

На правах рукописи



Данилец Лев Анатольевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЫ
СГОРАНИЯ ГТУ НА МОДЕЛЯХ

05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор Зысин Леонид Владимирович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Митрофанов Валерий Александрович;

Кандидат технических наук, доцент Смирнов Александр Анатольевич.

Ведущая организация: ОАО "Авиадвигатель", г. Пермь

Защита состоится «14» февраля 2012г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195 251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, ауд. 225 главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «13» января 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Талалов В.А.

Актуальность диссертации

Настоящая работа посвящена исследованию на моделях низкоэмиссионной кольцевой камеры сгорания (КС) для ГТУ среднего класса мощности. Создание надёжных, эффективных и экологически совершенных газотурбинных установок является актуальной для современного энергомашиностроения проблемой. Предполагается, что подобные ГТУ в ближайшие годы будут востребованы энергетикой при модернизации и расширении действующих ТЭС, ТЭЦ, создании автономных источников энергоснабжения и др. В этой связи интерес к созданию низкоэмиссионных КС и изучению процессов, протекающих в них, в настоящее время проявляют ведущие фирмы страны: НПО «Теплофизика», ФГУП «ЦИАМ», ОАО «ВТИ», ОАО «НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова», ОАО «Кузнецов», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «А. Люлька - Сатурн», ФГУП ММП «Салют», ОАО «Рыбинские моторы», ФГУП «Завод им. В.Я. Климова», АМНТК «Союз».

Аналитическое описание многосвязного взаимодействия различных по своей природе физических, химико-физических и ряда других процессов, характерных для КС, сопряжено со значительными трудностями. Поэтому, несмотря на многолетние исследования у нас в стране и за рубежом на стадии их проектирования, пока не удаётся избежать многоэтапных стендовых испытаний на моделях. От эффективности таких испытаний, в конечном счете, зависит объём доводочных работ, которые ложатся на заключительный и наиболее ответственный этап – испытание головного образца.

Целью работы является определение алгоритма работы кольцевых камер сгорания энергетических ГТУ, обеспечивающего работоспособность, эксплуатационную надёжность и экологическую безопасность.

Научные задачи исследования:

- Экспериментальное совершенствование алгоритма работы модели обеспечивающего ее оптимальные характеристики на режимах от запуска до номинальной нагрузки.
- Исследование характеристик, определяющих работу модели КС: полноты сгорания топлива; границ бедного срыва; эмиссионных характеристик; температурного состояния стенок модели; полей температур продуктов сгорания; пульсационных характеристик.
- Разработка методики, позволяющей оценить алгоритм работы натурной кольцевой КС на основании ее модельных испытаний.

- Формулирование концепции создания одnogорелочных стендов с жаровой трубой (ЖТ) квадратного поперечного сечения, позволяющих выдерживать натурные теплонапряжения при сохранении близкого к натурному угла раскрытия факела.
- Усовершенствование методики расчета полноты сгорания топлива, обеспечивающей повышение точности ее определения.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- Экспериментально установлен алгоритм работы модели КС, обеспечивающий оптимальные характеристики от запуска до номинальной нагрузки. Полученные данные являются основой для разработки алгоритмов работы кольцевых КС.
- Исследованы основные характеристики работы модели КС на режимах от розжига до номинальной нагрузки.
- Разработана методика, позволяющая оценить алгоритм работы натурной кольцевой КС на основании ее модельных испытаний.
- Предложена новая концепция создания одnogорелочных стендов, позволяющих выдерживать натурные теплонапряжения при сохранении близкого к натурному угла раскрытия факела.
- Предложена уточненная методика расчета полноты сгорания топлива, учитывающая образование оксидов азота, компонентов природного газа и воздуха.

Практическая ценность:

- Экспериментально установленный алгоритм и характеристики работы модели КС позволяют сократить объем работ при проектировании и доводке кольцевых КС ГТУ.
- Методика оценки алгоритма работы натурной кольцевой КС на основании ее модельных испытаний позволяет уменьшить количество доводочных экспериментальных работ.
- Новая концепция создания одnogорелочных стендов позволяет выдерживать натурные теплонапряжения при сохранении близкого к натурному угла раскрытия факела.
- Методика расчета полноты сгорания топлива позволяет с большей точностью оценивать качество работы КС.

