

УДК 621.438.57.4

Р. С. КАШАПОВ, Д. В. СКИБА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СМЕШЕНИЕМ ТОПЛИВА

Обсуждаются последние достижения в области создания смесителей камер сгорания с предварительным смешением топлива. Представлены оригинальные технические решения, применяемые при создании камер сгорания данного типа, и расчетные методы, разработанные в научно-производственной фирме «Теплофизика» в период 1992–2002 гг. Основные результаты были получены в области расчета образования оксидов азота, организации оптимальных полей скорости и концентрации топлива на выходе из горелки, подавления пульсаций давления за счет выбора оптимального времени смешения и геометрии горелки для достижения максимальной диссипации колебательной энергии. *Газотурбинный агрегат; камера сгорания; оксиды азота; предварительное смешение топлива; смеситель; пульсации давления; горелочное устройство*

ВВЕДЕНИЕ

Создание современных стационарных газотурбинных установок (ГТУ), работающих на природном газе, выдвигает проблему существенного улучшения эмиссионных характеристик камер сгорания (КС). Наиболее радикальным способом снижения эмиссии оксидов азота NO_x , как известно, является применение в рабочем процессе камеры сгорания предварительного смешения топлива с воздухом для получения смеси бедного состава [1]. В мировой практике данные КС называются КС «DLE»-типа [22].

История создания камер сгорания с предварительным смешением топлива для ГТУ насчитывает более 10 лет, и в этой связи можно подробно рассмотреть взаимосвязь между методами проектирования смесителей горелочных устройств для камер сгорания данного типа с основными методами расчета, предлагавшимися в процессе развития данной концепции.

ПЕРВЫЙ ЭТАП (НАЧАЛО 90-х). УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ НА ЭМИССИЮ ОКСИДОВ АЗОТА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ

Применение концепции предварительной подготовки смеси основано на том, что реакции образования оксидов азота требуют наличия свободных радикалов, концентрация которых сильно зависит от температуры горения. Обеднение смеси позволяет снизить температуру горения и тем самым снизить

эмиссию оксидов азота. Из-за существенно нелинейной зависимости скорости образования оксидов азота от температуры (рис. 1) [8] скорость образования оксидов азота, осредненная по времени, может в несколько раз превосходить скорость образования оксидов азота, рассчитанную по средней температуре фронта пламени.

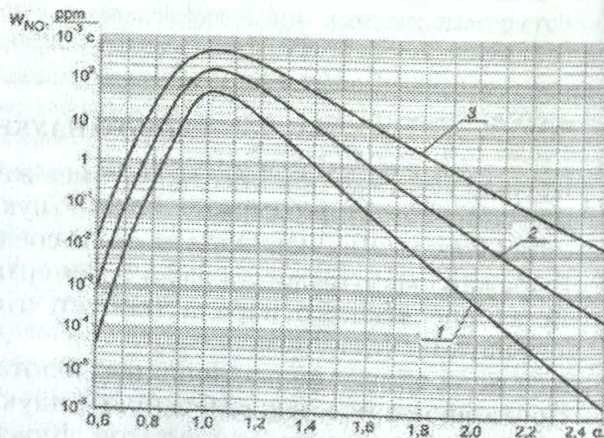


Рис. 1. Скорость образования NO по модели равновесия C-H-O при $P = 0,43 \text{ МПа}$: 1 — $T_b = 473 \text{ К}$; 2 — $T_b = 673 \text{ К}$; 3 — $T_b = 873 \text{ К}$

Поэтому эмиссия оксидов азота определяется не только средним значением концентрации топлива, но и моментами функции плотности вероятности (ФПВ) концентрации топлива. Одним из таких моментов является среднеквадратичное отклонение концентрации топлива, влияние которого на эмиссию оксидов азота представлено на рис. 2 [10]. Результаты расчетов и измерений показывают,

что в околостехиометрических смесях пульсации концентрации топлива приводят к снижению эмиссии оксидов азота, а в бедных смесях — к увеличению эмиссии. Поэтому при создании камер сгорания с предварительным смешением топлива возникает задача снижения пульсаций концентрации топлива.

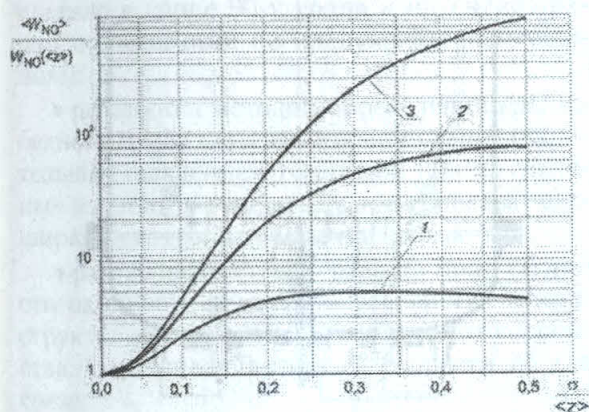


Рис. 2. Зависимость относительной средней скорости окисления азота от интенсивности пульсаций концентрации при $P = 0,43$ МПа, $T_b = 673$ К: 1 — $\alpha = 1,4$; 2 — $\alpha = 1,7$; 3 — $\alpha = 2,0$

Для определения зависимости ФПВ концентрации топлива от конструкции смесителя горелочного устройства обычно делаются следующие допущения:

- топливо газообразно;
- фронт пламени бесконечно тонкий;
- сжимаемостью смеси топлива с воздухом можно пренебречь.

