

АКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ГОРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ

В. В. Афанасьев

Чувашский государственный университет, 428015 Чебоксары

Предложен новый способ управления неустойчивым режимом горения в камерах сгорания за счет организации в зоне горения диффузного электрического разряда от специального источника питания с импедансом, изменяющимся в зависимости от задачи управления. Определены максимальные значения токов шнурования в зоне горения пропановоздушных смесей в зависимости от их состава. Экспериментально показано, что в случае наложения на зону горения стабилизированного по току разряда происходит автоматическое подавление неустойчивого режима горения на всех гармониках одновременно за счет внутренней отрицательной обратной связи. В случае воздействия стабилизированного по напряжению разряда наблюдается обратный эффект — возбуждение и усиление неустойчивого режима горения.

ВВЕДЕНИЕ

Неустойчивый режим горения в различного рода устройствах, предназначенных для сжигания жидких, газообразных и твердых топлив, проявляется в самопроизвольном возникновении вибрационных режимов горения, которые сопровождаются значительными колебаниями скорости тепловыделения, давления и механическими колебаниями камеры сгорания. Как правило, неустойчивость процессов в камерах нежелательна из-за нарушения ее нормального функционирования, а в ряде случаев и из-за разрушения. Однако слабые колебания могут быть полезными, поскольку увеличивают эффективность горения в результате перемешивания горючего и окислителя. Поэтому задача эффективного управления неустойчивым режимом горения является актуальной.

Для контроля за процессами горения в камерах сгорания применяют пассивные и активные методы управления режимом горения. К пассивным методам относятся: установка в камере сгорания противопульсационных перегородок, аблирующих покрытий, резонансных поглотителей [1, 2], проволоки или пластинки в сдвиговом пограничном слое для разрушения вихревых структур [3], применение горелок и камер сгорания различной формы и размеров [4, 5] и т. д. Несмотря на простоту и дешевизну этих способов основным недостатком их является сравнительно невысокая надежность подавления неустойчивого режима горения.

В последнее время появилось много работ, в которых возникновение неустойчивого

режима горения связывают с развитием когерентных вихревых структур в виде различного рода дорожек, жгутов, колец, торов и двойных спиралей в пограничном сдвиговом слое [6–11] при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях истечения продуктов сгорания. Показано, что вихревые структуры определяют процессы перемешивания, переноса, распределения продуктов химической реакции и переменного тепловыделения. В [8, 11] выявлено, что взаимодействие вихревых структур друг с другом или с препятствием приводит к разрушению вихрей на микротурбулентные структуры, к энергичному смешению и быстрой, интенсивной реакции. При соответствующем сдвиге фаз относительно давления эти максимумы тепловыделения способны поддерживать колебания большой амплитуды на одной из резонансных частот камеры сгорания. Акустические колебания, в свою очередь, через обратную связь воздействуют на динамику вихреобразования. При нелинейном взаимодействии акустических волн и крупномасштабных вихревых структур наряду с процессом выделения энергии в химических реакциях [11] может развиваться неустойчивый режим горения, приводящий к разрушению нормального режима горения.

Эти работы показывают, что контроль неустойчивого режима горения можно осуществлять через управление динамикой вихреобразования. Для этих целей перспективно использование физических методов воздействия — акустических и электрических полей [12–18]. Так, в работах [16–18] предложено

управлять осциллирующим горением с помощью переменного электрического поля с отрицательной обратной связью. Для этого сигналы колебаний давления или интенсивности излучения, усиленные с помощью высоковольтного усилителя, подавались в зону горения в противофазе к этим сигналам через фазовращающую цепочку. Эффективность данного способа ограничивается максимальными значениями сил, возникающих в результате гидродинамического воздействия электрического поля на пламя. Согласно [19] максимальное значение силы на единицу объема может достигать $10^3 \div 10^4$ Н/м³ и не зависит от свойств пламени.

В работе [20] для управления неустойчивым режимом горения применяется модулированная струя плазмотрона, которая подается в камеру сгорания в противофазе к существующим колебаниям давления через фазовращающую цепочку. Получено уменьшение амплитуды колебаний давления на резонансной частоте до 10 дБ при горении бензиновоздушных и пропановоздушных смесей.

