плазмы, возникающие при модулированном разряде звуковой частоты, периодически выносились рабочим газом в диагностируемую камеру сгорания и, расширяясь, генерировали акустические возмущения с частотой модуляции.

Модельная энергетическая установка включала цилиндрическую камеру сгорания (длина  $L \leq 0,5$  м, диаметр 0,125 м) с плоской форсуночной головкой и профилированное сопло. Система подачи топлива и окислителя выполнена по схеме двухкомпонентного ЖРД с вытеснительной системой подачи жидкого топлива (бензин) и газообразного окислителя (воздух). В экспериментах с сосредоточенной у форсуночной головки зоной горения в качестве топлива использовался газообразный пропан.

Отклик камеры сгорания на вводимые возмущения регистрировался датчиками акустического давления типа ЛХ-610, установленными заподлицо с внутренней поверхностью камеры, акустическими стендами фирмы «Роботрон» и измерительным магнитографом ЕАМ-500 фирмы «Тесла». С помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени изучались колебания давления в камере при создании гармонических возмущений с непрерывным изменением (сканировании) частоты модуляции в звуковом диапазоне от 0,1 до 10 кГц по логарифмическому закону. Время сканирования 15—30 с. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) отклика регистрировалась самописцем уровня при выделении с помощью узкополосного следящего фильтра из общего сигнала датчика давления сигнала  $p$  с частотой вводимых акустических возмущений. Установка позволяла получать спектры колебаний давления и характеристики отклика на возмущения, создаваемые плазматроном, как непосредственно в ходе эксперимента, так и при обработке магнитных записей сигналов.

Типичная картина изменения спектра колебаний давления в камере с потоком окислителя без горения при изменении частоты модуляции плазматрона в звуковом диапазоне

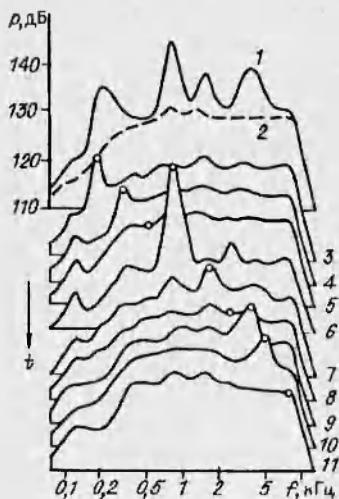
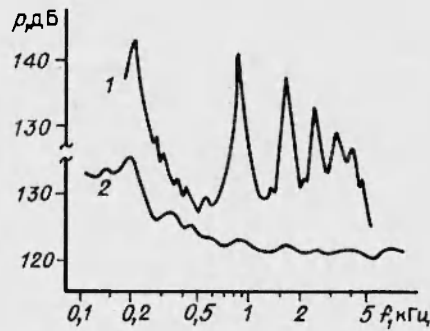


Рис. 1.

Рис. 2.

показана на рис. 1 (спектры 3—11). Линия 2 — спектр колебаний в камере с потоком воздуха без внешних возмущений, 1 — характеристика отклика камеры на гармонические возмущения, полученная с помощью анализатора спектра в режиме регистрации максимальных значений уровней колебаний давления по каналам при сканировании частоты от 0,1 до 10 кГц. Частота возмущений, генерируемая модулированным плазматроном в соответствующий момент времени, отмечена на спектрах 3—11 точкой. Как видно из рис. 1, при совпадении частоты возмущений, генерируемых плазматроном, с собственной частотой акустического резонатора (камеры сгорания) уровень колебаний давления увеличивается на 10—15 дБ. В остальные моменты времени усиление не наблюдается, и уровень создаваемых плазматроном возмущений не превышает турбулентного шума в камере с потоком воздуха.



На рис. 2, 1 показана АЧХ отклика камеры при горении пропановоздушной смеси на гармонические возмущения, создаваемые модулированным плазматроном при непрерывном изменении частоты в звуковом диапазоне. На рис. 2, 2 приведен спектр колебаний давления в камере при горении смеси без внешних возмущений. Общая картина отклика камеры с горением газовой смеси на гармонические возмущения аналогична случаю камеры с потоком воздуха: при совпадении частоты возмущений, генерируемых плазматроном, и собственной частоты камеры наблюдается резонансное усиление колебаний. При этом спектр колебаний давления в камере при горении под действием возмущений с частотой первой продольной моды (0,2 кГц) близок спектру колебаний давления при вибрационном горении при соответствующем составе смеси. Максимумы АЧХ отклика соответствуют собственным (резонансным) частотам камеры сгорания.