На основе данных допущений в отечественной и зарубежной печати было предложено множество методов расчета функции плотности вероятности концентрации топлива, из которых наиболее научно обоснованным является метод, описанный в работах Кузнецова и Секундова [3, 4], поскольку позволяет учесть наличие как внутренней, так и внешней перемежаемости при смешении в турбулентном потоке. Основные результаты, полученные в данных работах, заключаются в следующем:

- смешение топлива с воздухом в смесителе можно разделить на две стадии: до и после слияния струй топлива;
- на первой стадии процесса ФПВ содержит особенности вызванные наличием перемежаемости и описываемые δ -функциями Дирака, а на второй стадии ФПВ может быть описана нормальным законом;
- пульсации концентрации топлива монотонно убывают с увеличением времени сме-

шения и коэффициента гидравлического сопротивления;

- интенсификация процесса смешения может быть достигнута за счет включения в конструкцию смесителя горелочного устройства турбулизирующих элементов [1].

Результаты данных теоретических исследований были положены в основу методологии создания камеры сгорания в начале 90-х годов. Основные задачи проводившихся в то время исследований заключались в следующем:

- разработка методов расчета ФПВ пассивной примеси в смесителях горелочных устройств;
- разработка методики расчета эмиссии оксидов азота на основе результатов измерений и расчетов концентрации пассивной примеси и моментов ее ФПВ без горения.

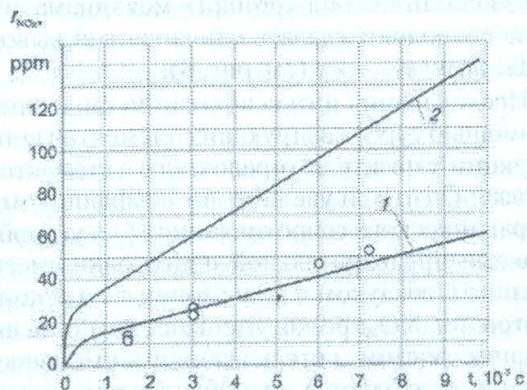


Рис. 3. Зависимость концентрации NOx в пламени однородной метано-воздушной смеси при $T_b = 723$ К, коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,7$ и давлении 0,4 МПа от времени пребывания: 1 — расчет по модели частичного равновесия; 2 — результаты расчета по модели Миллера и Боумэна с учетом «prompt» механизма образования оксидов азота; \circ — экспериментальные данные

В ходе проводившихся исследований было установлено, что в бедной перемешанной до молекулярного уровня смеси метана с воздухом возникают отклонения скорости образования оксидов азота от модели Кузнецова-Билджера, основанной на предположении о термодинамическом равновесии реакций группы С-Н-О за бесконечно узким фронтом пламени и расчете окисления азота по механизму Зельдовича. Данные отклонения, как было показано, связаны с существенной термодинамической неравновесностью в продуктах сгорания в зоне догорания за фронтом пламени главным образом в реакциях с участием СО, ОН, О (рис. 3), что, ввиду сильной зависимости скорости образова-

ния оксидов азота от концентрации атомарного кислорода и радикала OH , приводит к низкой точности расчета эмиссионных характеристик камеры сгорания. Вследствие этого зависимость эмиссии оксидов азота от давления носит существенно немонотонный характер и поэтому не может быть описана предлагаемой ранее зависимостью эмиссии оксидов азота в виде квадратного корня давления [19, 9].

Кроме того, в настоящее время активно изучается вопрос [2] о роли и величине влияния механизмов образования оксидов азота на фронте пламени и в предпламенной области (так называемый «prompt» механизм образования оксидов азота). Однако как отсутствие достаточно точных констант химических реакций, так и сравнительно одинаковый уровень погрешности расчетов образования оксидов азота как с использованием, так и без использования «prompt» механизма пока не позволяют сделать однозначный вывод по данному вопросу (см. рис. 3).

Исследования интенсификации смешения с помощью турбулизирующих элементов конструкции смесителя горелочного устройства показали, что при увеличении коэффициента гидравлического сопротивления (ξ) в устройстве для предварительной подготовки смеси топлива с воздухом в диапазоне $\xi < 1,0$ концентрация NO_x резко уменьшается, с дальнейшим ростом потерь зависимость существенно ослабляется, что обусловлено нелинейным характером зависимости турбулентной вязкости от потерь энергии на турбулизацию потока [10].