Недостатком рассмотренных способов являются ограниченная эффективность и малая устойчивость управления, так как обратная связь осуществляется через ряд промежуточных внешних звеньев — датчик, усилитель и управляющий элемент. Каждое из этих звеньев обладает своим значением постоянной времени, т. е. инерционностью, что снижает качество управления. Известно, что в системах с транспортным запаздыванием всегда будут в наличии частоты, на которых обратная связь положительна. Поэтому в случае внешней обратной связи наряду с подавлением колебаний давления на одной гармонике может происходить усиление на другой гармонике, т. е. перекачка энергии из одной моды в другую, и система в целом будет неустойчивой. В настоящей работе предложен новый активный способ управления неустойчивым режимом горения за счет организации в зоне горения электрического разряда от источника питания с изменяющимся импедансом в зависимости от задачи управления.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ

Идея данного способа заключается в следующем. Известно, что пламена углеводородных топлив — это своеобразная низкотемпературная плазма, в которой концентрация заряженных частиц в результате цепных химических реакций на несколько порядков превы-

шает равновесную термическую ионизацию и достигает значения 10^{12} см⁻³. При неустойчивом горении источником энергии для усиления колебаний давления δp является переменное тепловыделение δQ . В объектах типа покоее пламя, где можно пренебречь изменением нормальной скорости горения вследствие незначительных колебаний давления, переменное тепловыделение δQ однозначно определяется периодическим изменением площади поверхности пламени δS [21], которое может достигать до 20 % от общей площади поверхности пламени. Переменное изменение площади поверхности пламени, в свою очередь, приводит к синфазной модуляции скорости тепловыделения Q , проводимости σ зоны горения и в противофазе — электрического сопротивления $\delta R = 1/\delta\sigma$. Если же на зону горения наложить стабилизированный по току ($I = \text{const}$) разряд, то переменная составляющая джоулева тепловыделения $\delta W = I^2 \delta R$ будет происходить в противофазе с колебаниями тепловыделения δQ в результате химических реакций и с колебаниями давления δp в камере сгорания. Учитывая экспоненциальную зависимость скорости химических реакций от температуры (закон Аррениуса), следует ожидать существенного уменьшения переменной составляющей тепловыделения δQ и колебаний давления за счет незначительного джоулева тепловыделения. Схематически подавление колебаний давления стабилизированным по току разрядом показано на рис. 1 сплошными линиями.

При стабилизации по напряжению ($U = \text{const}$) разряда, накладываемого на зону горения, следует ожидать усиление колебаний да-

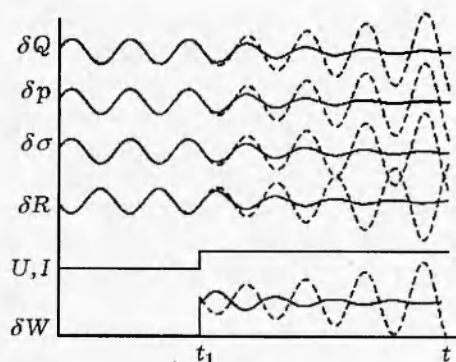


Рис. 1. Возможная схема подавления колебаний давления стабилизированным по току разрядом (сплошные линии) и усиления колебаний давления стабилизированным по напряжению разрядом (штриховые линии)

вления. В этом случае джоулево тепловыделение $\delta W = U^2/\delta R$ происходит в фазе с колебаниями давления и скорости тепловыделения. Предполагаемая схема усиления колебаний давления стабилизированным по напряжению разрядом представлена на рис. 1 штриховой линией.

В рассмотренном способе управление неустойчивым режимом горения осуществляется за счет «внутренней» обратной связи. В этом случае само горение регулирует управляющее воздействие разряда без использования датчиков, усилителей, фазовращающих устройств и т. д., необходимых при внешней обратной связи. Такая обратная связь — как отрицательная, так и положительная — самая короткая, практически безынерционная.

Описанный способ управления был реализован на поющем пламени с заранее подготовленными пропановоздушными смесями. Проведено две серии экспериментов. В первой серии определяли предельные значения токов, которые не приводят к шнурованию разряда вне зоны горения. Во второй серии эксперименты проводили в режиме стабилизации тока и напряжения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Опыты по определению тока шнурования проводили с пропановоздушными смесями на медной горелке диаметром 0,8 см. Электрический разряд зажигался между горелкой и вольфрамовым электродом, помещенным над вершиной конуса пламени. Значение тока разряда поддерживалось на заданном уровне, напряжение в зависимости от состава смеси менялось в пределах $2 \div 2,5$ кВ.

Эксперименты по управлению неустойчивым режимом горения поющего пламени проводили со стеклянными трубами-резонаторами. Горючую смесь готовили динамическим способом, подавая пропан и воздух в необходимой пропорции в смеситель. Массовую концентрацию и расход смеси контролировали интерферометром Рэлея и ротаметрами. Горелку из медной трубки помещали на высоте $1/4$ длины трубы-резонатора от нижнего ее конца.

Акустическое давление регистрировали у нижнего конца трубы-резонатора конденсаторным микрофоном, подсоединенным через усилитель к шумомеру. Сигнал с выхода шумомера для последующей обработки поступал через аналого-цифровой преобразователь в компьютер.