По АЧХ отклика камеры сгорания в рабочем режиме на гармонические возмущения, генерируемые модулированным плазматроном, кроме резонансных частот можно определить добротность камеры на этих частотах, а соответственно, и декремент затухания колебаний.

Добротность колебательной системы определится из соотношения  $Q = F / (f_2 - f_1)$ , где  $F$  — резонансная частота;  $f_1$  и  $f_2$  — частоты колебаний с амплитудой  $p/\sqrt{2}$ ;  $p$  — максимальное значение колебаний давления на резонансной частоте. Логарифмический декремент затухания колебаний  $d$  на резонансной частоте определится из соотношения  $d = \pi / Q$ .

Исследования показали, что значения частот максимумов АЧХ зависят от геометрических параметров камеры и характеристик потока продуктов сгорания. Частоты максимумов АЧХ отклика при сосредоточенном горении пропановоздушной смеси у форсуночной головки близки к соответствующим собственным частотам акустического резонатора, открытого с одного конца, а при распределенном горении жидкого топлива (бензин) — акустически закрытой камере. По АЧХ отклика можно определить резонансную частоту, на которой декремент затухания имеет наименьшее значение.

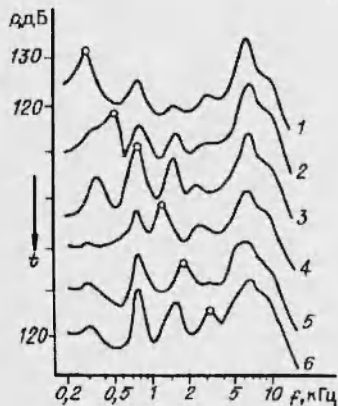


Рис. 3.

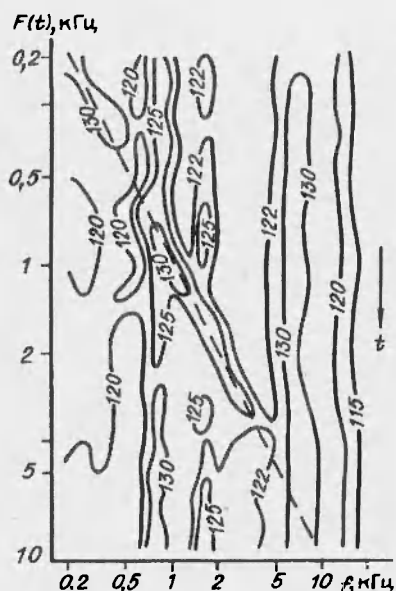


Рис. 4.

На этой частоте при соответствующем составе смеси может возникнуть неустойчивое горение.

На рис. 3 приведена типичная картина изменения спектра колебаний давления в камере при горении бензиновоздушной смеси при сканировании частоты внешних гармонических возмущений, генерируемых модулированным плазматроном в звуковом диапазоне, а на рис. 4 — частотно-временная топограмма данного процесса. По горизонтальной оси топограммы отложены значения частоты анализируемого спектра, а по вертикальной — значение частоты модуляции плазматрона, соответствующее данному моменту времени. Топограмма представляет собой карту изолиний уровня звукового давления в камере при изменении частоты внешних возмущений, генерируемых мо-

дулированным плазматроном. Частота модуляции плазматрона в момент сканирования отмечена штриховой линией.

На рис. 5 показаны собственный спектр колебаний давления в камере при горении бензиновоздушной смеси без внешних возмущений (3) и характеристика отклика камеры при горении той же смеси на гармонические возмущения, генерируемые моделированным плазматроном (1). Здесь же приведен спектр колебаний давления при резонансном (вибрационном) горении бензиновоздушной смеси (2) при соответствующих условиях для данной камеры ( $L = 0,5$  м). На топограмме хорошо видно движение пика возмущения, генерируемого плазматроном при изменении частоты модуляции в звуковом диапазоне. Однако возникновение интенсивных (резонансных) колебаний давления, характерных для вибрационного горения, не наблюдается даже при совпадении частоты внешних возмущений с собственной частотой акустических колебаний в камере. На резонансной частоте камеры 0,8 кГц (первая продольная мода) вынужденные колебания, возникающие в результате воздействия гармонических возмущений, генерируемых модулированным плазматроном, превышают уровень собственных колебаний давления на 5 дБ, в то время как уровень резонансных колебаний при вибрационном горении выше более чем на 20 дБ и составляет 154 дБ.