ВТОРОЙ ЭТАП (КОНЕЦ 90-х). ДЕТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СМЕШЕНИЕМ ТОПЛИВА.

АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ РАЗРАБОТАННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ

На основе полученных математических моделей были разработаны экспериментальные и промышленные камеры сгорания [17, 18] (рис. 4, 5). Результаты экспериментов и опытно-промышленных испытаний показали, что предварительная подготовка смеси топлива с воздухом позволяет достичь сверхнизких уровней эмиссии NO_x , однако практическое применение данной концепции ограничивается проблемой обеспечения работоспособности КС на режимах, близких к бедному срыву фронта пламени в первичной

зоне. Небольшие изменения режимных параметров могут привести к погасанию КС или к высокой эмиссии монооксида углерода (CO), превышающей нормативные ограничения. В современной литературе данная проблема называется проблемой «обеспечения статической устойчивости КС».

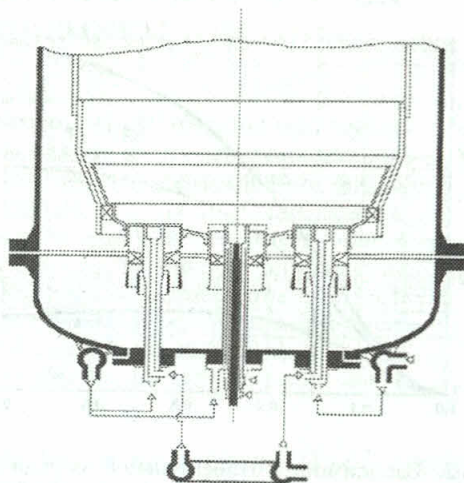


Рис. 4. Схема разработанной камеры сгорания для ГПА ГТК-10-4

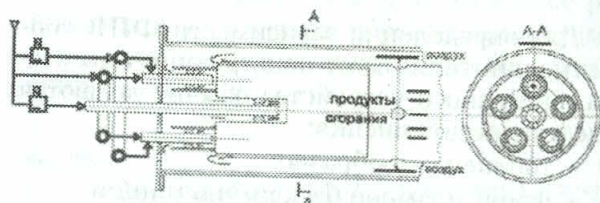


Рис. 5. Схема разработанной камеры сгорания для ГПА ГТК-10И

Улучшение качества смесеобразования, основанное на численном и экспериментальном исследовании процессов смешения, привело к обострению проблемы проскока внутрь горелочного устройства фронта пламени. Взаимосвязь оптимизации смешения с проскоком внутрь горелочного устройства фронта пламени следует из установленного Секундовым [4] факта, заключающегося в том, что невозможно создать устройство из механических движущихся или подвижных частей, обеспечивающее высокое качество перемешивания топлива с воздухом в течение малого времени смешения без создания неравномерности поля скорости. Именно наличие неравномерности поля скорости при хорошем качестве смешения топлива с воздухом приводит к проскоку внутрь горелочного устройства по следу от турбулизатора.

Кроме того, следует особо подчеркнуть проблему возникновения пульсаций давле-

ния в газовом тракте ГТУ, которая тесно связана с динамической неустойчивостью фронта пламени. Высокоамплитудные пульсации давления в КС приводят к повышенным напряжениям в элементах конструкции, что значительно снижает ресурс ГТД.

Именно наличие данных проблем в конструкции смесителя горелочного устройства привело в конце 90-х годов к интенсификации исследований по следующим направлениям:

- разработка методов определения границ бедного срыва камеры сгорания с предварительным смещением топлива и конструктивных элементов горелочного устройства, расширяющего границу бедного срыва;
- разработка методов расчета поля скорости на срезе горелочного устройства и конструктивных элементов горелочного устройства, выравнивающих поле скорости на его срезе;
- исследование механизмов обратной связи, возбуждающих автоколебательные процессы в камерах данного типа.

Исследование влияния конструктивных параметров горелочного устройства на границы бедного срыва показало, что существует взаимосвязь между проскоком внутрь горелочного устройства, границами бедного срыва и динамической устойчивостью камеры сгорания. Действительно, лучшая устойчивость при прочих равных условиях возможна при стабилизации фронта пламени за плохообтекаемым телом за счет тепловой инерции плохообтекаемого тела и интенсификации турбулентности в следе за ним. С другой стороны, наличие плохообтекаемого тела, прогретого до высокой температуры, может приводить к проскоку фронта пламени по пограничному слою в окрестности нагретой стенки. В некоторых случаях на границе устойчивой стабилизации внутри горелочного устройства возникают колебания давления «расходного» типа [6, 7, 11, 12, 15].

Так, в частности, в коническом горелочном устройстве фирмы АВВ стабилизация фронта пламени происходит в зоне обратных токов, не примыкающей непосредственно к плохообтекаемому телу, однако данное горелочное устройство отличается очень узкой границей бедного срыва, что даже признается разработчиками. Установка плохообтекаемого тела приводит к значительному расширению границы бедного срыва [11].