Электрический разряд создавался между горелкой и электродом над ней от специального источника питания.

Скорость тепловыделения отождествляли с интенсивностью излучения радикала СН на длине волны 0,4315 мкм и регистрировали фотоумножителем через интерференционный фильтр.

Визуализация исследуемых процессов проведена методом голографической интерферометрии в реальном масштабе времени. Опорная экспозиция соответствовала стационарному неколеблущемуся пламени. Проведена также прямая и ширен-съемка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Условия шнурования электрического разряда в зоне горения пропановоздушных смесей. На рис. 2 представлены фотографии, иллюстрирующие воздействие разряда на форму поверхности пламени при различных значениях силы тока разряда для разных составов пропановоздушной смеси. Видно, что с увеличением тока разряда уменьшается высота пламени, что свидетельствует об интенсификации скорости химических реакций в результате дополнительного джоулева тепловыделения. Однако при достижении током некоторого критического значения в разряде развиваются неустойчивости, обусловленные локальным перегревом газа и уменьшением в этой области электрического сопротивления. Последнее приводит к переходу объемного (тлеющего) разряда, протекающего через пламя, в дуговой, протекающий вне пламени.

Дуговой разряд не обеспечивает эффективного усиления, так как имеет большую вязкость по сравнению с вязкостью пламени [22]. В этом случае пламя обтекает разрядный канал дуги, не проникая внутрь него, что сопровождается деформацией поверхности дуги и уменьшением эффективности электроусиления пламени. Максимальные значения токов разряда в зависимости от состава горючей смеси приведены в таблице. Видно, что предель-

I , мА	$[C_3H_8]$, %	I , мА	$[C_3H_8]$, %
19	3,5	20	5,5
25	4,0	18,5	6,0
24	4,5	17	6,5
22	5		

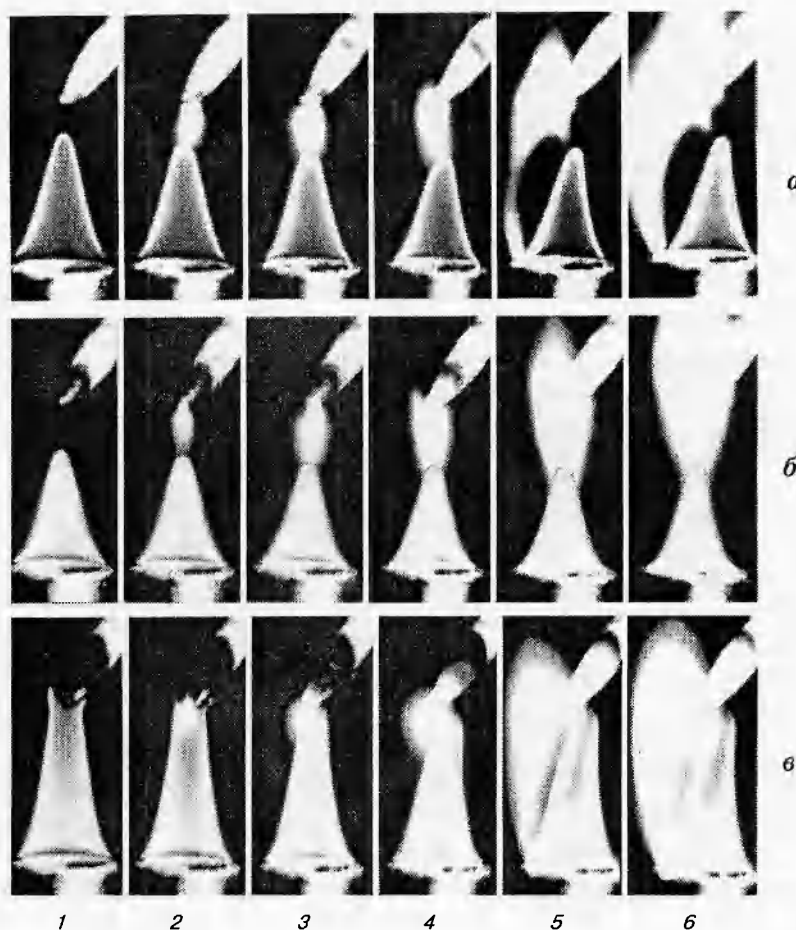


Рис. 2. Воздействие разряда на форму поверхности пламени при разности потенциалов между электродами 2,5 кВ и расходе горючей смеси 30 см³/с:

[C₃H₈], %: а — 3,2, б — 4,1, в — 6; I, мА: 1 — 0, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 15, 5 — 20, 6 — 25

ное значение тока разряда соответствует стехиометрической смеси (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$). Аналогичные результаты наблюдаются в случае горения пропанокислородных смесей. В этом случае максимальные значения токов шнурования на порядок выше. Полученные результаты были использованы для эффективного воздействия электрического разряда на неустойчивый режим горения поющего пламени.