Достоверность результатов работы обеспечиваются:

- комплексным расчетно-экспериментальным подходом при решении задач;
- сходимостью результатов расчетных и экспериментальных исследований;
- сравнением результатов исследований с данными других авторов;

- экспериментальной проверкой рекомендаций, выработанных на основе теоретических предпосылок;
- использованием приборов, прошедших государственную поверку, и аттестованных методов измерения.

Личный вклад автора заключается в том, что им принято активное участие в проведении экспериментальных исследований и расчетов. Автором непосредственно выполнены: обработка, анализ и обобщение полученных результатов; разработка методики оценки алгоритма работы натуральных кольцевых КС; разработка новой концепции одnogорелочных стендов; усовершенствование методики определения полноты сгорания топлива.

Апробация основных положений работы. Основные результаты работы доложены и обсуждались на: LVII научно-технической сессии РАН по проблемам газовых турбин (г. Уфа, 2010 г.), конференциях молодых специалистов СКБГТ и ПГУ (г. Санкт-Петербург, 2009, 2010 г.), I конференции молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силловые машины» (г. Санкт-Петербург 2010 г.), на научных семинарах кафедры «Промышленная теплоэнергетика» и кафедры «Турбомашины и комбинированные турбоустановки» СПбГПУ.

Публикация материалов работы: опубликованы четыре статьи, в том числе одна в реферируемых изданиях согласно перечню ВАК.

Автор защищает разработанные в диссертации:

- Результаты комплексных экспериментальных исследований работы модели кольцевой КС ГТЭ-65 на режимах от розжига до номинальной нагрузки.
- Методику оценки алгоритма работы натурной кольцевой КС на основании ее модельных испытаний.
- Новый облик одnogорелочных стендов, позволяющих выдерживать натурные теплонпряжения при сохранении близких к натурным углов раскрытия факела.
- Уточненную методику расчета полноты сгорания топлива.

Реализация результатов работы. Материалы настоящей работы использовались ОАО «Силловые Машины» «ЛМЗ» при совершенствовании алгоритмов запуска камеры сгорания ГТЭ-65 от розжига до номинальной нагрузки.

Предложенная методика расчета полноты сгорания топлива использовалась при проведении расчетов на ОАО «Силловые Машины» «ЛМЗ», а также в качестве учебных материалов в СПбГПУ по курсу «Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из четырех глав основного текста, изложенного на 118 стр., 39 рисунков и 23 таблиц; списка литературы, содержащего 115 наименований, в том числе 24 зарубежных публикаций; приложений, в которых дана сводка основных экспериментальных данных, сведения о стендовом оборудовании и использованных приборах для экспериментальных исследований, а также данные об апробации работы и внедрении её результатов.

Содержание работы

В первой главе сделан обзор основных конструктивных типов камер сгорания ГТУ, рассмотрены принципы организации рабочего процесса в камерах сгорания, способы его моделирования в стендовых условиях, а также пути совершенствования этих способов. Дан анализ методов сжигания топлива и определения полноты его сгорания. Перечислены наиболее перспективные методы сжигания топлива и пути их дальнейшего совершенствования. Показано, что существующие методики определения полноты сгорания топлива могут быть уточнены по нескольким параметрам. Проанализированы некоторые результаты стендовых исследований КС ГТУ, выполненных как отечественными, так и зарубежными фирмами.

Вторая глава посвящена формулированию концепции создания одnogорелочных стендов с ЖТ квадратного поперечного сечения, позволяющих выдерживать натурные теплонапряжения при сохранении близкого к натурному угла раскрытия факела. Известно, что площадь поперечного сечения ЖТ стенда для сохранения натурального теплонапряженного состояния рекомендуется выбирать равной площади ЖТ натурной КС, деленной на число горелочных устройств (ГУ). Однако в этом случае, как показано ниже, возможно прилипание факела пламени к стенкам ЖТ из-за значительного увеличения угла раскрытия факела пламени по сравнению с натурными условиями. Это приведет к нарушению структуры зоны горения (ЗГ) и местному перегреву стенок ЖТ. Сечение ЖТ, при котором происходит прилипание потока к ее стенкам, назовем критическим сечением.

Устранить эффект прилипания факела можно путем увеличения площади поперечного сечения ЖТ, но это приведет к снижению теплонапряжения. Таким образом, возникает необходимость уйти от прилипания факела без увеличения площади поперечного сечения ЖТ. Для этого в данной главе предлагается применить ЖТ одnogорелочного стенда с квадратным поперечным сечением. При этом его площадь для сохранения теплонапряжения остается равной площади круглого сечения. Целью данной главы стало экспериментально-расчетная проверка эффективности применения квадратного поперечного сечения ЖТ.