Для дальнейшего увеличения статической устойчивости горения можно увеличивать за-

крутку потока в горелочном устройстве. Однако данный подход приводит к деформации поля скорости на срезе горелочного устройства и тем самым увеличивает вероятность проскока внутрь горелочного устройства.

Исследование динамической неустойчивости камеры сгорания показало, что в камерах сгорания данного типа возбуждается несколько видов автоколебаний. В частности, тип и характер автоколебаний существенно зависят от давления в камере сгорания. При давлениях, близких к атмосферному, обычно возбуждаются терморелаксационные колебания, связанные либо с релаксационными процессами в химических реакциях, либо с наличием зоны неустойчивой стабилизации фронта пламени [13], в то время как при давлениях выше 0,5 МПа исследователи обычно диагностируют термоакустические механизмы обратной связи [5]. Возбуждение данных видов автоколебаний связано с основными особенностями работы камер сгорания с предварительным смещением топлива. Действительно [5]:

- работа горелочного устройства происходит на границе бедного срыва, что благоприятно для механизмов обратной связи, обусловленных релаксационными процессами в химических реакциях и неустойчивыми зонами стабилизации фронта пламени, возникающими при проскоке, в частности, при проскоке фронта пламени внутрь горелочного устройства;
- существует максимум пульсационного давления на срезе горелочного устройства для термоакустических колебаний, что связано с большим раскрытием жаровой трубы для предотвращения проскока внутрь горелочного устройства;
- существует время смещения (в теории автоматического регулирования время запаздывания между подачей топлива в смеситель горелочного устройства и его сгоранием на фронте пламени).

Таким образом, в ходе проведенных исследований стало ясно, что ни одна из возникающих проблем не может быть решена без решения проблемы оптимизации конструкции смесителя с учетом противоречивых требований статической и динамической устойчивости, проскока внутрь горелочного устройства, потерь давления в камере сгорания и эмиссии вредных веществ.

ТРЕТИЙ ЭТАП (НАЧАЛО 2000-х). РАЗРАБОТКА КАМЕР СГОРАНИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И САМОРЕГУЛЯЦИИ

Трудности в создании полной модели процессов, происходящих в камере сгорания, привели в начале 2000-х годов к формированию концепции автоматического управления рабочим процессом в камере сгорания и, в частности, к созданию систем активного регулирования камеры сгорания [24]. Применение данной концепции потребовало использования сложных дорогих и ненадежных систем контроля положения фронта пламени и регулирования состава смеси в первичной зоне КС с применением подвижных частей, сенсоров и электронно-вычислительных комплексов. Применение вышеуказанных систем значительно удорожает конструкцию КС и снижает ее надежность, поэтому наиболее перспективным путем решения сложившихся проблем является создание системы газодинамической саморегуляции КС. Именно указанное направление работ было выбрано за основу авторами данной статьи. Основные положения данной концепции заключаются в неизменяемой геометрии камеры сгорания, многогорелочной компоновке камеры сгорания, организации нескольких систем подачи топлива, расширении диапазона низкоэмиссионного горения топлива на основе изучения процессов смешения и горения предварительно подготовленной смеси [20, 21].

В ходе исследований методов обеспечения статической устойчивости камеры сгорания были разработаны системы саморегулирования поля концентрации топлива на срезе горелочного устройства. В отличие от известных конструкций фирм «Сименс», «Солар», «Дженерал Электрик», в разработанной конструкции горелочного устройства статическая устойчивость горения на пониженных нагрузках достигается за счет оптимизации условий смешения газа с воздухом. Зависимость глубины проникновения струи от соотношения импульсов струи и воздушно-горючего потока была использована для формирования эпюры концентрации топлива, автоматически «подстраивающейся» под режим работы горелочного устройства. На пониженных режимах с «обедненным» составом смеси концентрация топлива в привтулочной области (зоне стабилизации фронта пламени) возрастает за счет уменьшения пробивной способности струй топлива, а на режиме максимальной нагрузки поле концентрации топлива вы-

равнивается за счет специально подобранной конфигурации точек подачи топлива.

Другим вариантом решения проблемы обеспечения статической устойчивости горения является изменение расхода воздуха в первичную зону за счет изменения расхода воздуха через горелочное устройство. Данное изменение расхода воздуха осуществляется за счет изменения сопротивления горелочного устройства путем варьирования долей топлива, подаваемого по направлению потока воздуха и против него [16].

Для предотвращения проскока внутрь горелочного устройства с центральным телом была разработана программа расчета поля скорости в камере сгорания данного типа. Результаты расчета показали, что неравномерность поля скорости на срезе горелочного устройства существенно зависит от конфигурации устья горелочного устройства [13] (рис. 6). Для частного случая горелочного устройства с аксиальным завихрителем была определена оптимальная конфигурация устья горелочного устройства, описанная в патенте Российской Федерации [14].