Стабилизированный по току разряд. Визуализация структуры развитых колебаний поющего пламени, полученных разными способами за один период колебаний, представлена на рис. 3. Из фрагментов теневой и голографической съемок видно, что помимо периодического возмущения формы поверхности пламени наблюдаются также более развитые волновые структуры в сдвиговом пограничном

слое, которые зарождаются у корня пламени (см. рис. 3, д) в момент наименьшего давления. Причем кадры, соответствующие начальному моменту развития автоколебательного режима горения, показывают, что волновые структуры в сдвиговом пограничном слое проявляются раньше, чем на поверхности пламени. По-видимому, по аналогии с результатами работы [10] это связано с периодическим вихреобразованием на срезе горелки вне видимой зоны пламени. Возмущения пограничного слоя сносятся вверх по потоку, увеличиваясь в размере, и, взаимодействуя с фронтом пламени, приводят к модуляции площади его поверхности и скорости тепловыделения. При соответствующих фазовых соотношениях между колебаниями давления и скорости тепловыделения это приводит к возбуждению термоакустических колебаний, которые, в свою очередь, через обрат-

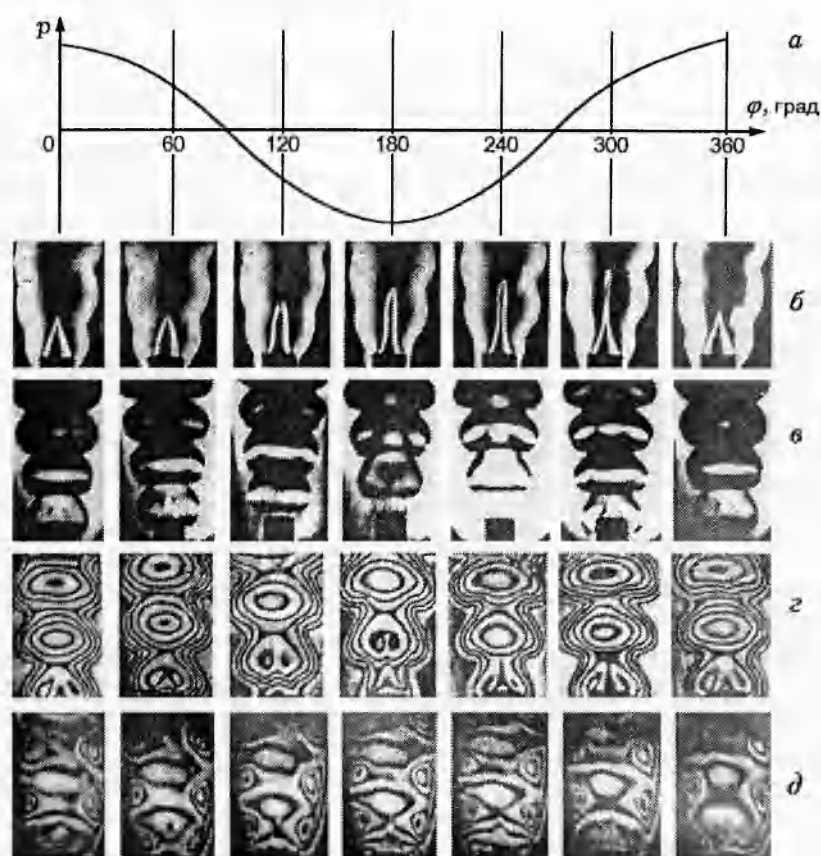


Рис. 3. Осциллограммы давления (a) и синхронизированные по фазе относительно колебания давления фотографии, полученные различными способами:

$б$ — теневая картина, $в$ — стробоголографическое изображение, $г$ — голографическая интерферограмма относительно горячей трубы, $д$ — голографическая интерферограмма относительно стационарного пламени

ную связь управляют динамикой вихреобразования и изменением формы поверхности пламени. Следует отметить, что в данной работе не ставилась задача изучения механизма неустойчивого режима горения через вихреобразование. Но тем не менее, как будет показано ниже, воздействуя на динамику переменного тепловыделения электрическим разрядом, можно управлять неустойчивым режимом горения.

Последнее подтверждается фрагментами голографических интерференционных фильмов, показывающих воздействие стабилизированного по току разряда на структуру поющего пламени в течение периода колебаний (рис. 4). Каждый фрагмент сдвинут во времени относительно предыдущего на 0,2 с. Фрагмент 2 соответствует началу воздействия разряда. Видно, что через 0,8 с после подачи напряжения периодические вихревые структуры в температурном пограничном слое исчезают, а фор-

ма интерференционных полос стабилизируется в пространстве. При этом, как показывают теневая и прямая съемки, прекращаются также колебания высоты и площади поверхности пламени, а следовательно, и колебания тепловыделения и давления.