Анализ спектров отклика камер различной длины при горении бензиновоздушной смеси различного состава на гармонические возмущения звукового диапазона, создаваемые модулированным плазматроном в различных местах камеры также показал, что резонансного усиления колебаний давления не наблюдается даже при совпадении частоты внешних возмущений с собственной частотой акустических колебаний в камере сгорания. Усиление уровня колебаний давления на резонансных частотах составляло не более 5—7 дБ, а в некоторых экспериментах усиления не было совсем.

Различие в отклике камеры при горении газо- и бензиновоздушной смесей на гармонические возмущения можно объяснить следующим образом. При го-

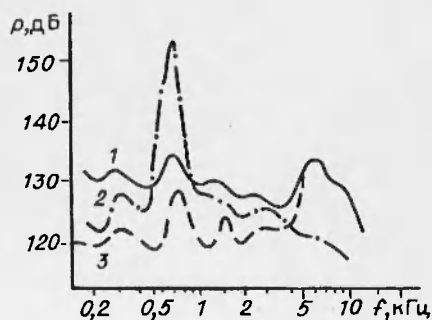


Рис. 5.

рении газоздушных смесей возрастание колебаний давления на резонансной частоте воздействует непосредственно на механизм возникновения и поддержания колебаний в камере, так как вызывает соответствующие колебания состава газовой смеси и тепловыделения на данной частоте с незначительной фазовой задержкой. Благодаря этому образуется положительная обратная связь и в соответствии с критерием Рэля усиливаются резонансные колебания. При горении бензиновоздушной смеси из-за наличия характерного времени запаздывания процессов горения смеси положительная обратная связь не образуется, и резонансного усиления колебаний давления не наблюдается.

При определенном составе смеси в камере сгорания возникали интенсивные резонансные колебания на частоте первой продольной моды (0,2 кГц для пропановоздушной смеси и 0,8 кГц для бензиновоздушной). При воздействии на зону горения пропановоздушной смеси стационарной или модулированной струи плазматрона с частотой, отличной от резонансной, уровень колебаний давления на резонансной частоте уменьшается на 10—15 дБ. Воздействие струи плазматрона на вибрационное горение бензиновоздушной смеси (даже с частотой, соответствующей резонансным колебаниям) приводило к уменьшению уровня колебаний на резонансной частоте на 8—10 дБ.

Таким образом, эксперименты, проведенные на модельной энергетической установке, близкой к натурной, показали возможность определения основных акустических характеристик камеры сгорания (резонансные частоты, добротность, декремент затухания) в рабочем режиме по отклику на гармонические возмущения, генерируемые модулированным плазматроном, а также возможность демпфирования резонансных колебаний при неустойчивом (вибрационном) горении в энергетической установке воздействием высокотемпературной струи плазматрона на зону горения.

В последнее время для определения устойчивости процесса горения и для установления влияния различных режимных и конструктивных параметров разработаны методы определения декремента и частот собственных колебаний на основе корреляционных [13] и авторегрессионных [14] методов анализа с помощью ЭВМ по случайным колебаниям давления (естественным шумам), сопровождающим работу камеры в нормальных условиях. В сочетании с указанными методами статистического анализа колебаний давления метод создания гармонических возмущений с помощью модулированного плазматрона может быть положен в основу создания ряда прикладных методов анализа устойчивости процесса горения в энергетических установках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Неустойчивость горения в ЖРД / Под ред. Д.Т. Харрье и Ф.Г. Рирдона. — М.: Мир. — 1975. — 872 с.
2. Гупта А., Кинг М.К., Дейли Дж, Сейбла П. Горение перед лицом экологических проблем // Аэрокосмическая техника. — 1991. — № 1. — С. 100—103.
3. Патент № 3565209 США, МКИ F 01 № 1/06. Использование ионизованных газов для генерирования акустических колебаний / Babcock W., Cattaneo A. Оpubл. 23.02.71. // Авиационные и ракетные двигатели. Реф. журн. ВИНТИ. — 1971. — № 10.
4. Babcock W., Baker K., Cattaneo A. Musical Flames // Journal of the Acoustical Society of America. — 1969. — 43, № 6. — P. 1465—1466.
5. Burchard J. Preliminary Investigation of the Electrothermal Loudspeaker // Combustion and Flame. — 1967. — V. 13. — P. 82—86.
6. Medvedev N.A., Vuillermoz M.L., Roberts J.P. An experimental study of sound generation by modulated electrical discharge within a flame // Combustion and Flame. — 1982. — V. 44. — P. 337—346.
7. Abrukov S.A., Kidin N.I., Librovich V.B. et al. On the use of a sound probe technique for investigating the acoustic characteristics of a model combustion chamber // Archivum combustions. — 1983. — 3, N 1. — P. 47—64.
8. Kidin N.I., Librovich V.B., Vuillermoz M.L., Roberts J.P. Theoretical model for sound output from a pulsating arc discharge // Prog. Astron. and Aeron. — 1983. — V. 88. — P. 305—315.
9. Кидин Н.И. Генерация звука модулированным электрическим разрядом, локализованным в зоне горения // ФГВ. — 1985. — 21, № 3. — С. 26—30.