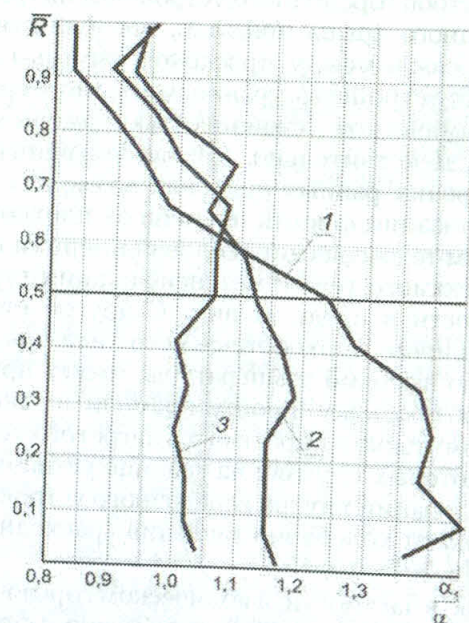


Рис. 6. Результаты измерений концентрации топлива на срезе горелочного устройства при радиальной подаче топлива из топливных пилотов: 1 – среднемассовый коэффициент избытка воздуха в смесителе горелочного устройства $\alpha_1 = 2,46$; 2 – $\alpha_1 = 1,90$; 3 – $\alpha_1 = 1,55$

Проводившееся в НПФ «Теплофизика» комплексное исследование неустойчивости горения в камерах сгорания с предварительным смешением топлива можно разбить на два этапа.

В ходе первого этапа исследовались автоколебания при атмосферном давлении. Результаты исследований показали, что в данном случае возникают терморелаксационные колебания, связанные с проскоком внутрь горелочного устройства. Так, в частности, было установлено, что в данном случае частота пульсаций давления прямо пропорциональна скорости воздушного потока (рис. 7), а граница устойчивой работы определяется границей проскока внутрь горелочного устройства [13].

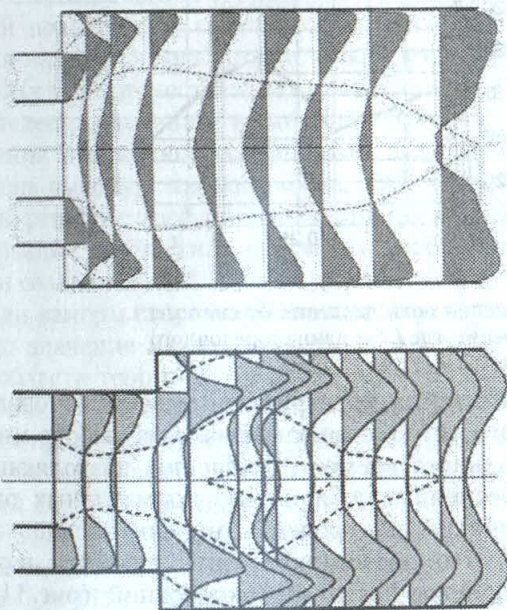


Рис. 7. Влияние геометрии устья горелочного устройства на поле скорости в камере сгорания

Анализ результатов экспериментов при давлениях 0,5–1,0 МПа показал, что в данных условиях в рассматриваемой камере сгорания наблюдаются термоакустические колебания, поскольку в ходе проведенных экспериментов было установлено, что [5]:

- при увеличении среднemasовой скорости в ГУ происходит переход частоты колебаний с одной собственной частоты колебаний давления в камере сгорания на другую собственную частоту (рис. 8);
- частота колебаний давления обратно пропорциональна длине камеры сгорания и равна собственной частоте колебаний давления в камере (рис. 9);
- амплитуда пульсаций давления имеет периодическую зависимость от времени смещения.

Поэтому на основе результатов экспериментальных исследований был сделан вывод о том, что при создании динамической модели

камеры сгорания необходимо учитывать сжимаемость и нестационарность течения в жаровой трубе, смесителе и в топливной магистрали.

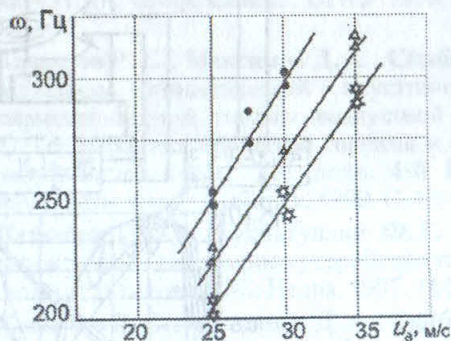


Рис. 8. Зависимость частоты колебаний давления от среднemasовой скорости в горелочном устройстве при полном давлении в камере сгорания $P = 0,1$ МПа