В опытах установлено, что время исчезновения вихревых структур в пограничном слое практически не зависит от смены полярности прикладываемого напряжения. Последнее служит косвенным подтверждением того, что основной механизм воздействия разряда является тепловым.

Подавление колебательного режима горения наглядно демонстрируют осциллограммы колебаний давления p , интенсивности оптического излучения радикала $\text{CN}(J)$, напряжения U и тока I , приведенные на рис. 5. Видно, что при подаче напряжения амплитуды колебаний давления и скорости тепловыделения экспонен-

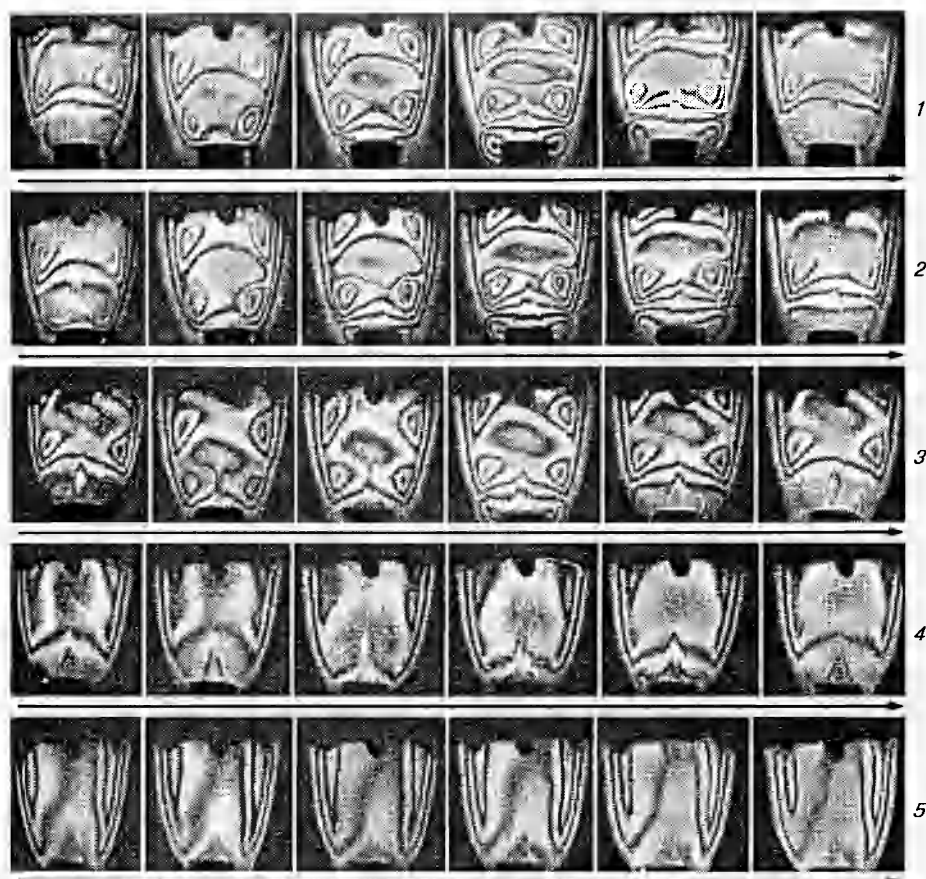


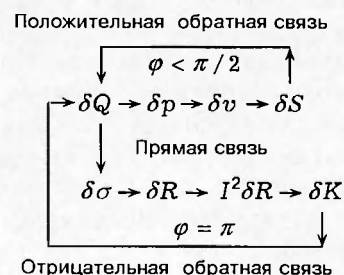
Рис. 4. Фрагменты дифференциальных голографических интерферогамм поющего пламени за один период колебаний, полученные относительно стационарного пламени в различные моменты воздействия стабилизированного по току разряда ($I = 3$ мА):

t , с: 1 — 0, 2 — 0,2, 3 — 0,4, 4 — 0,6, 5 — 0,8

циально уменьшаются (см. рис. 5,а) вплоть до полного исчезновения за время ~ 1 с. Согласно схеме, приведенной на рис. 1, это должно происходить в случае, когда переменное джоулево тепловыделение находится в противофазе со скоростью тепловыделения в результате химических реакций. В самом деле, из осциллограмм (см. рис. 5,б) с большим временным разрешением видно, что колебания оптического излучения и напряжения находятся в противофазе, а колебания давления и интенсивности излучения — в фазе.