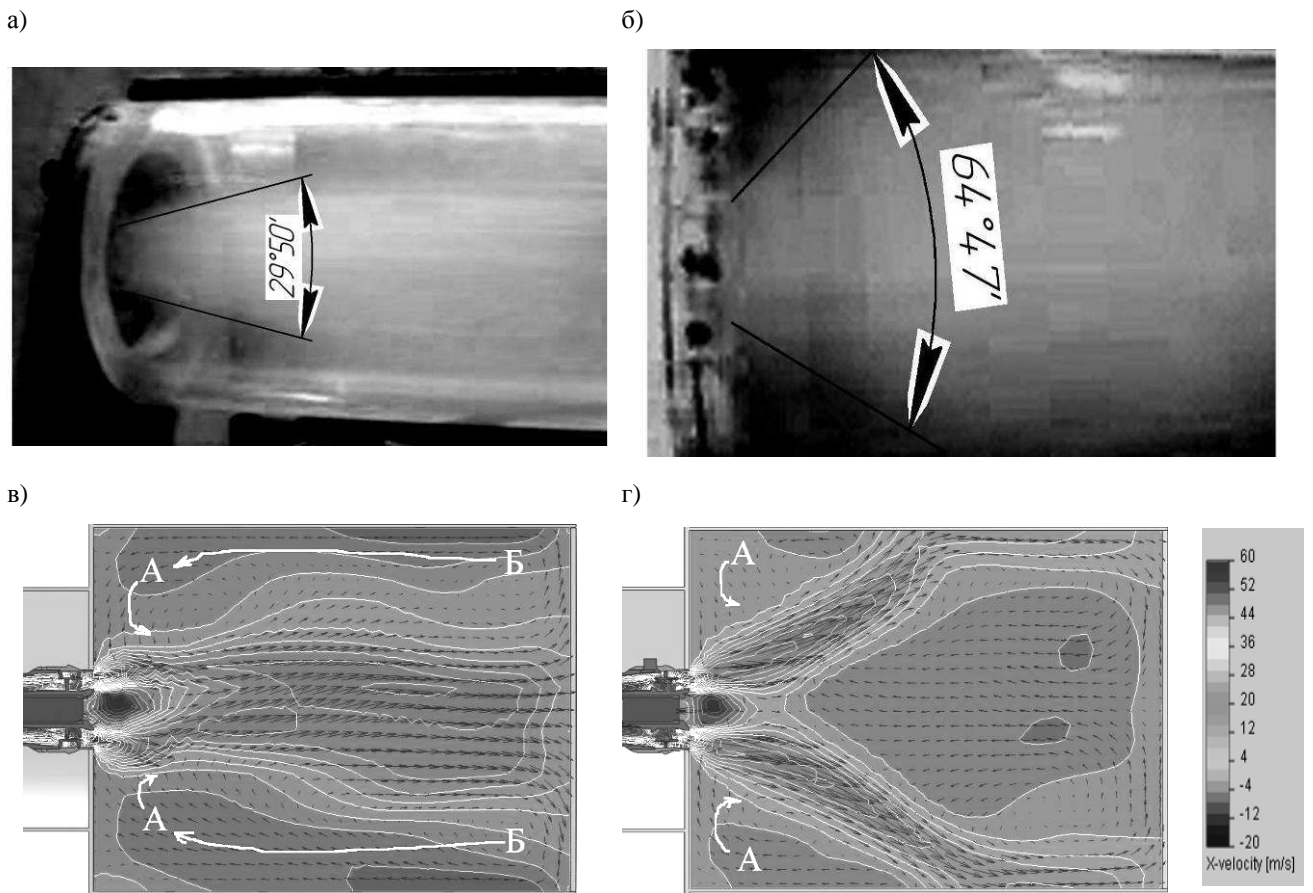


Рис. 1. Сопоставление фотоснимков и расчетных эпюр векторов осевых скоростей потока в трубах с докритическим (а, в) и критическим сечениями (б, г)

Задача решена путем расчетно-экспериментального исследования течения закрученного потока воздуха за ГУ в имитаторах жаровых труб (ИЖТ) с круглым и квадратным сечениями различных площадей. Явление прилипания потока проиллюстрировано на рис. 1. Из приведенных на рисунке фотографий и эпюр видно, что прилипания потока к стенкам ИЖТ приводит к увеличению угла раскрытия потока примерно в 2 раза. Исследования показали, что в основе данного эффекта лежит нарушение циркуляции воздуха из зоны Б в зону А, вызванное уменьшением площади ЖТ.