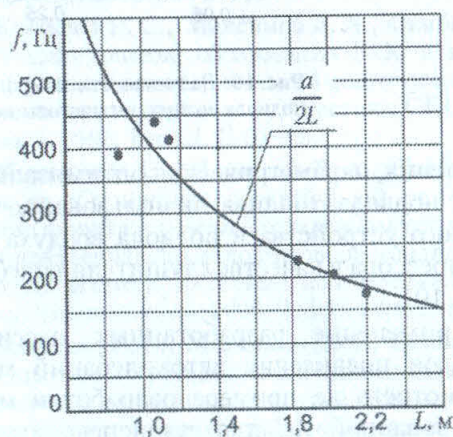


Рис. 9. Зависимость частоты колебаний давления от длины камеры сгорания при полном давлении в камере сгорания $P = 0,7$ МПа

С практической точки зрения задача теоретического определения асимптотической (предельной) амплитуды колебаний давления в случае неустойчивого режима горения не имеет существенного значения. В большинстве известных случаев ограничения на уровень колебаний и случайные возмущения в камере сгорания существенно меньше предельных амплитуд пульсаций давления и зачастую лежат в диапазоне применимости линейного приближения для описания возбуждаемых пульсаций давления. Поэтому исследования автоколебаний проводились только для случая их «разгона» при появлении случайного возмущения полей давления и концентрации топлива. В ходе данного исследования в НПФ «Теплофизика» были установлены основные методы обеспечения устойчивости камеры сгорания данного типа — это выбор оптимального времени

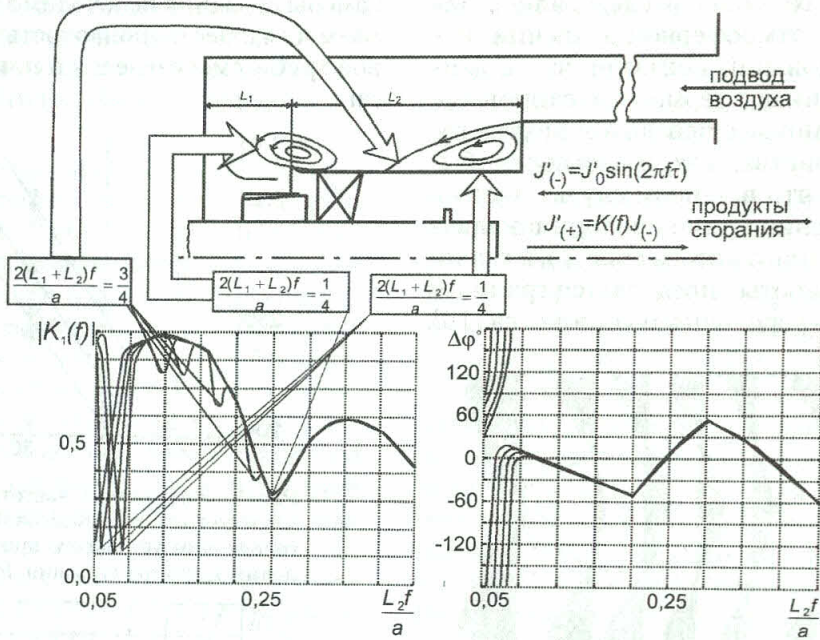


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения волн давления от системы подвода воздуха от частоты колебаний давления, где L_2 — длина горелочного устройства

смещения, параметрическая оптимизация канала подвода топлива, использование горелочного устройства и подвода воздуха из-за компрессора в качестве глушителя колебаний (рис. 10).

Применение разработанных пассивных методов подавления автоколебаний можно рассмотреть на примере разработки модернизированной КС для газоперекачивающей установки ГТК-10И. Зависимость разности между генерацией и диссипацией колебательной энергии от частоты автоколебаний для исходной конструкции КС (рис. 11, а) показывает, что существует ограниченный диапазон частот, при которых могут возбуждаться автоколебания, обусловленные пульсациями концентрации топлива. Первый этап оп-

тимизации конструкции смесителя горелочного устройства заключался в выборе минимального времени смешения, позволяющего обеспечить соблюдение нормативных ограничений на уровень эмиссии оксидов азота, что позволило сузить диапазон возбуждаемых частот автоколебаний (рис. 11, б). В дальнейшем на основе выбора оптимальной геометрии системы подвода воздуха была подавлена вторая мода пульсаций давления (рис. 11, в). Таким образом, в ходе проведенного исследования было установлено, что за счет оптимального выбора геометрических параметров смесителя горелочного устройства можно обеспечить устойчивость горелочного устройства к термоакустическим ав-