При этом, судя по спектральной плотности колебаний давления (рис. 6), подавление автоколебательного режима горения происходит на всех гармониках одновременно. Подавление колебаний давления, по-видимому, осуществляется через дополнительную отрицательную обратную связь параметрическим спосо-

бом. Это означает, что разряд не влияет непосредственно на колебания давления, а служит лишь причиной изменения параметра автоколебательного процесса, взаимосвязанного через определенную цепочку с колебаниями давления. Возможную схему связи можно представить в виде двух параллельных цепочек:



Здесь δp , δQ , δv , δS , $\delta \sigma$, δR , δK — колеба-

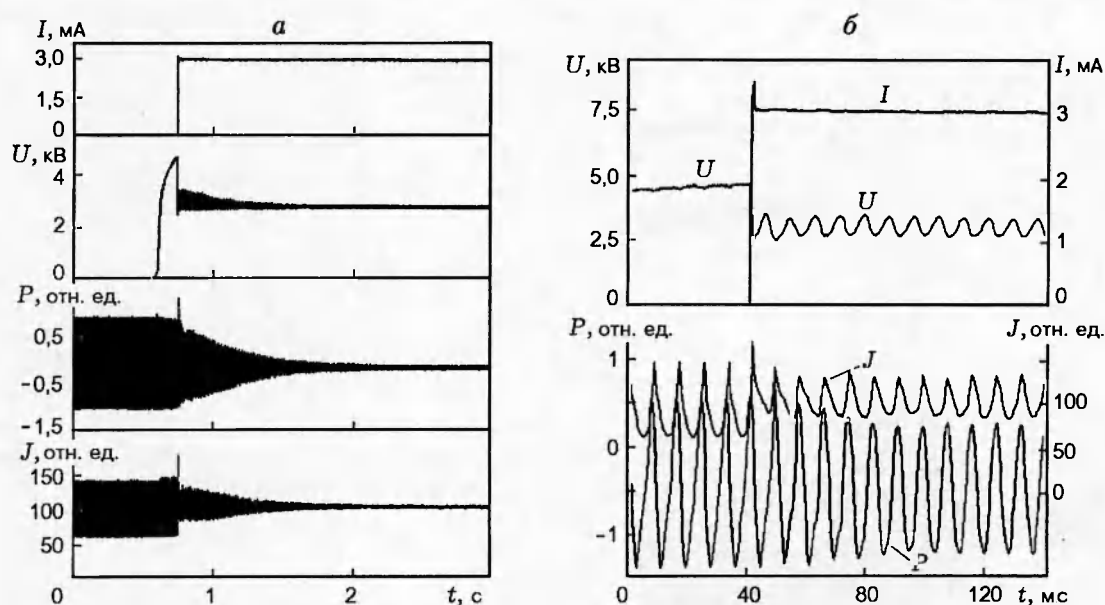


Рис. 5. Осциллограммы тока, напряжения, давления и интенсивности излучения поющего пламени при воздействии стабилизированного по току разряда:

а — весь процесс, б — начало воздействия разряда

ния давления, скоростей тепловыделения и газа, площади поверхности пламени, проводимости зоны горения, сопротивления и скорости химических реакций соответственно.

Из этой схемы видно, что при наложении разряда существуют две цепочки обратной связи — положительная и отрицательная. Первая обеспечивает самовозбуждение колебаний давления в камере сгорания, и, соответственно, разность фаз между колебаниями δQ и δS , согласно критерию Рэлея, меньше $\pi/2$. Вторая цепочка ответственна за подавление колебаний давления, и поэтому периодические изменения δQ и δK должны быть в противофазе. Это условие автоматически обеспечивается тем, что в зоне горения колебания электрической проводимости и сопротивления всегда находятся в противофазе. Остальные звенья этой цепочки практически безынерционны и не вносят сдвига фаз. Последнее означает, что в

условиях стабилизированного по току разряда любые изменения δR , вызванные флуктуациями δQ , приводят к дополнительному изменению δK в противофазе с δQ , вследствие джоулева тепловыделения $I^2 \delta R$. Такая отрицательная обратная связь будет осуществляться до тех пор, пока в зоне горения разряда имеются флуктуации скорости тепловыделения. С подавлением неустойчивого режима горения глубина отрицательной обратной связи уменьшается практически до нуля. Помимо подавления неустойчивого режима горения происходит также интенсификация горения, что подтверждается уменьшением высоты пламени.

В условиях проведенных экспериментов среднее тепловыделение поющего пламени ≈ 120 Дж, а его переменная составляющая $\delta Q \approx 25$ Дж (оценивалась по методике работы [21]). Джоулево тепловыделение и его переменная составляющая оценивались по осциллограммам (см. рис. 5): $W = 9$ и $\delta W = 1$ Дж. Из приведенных оценок видно, что для подавления неустойчивого режима горения поющего пламени по предлагаемому способу электрической энергии требуется на порядок меньше, чем химической. Более того, предварительные эксперименты по управлению устойчивостью горения в более теплонапряженных камерах сгорания, например в модели прямоточного воздушно-реактивного двигателя, показали, что электрической энергии требуется на два и более порядков меньше.