10. Медведев Н.А., Виллермоус М.Л., Робертс Дж.П. Излучение звука моделированным электрическим разрядом в пламени // Физика горения и методы ее исследования. — Чебоксары: ЧувГУ, 1981. — С. 101—110.
11. Медведев Н.А., Кидин Н.И., Виллермоус М.Л., Робертс Дж.П. Радиочастотный модулированный разряд в пламени как средство контроля неустойчивости горелочных систем // Структура газозаженных пламен. Часть III. — Новосибирск, 1988. — С. 236—241.
12. Kidin N., Librovich V., Medvedev N. et al. An anti-sound technique for controlling combustion system instabilizing // Там же. — С. 229—235.
13. Белый В.В., Рябцев А.П., Соловьев В.В. и др. Некоторые статистические алгоритмы диагностики узкополосных колебаний в проточных камерах сгорания. I. Теория // ФГВ. — 1985. — 21, № 1. — С. 64—71; II. Примеры реализации // ФГВ. — 1985. — 21, № 2. — С. 32—39.
14. Кармалита В.А., Фурлетов В.И. Авторегрессионный метод определения декремента и частоты собственных колебаний газа в камерах сгорания // ФГВ. — 1987. — 23, № 6. — С. 33—40.

428015, г. Чебоксары,  
ЧувГУ им. И.Н. Ульянова

Поступила в редакцию  
19/IV 1994

УДК 536.46:662.612

*В.В. Калинин, С.Г. Орловская, А.В. Евдокимов,  
А.В. Мандель*

### ГОРЕНИЕ И САМОПРОИЗВОЛЬНОЕ ПОТУХАНИЕ УГЛЕРОДНОЙ ЧАСТИЦЫ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Выявлен механизм самопроизвольного и вынужденного потухания углеродной частицы в поле лазерного излучения. Показано, что потухание частицы определяется достижением коэффициентами тепло- и массообмена критических значений. Найдены аналитические выражения для диаметров, при которых происходит самопроизвольный переход на квазистационарный режим лазерного горения углеродной частицы. Установлено, что переход на квазистационарный высокотемпературный режим возможен только в определенном интервале размеров углеродных частиц. Показана возможность и раскрыт механизм управления процессом за счет изменения начальной температуры частицы.

Управление высоко- и низкотемпературными процессами тепло- и массообмена при протекании на поверхности углеродной частицы химических превращений путем помещения ее в поле лазерного излучения — актуальная задача для многих областей современной технологии [1, 2]. Экспериментальные исследования [3] показывают, что режим квазистационарного горения углеродной частицы в поле лазерного излучения завершается резким спадом ее температуры, чему соответствует излом на кривых зависимости диаметра частицы от времени. В [4] доказано, что квазистационарный режим гетерогенного горения самопроизвольно переходит в низкотемпературное состояние при достижении диаметром частицы критического значения.

В настоящей работе рассматриваются механизмы самопроизвольного и вынужденного потухания, а также высокотемпературный режим тепло- и массообмена углеродной частицы, находящейся в поле лазерного излучения.

В [5, 6] показано, что учет двух параллельных реакций  $C + O_2 = CO_2$ ,  $2C + O_2 = 2CO$  приводит к качественно новым результатам для характеристик гетерогенного горения частицы.

Проанализируем нестационарный тепло- и массообмен частицы. С учетом протекания двух параллельных реакций при  $Bi_0 \ll 1$  уравнение теплового баланса частицы имеет вид

$$\frac{1}{6c_1\rho_1d} \frac{dT_1}{dt} = q_x - q_{мк} + q_{лп} - q_n, T_1(t=0) = T_n, \quad (1)$$

© В.В. Калинин, С.Г. Орловская, А.В. Евдокимов, А.В. Мандель, 1995.