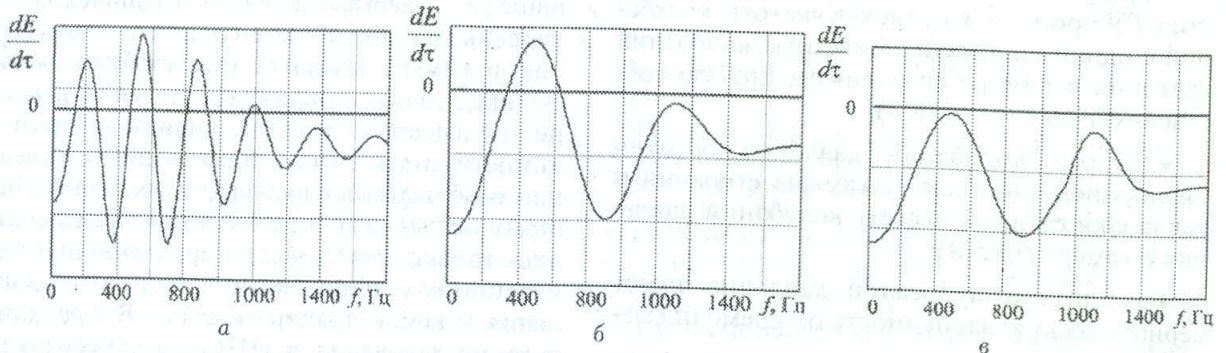


Рис. 11. Влияние подбора геометрических размеров смесителя горелочного устройства на производную колебательной энергии по времени: а — исходная конструкция; б — после выбора оптимального времени смешения; в — после выбора оптимальной длины горелочного устройства

токолебаниям, обусловленным пульсациями концентрации топлива.

Итак, представленные результаты подтверждают возможность создания камеры сгорания с широким диапазоном устойчивой низкоэмиссионной работы на основе реализации концепции, выдвинутой НПФ «Теплофизика».

ВЫВОДЫ

Создание камер сгорания с предварительной подготовкой смеси последнего поколения находится «на острие ножа» конкурентной борьбы отечественных и зарубежных двигателестроительных компаний. Процесс решения возникающих при этом задач имеет очень высокую наукоемкость. Так, в частности, решение проблем проектирования камер сгорания такого типа привело к необходимости создания комплексной динамической модели камеры сгорания, в которой существенное значение имеют последние достижения в области теории автоматического регулирования. В этой связи особую ценность приобретают результаты разработки первой отечественной камеры сгорания с предварительным смешением топлива для ГПА ГТК-10-4, а также результаты разработки и опытно-промышленной эксплуатации камеры сгорания для ГПА ГТК-10И, ГПА ГТК-25И, имеющих аналог в зарубежной газотурбинной промышленности в виде ГТУ Flame 3, результаты безуспешного внедрения в рабочий цикл которой предварительного смешения топлива подробно изложены в работах Виргинского политехнического института [23, 24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брей К. Н. Турбулентные течения предварительно перемешанных реагентов // Турбулентные течения реагирующих газов. М.: Мир, 1983. 328 с.
- Волков Д. В., Зайцев С. А. Исследование образования NO_x при горении однородной метано-воздушной смеси // Физико-химические проблемы сжигания углеводородных топлив: Тез. докл. науч.-техн. конф. М.: ЦИАМ, 1998.
- Теория турбулентных струй / Под ред. Г. Н. Абрамовича. М.: Наука, 1984. 720 с.
- Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение. М.: Наука, 1986. 280 с.
- Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В. и др. Исследование автоколебаний давления в камере сгорания с предварительным смешением топлива // Газотурбинные технологии. Рыбинск, 2001. № 4 (13). С. 34–37.
- Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В. Исследование динамической неустойчивости пламени однородной смеси в закрученном потоке // Тез. докл. объединенной междунар. науч.-техн. конф. Самара: СГАУ 1999. С. 54–55.
- Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В. Механизм динамической неустойчивости пламени бедной топливо-воздушной смеси // Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды: Тез. докл. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. Рыбинск, 1999. С. 18–19.
- Кашапов Р. С., Тухбатуллин Ф. Г. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок. М.: Недра, 1997. 160 с.
- Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В. Моделирование процесса образования NO при горении однородной смеси // Физико-химические проблемы сжигания углеводородных топлив: Тез. докл. Всерос. науч. конф. М.: ЦИАМ, 1998. С. 72–73.
- Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В. Моделирование образования NO_x в камере сгорания с предварительной подготовкой топливо-воздушной смеси // Вестник СГАУ. Самара, 1998. Вып. 1. С. 64–69.
- Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В. и др. О природе неустойчивой стабилизации фронта пламени в горелочном устройстве с предварительной подготовкой топливо-воздушной смеси / XII симп. по горению и взрыву. Черноголовка, 2000. Ч. 3. С. 136–138.
- Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В. Опытное и теоретическое исследование горения в закрученном потоке предварительно подготовленной топливо-воздушной смеси // Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды: Тез. докл. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. Рыбинск, 1999. С. 19–20.
- Кашапов Р. С., Максимов Д. А., Скиба Д. В. Экспериментальное и теоретическое исследование полей скоростей и восстановленной концентрации топлива в горелочных устройствах с аксиальным завихрителем // Физико-химические проблемы сжигания углеводородных топлив: Тез. докл. Всерос. науч. конф. М.: ЦИАМ, 1998. С. 25–26.
- Пат. 9934 (РФ) МКИ⁵ F23D 14/02. Горелочное устройство / Д. А. Максимов, Р. С. Кашапов, Д. В. Скиба и др. Заяв. 01.10.98. Оpubл. Полезные модели и изобретения. Бюл. № 5. М.: ФИПС, 1999. С. 82.
- Пат. 2128313 (РФ) МКИ⁵ F23D 14/02. Горелочное устройство / Р. С. Кашапов, Д. А. Максимов, С. Ф. Жданов, Ю. И. Захаров, Д. В. Скиба: ООО НПФ «Теплофизика». Заяв. 10.06.97. Оpubл. Изобретения. М.: ФИПС, 1999. Ч. 2. Бюл. № 9. С. 378.
- Пат. 2134843 (РФ) МКИ⁵ F23N 1/2. Способ регулирования распределения расхода воздуха / Р. С. Кашапов, Д. А. Максимов, А. З. Байков, С. Ф. Жданов, Д. В. Скиба: ООО