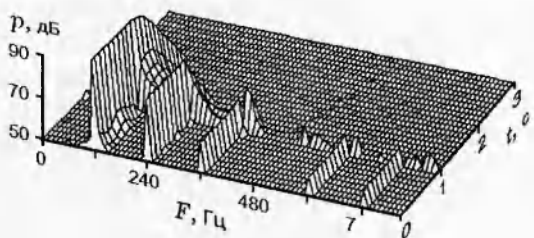


Рис. 6. Спектральная плотность колебаний давления в зависимости от времени воздействия стабилизированного по току разряда ($I = 3$ мА)

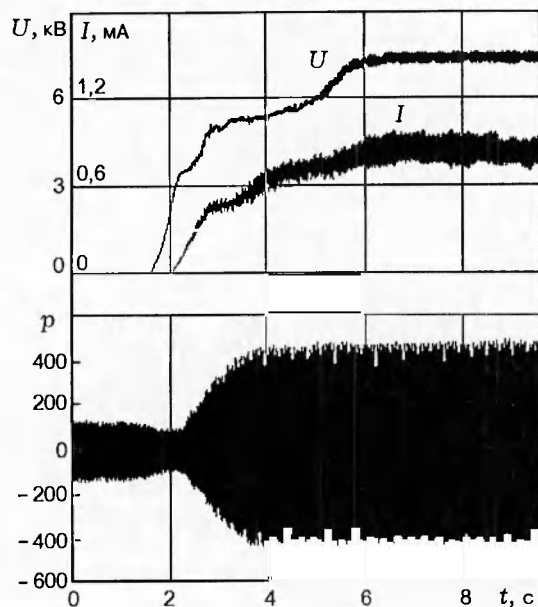


Рис. 7. Осциллограммы напряжения, тока и давления поющего пламени при воздействии стабилизированного по напряжению разряда:

шкала датчика давления проградуирована в милливольтгах

Стабилизированный по напряжению разряд. Результаты экспериментов представлены на рис. 7 в виде осциллограмм колебаний давления, тока и напряжения, а соответствующие им зависимости амплитудных значений от времени — на рис. 8. Из графиков и осциллограмм видно, что при наложении стабилизированного по напряжению разряда колебания давления увеличиваются по амплитуде на 10 дБ. При этом усиление автоколебательного режима горения происходит, в соответствии с предложенной физической моделью, в результате организации дополнительной положительной обратной связи через джоулево тепловыделение. В этом случае переменное джоулево тепло выделяется в тех же местах и в то же время, что и колебания тепловыделения в результате химических реакций. Усиление неустойчивого режима горения происходит до тех пор, пока теплотери не сравняются с теплоприходом на поддержание термоакустических колебаний.

При воздействии разряда на зону горения, соответствующую границе концентрационной области молчания поющего пламени, колебания давления усиливаются более чем на 20 дБ. Механизм появления концентрационных областей молчания и возбуждения описан в работе

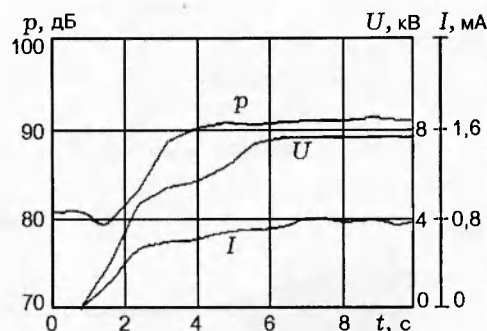


Рис. 8. Зависимость амплитудных значений давления, напряжения и тока от времени воздействия разряда

[21].

Результаты спектрального анализа показывают, что возбуждение и усиление колебаний давления происходят также и на высоких гармониках за счет внутренней положительной обратной связи.

ВЫВОДЫ

Оптическими методами исследования показано, что возбуждение термоакустических колебаний поющего пламени связано с периодическим вихреобразованием в пограничном слое и взаимодействием вихрей с фронтом пламени.

Предложен новый оригинальный способ управления неустойчивым режимом горения за счет организации в зоне горения электрического разряда от источника питания с изменяющимся импедансом в зависимости от задачи управления. Экспериментально показано, что в случае наложения на зону горения стабилизированного по току разряда за счет внутренней отрицательной обратной связи происходит подавление вихреобразования в температурном пограничном слое и колебаний давления на всех гармониках одновременно. В случае воздействия стабилизированного по напряжению разряда, наоборот, наблюдаются возбуждение и усиление неустойчивого режима горения. Данный способ можно применять для управления неустойчивым режимом горения в теплонапряженных камерах сгорания при увеличении тока разряда.

Работа выполнена при финансовой поддержке научно-технического управления США (контракт 68171-96-C-9024) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-03-03348).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Неустойчивость** горения в ЖРД / Под ред. Д. Т. Харрье, Ф. Г. Рирдона. М.: Мир, 1975. С. 869.
2. **Натанзон М. С.** Неустойчивость горения. М.: Машиностроение, 1986. С. 248.
3. **Гузеев А. С., Христич И. С.** Визуализация течения при использовании разрушителей вихревых структур для управления продольными и поперечными вихрями // Тез. докл. конф. «Оптические методы исследования потоков». Новосибирск, 1993. С. 83–84.
4. **Шадов К. К., Гутмарк Э., Уилсон К. Дж., Парр Д. М.** Смещение в струе, истекающей из форсунки эллиптического сечения // Аэрокосм. техника. 1989. № 2. С. 70–76.
5. **Гутмарк Э., Шадов К. К., Уилсон К. Дж.** Динамика струй некруглой формы при сверхзвуковом горении // Аэрокосм. техника. 1990. № 4. С. 3–9.
6. **Гутмарк Э., Скэдоу К. К., Парр Т. П. и др.** Повышение эффективности процесса горения с помощью продольных вихрей // Аэрокосм. техника. 1990. № 1. С. 158–165.
7. **Бродуэлл Дж. Э., Димотакис П. Э.** Значение новых экспериментальных результатов для моделирования реакций в турбулентных потоках // Аэрокосм. техника. 1987. № 2. С. 42–47.
8. **Poinsot T. J., Trouvé A. C., Veynante D. P. et al.** Vortex-driven acoustically coupled combustion instabilities // J. Fluid Mech. 1987. V. 177. P. 265–292.
9. **Yu K. H., Trouvé A. C. and Daily J. W.** Low-frequency pressure oscillations in a model ramjet combustor // J. Fluid Mech. 1991. V. 232. P. 47–72.
10. **Roquemore W. M., Goss L. P., Lynn W. F. and Chen I. D.** Structure of jet diffusion flames // Turbulent Reactive Flows: Proc. USA-France Joint Workshop. 1987. V. 4. P. 89.
11. **Кайласанат К., Гарднер Дж. Г., Борис Дж. П., Оран Э. С.** Воздействие акустических и вихревых волн и процесс низкочастотных колебаний в осесимметричных камерах сгорания // Аэрокосм. техника. 1990. № 1. С. 41–47.
12. **Рус Ф. В., Кегельман Дж. Т.** Управление когерентными структурами в присоединяющихся ламинарных и турбулентных слоях смешения // Аэрокосм. техника. 1987. № 5. С. 136–146.
13. **Нисиока М., Асаи М., Иосида С.** Управление отрывом потока с помощью акустического возбуждения // Аэрокосм. техника. 1991. № 3. С. 57–65.
14. **Schadow K. C., Gutmark E. G., Parr T. P. and Yu K. H.** The role of fluid dynamics in active combustion control // Materials of Intern. Seminar «Intra-Chamber Processes. Combustion and Gas Dynamics of Dispersed Systems». St Petersburg, 1995. P. 25–28.
15. **Гапонов С. А.** О взаимодействии сверхзвукового пограничного слоя с акустическими возмущениями // Теплофизика и аэромеханика. 1995. Т. 2, № 3. С. 209–217.
16. **А.с. СССР № 343116.** Способ автоматического управления процессом горения // Фиалков Б. С., Плицын В. Т., Сенкевич Г. П., Магун Я. И. 1972.
17. **Wenaes T. and Machesney J.** Electric field control of oscillatory combustion // Combust. Flame. 1970. V. 15. P. 85–87.
18. **Абруков С. А., Медведев Н. А., Афанасьев В. В. и др.** Об управлении вибрационным распространением пламени с помощью высоковольтного усилителя // Физика горения и методы ее исследования. Чебоксары, 1975. С. 107–111.
19. **Лаутон Дж., Вайнберг Ф.** Электрические аспекты горения. М.: Энергия, 1976.
20. **Китаев А. И., Абруков С. А., Кидин Н. И.** Диагностика и управление неустойчивым горением в энергетических установках с помощью модулированного плазматрона // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 46–50.
21. **Афанасьев В. В., Абруков С. А., Кидин Н. И., Кузьмин А. К.** Исследование условий возбуждения ламинарного кинетического поющего пламени // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 4. С. 34–39.
22. **Физические явления в газоразрядной плазме** / Е. П. Велихов и др. М.: Наука, 1987. С. 66–69.

Поступила в редакцию 7/V 1998 г.,
в окончательном варианте — 22/IX 1998 г.