- НПФ «Теплофизика». Заяв. 10.06.97. Оpubл. Изобретения. М.: ФИПС, 1999. Ч. 2. Бюл. № 23. С. 269.
17. Пат. 10443 (РФ) МКИ⁵ F23R 3/00. Камера сгорания / Д. А. Максимов, Р. С. Кашапов, Д. В. Скиба и др. Оpubл. Полезные модели и изобретения. М.: ФИПС, 1999. Бюл. № 7. С. 39.
 18. Пат. 12601 (РФ) МКИ⁵ F23R 3/00. Камера сгорания / Р. С. Кашапов, Д. А. Максимов, Д. В. Скиба и др. Заяв. 16.03.99. Оpubл. Полезные модели и изобретения. М.: ФИПС, 2000. Ч. 2. Бюл. № 2. С. 366.
 19. Bilger R. W. Reaction rates in diffusion flames // Combustion and Flame. V. 30, No 3. P. 277–284.
 20. Kashapov R. S., Maksimov D. A., Gilmanov A. R., Skiba D. V. Conception lean premixed flame combustor burner. Research, development and application // Int. Sci. and Technol. Sem. on Problems of Aviation Engines Design. Ufa, 1996. P. 68–73.
 21. Kashapov R. S., Maximov D. A., Skiba D. V. et al. Low emission lean premixed combustor design conception for aviation gas turbine to power plant conversion and application in gas-main plant GTK-101 // Symp. on Actual Problems of Aircraft Engines Construction. Ufa, 1999. С. 54–60.
 22. Khana V. K., Vandsburger U., Saunders W. R. et al. Dynamic analysis of burner stabilized flames. Part I: Laminar premixed flame // AFRC Int. Symp. USA, Sept. 2000.
 23. Richards G. A., Janus M. C. Characterization of oscilation during premix gas turbine combustor.

tion. // Int. Gas Turbine & Aeroengine Congr. & Exhibition. Orlando, Florida, June 2–5, 1997.

24. Smith C. E., Leonard A. D. CFD Modeling of combustion instability in premixed axisymmetric combustors // Int. Gas Turbine & Aeroengine Congr. & Exhibition. Orlando, Florida, June 2–5, 1997.

ОБ АВТОРАХ

Кашапов Рафаэль Салих-зянович, директор НПФ «Теплофизика», ст. науч. сотр. каф. ТАРД УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1972). Канд. техн. наук (УАИ, 1984). Исследования в области турбулентных реагирующих течений в камерах сгорания ГТД, некорректных задач теплообмена, неустойчивости горения.



Скиба Дмитрий Владимирович, вед. инж.-иссл. НПФ «Теплофизика», ст. преп. каф. ТАРД. Дипл. инж.-теплофизик (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2002). Исследования в области турбулентных реагирующих течений в камерах сгорания газотурбинных двигателей.



Разное

СЛОВО О НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Знать, что мы знаем то, что мы знаем, и что мы не знаем того, чего мы не знаем, — это и есть истинное знание. *Конфуций.*

Наука есть систематизированное знание. *Л. С. Берг.*

Сперва собирать факты и только после этого связывать их мыслью. *Аристотель.*

Время — лучший ценитель научных работ. *Пастер.*

Недостаточно только иметь хороший разум, но главное — это хорошо применять его. *Декарт.*

Не телесные силы и не деньги делают людей счастливыми, но правота и многосторонняя мудрость. *Демокрит.*

Я мыслю, следовательно, я существую. *Декарт.*

Добродетель есть знание. *Сократ.*

Три пути ведут к знанию: путь размышления — это путь самый благородный, путь подражания — это путь самый легкий и путь опыта — это путь самый горький. *Конфуций.*

Гений есть терпение мысли, сосредоточенной в известном направлении. *Ньютон.*

[Слово о науке: Афоризмы. Изречения. Литературные цитаты. Кн. 2. М.: Знание, 1981.]