В результате экспериментальных и расчетных исследований ЖТ девяти различных площадей установлено, что критическая площадь ЖТ с квадратным сечением значительно меньше, чем с круглым. Данный результат объясняется большей устойчивостью зон рециркуляции в углах квадрата, по сравнению с кругом. Применение ЖТ квадратного поперечного сечения является эффективным способом сохранения близкого к натурному угла раскрытия факела при поддержании натуральных теплонапряжений.

Третья глава содержит уточненную методику расчета полноты сгорания топлива (η_z). В главе 1 показано, что существующие методики определения полноты сгорания топлива требуют уточнения по ряду параметров, а именно: влиянию осушки пробы;

учету точного состава природного газа и воздуха; учету эндотермической реакции образования оксидов азота NO_x ; использованию в расчете молярной массы продуктов сгорания, а не воздуха. В этой связи нами разработана и использована в ходе огневых испытаний КС уточненная методика, согласно которой полнота сгорания топлива определяется из соотношения:

$$\eta_z = Q_{\text{gef}} / Q_n, \quad (3.1)$$

где Q_n – теплота сгорания топлива по сертификату; Q_{gef} – фактическая теплота сгорания топлива:

$$Q_{\text{gef}} = Q_n - G_{\text{CH}_4} \cdot Q_{\text{CH}_4} - G_{\text{CO}} \cdot Q_{\text{CO}} - G_{\text{NO}_x} \cdot Q_{\text{NO}_x}, \quad (3.2)$$

где G_{CH_4} , G_{CO} , G_{NO_x} – массы компонентов CH_4 , CO и NO_x в продуктах сгорания на 1 кг топлива соответственно; Q_{CH_4} , Q_{CO} – теплоты сгорания CH_4 и CO соответственно; Q_{NO_x} – теплота, затрачиваемая на образование 1 килограмма NO_x . Формула учитывает образование оксидов азота.

Массовые значения G_{CH_4} , G_{CO} , G_{NO_x} определяются из объемных. Например, для G_{CH_4} :

$$G_{\text{CH}_4} = g_{\text{CH}_4} \cdot G_{\text{mix}}, \quad (3.3)$$

где g_{CH_4} – массовая доля метана CH_4 в продуктах сгорания, полученная пересчетом из объемных долей, измеренных газоанализатором; а)

$G_{\text{mix}} = 1 + \alpha_{\Sigma} \cdot L_o$ – массовый расход газовойоздушной смеси на 1 кг топлива; L_o – стехиометрический коэффициент для природного газа; α_{Σ} – суммарный коэффициент избытка воздуха. Пересчет учитывает осушку пробы; все компоненты природного газа и воздуха; молярную массу продуктов сгорания, а не воздуха.

Погрешность полноты сгорания топлива, полученная в соответствии с методикой определения погрешностей косвенных измерений составила $\varepsilon_{\eta} = 0,013 \%$. Полученный результат позволяет сделать вывод, что точность методики достаточна для достоверной оценки полноты сгорания топлива на режимах работы ГТУ, близких к номинальному.

В четвертой главе представлены результаты

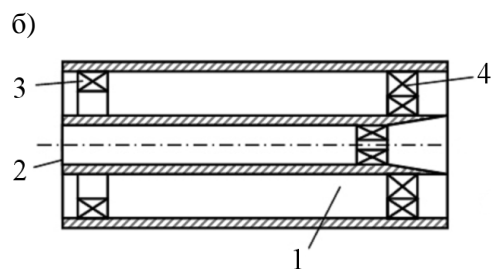


Рис. 2. Общий вид модели КС (а) и схема ГУ (б)

испытаний ГУ на одnogорелочном стенде (ОС), модели КС ГТЭ-65 на стенде огневых испытаний и их анализ.

Стендовые испытания проведены на испытательной станции камер сгорания ОАО «Силловые машины»-«ЛМЗ». На ОС проведены холодные продувки и огневые испытания. При холодных продувках определены расходные характеристики ГУ и исследована структура потока за ГУ. В ходе огневых испытаний отработан режим розжига ГУ, оценено влияние контуров ГУ на устойчивость горения и эмиссию вредных выбросов. На стенде огневых испытаний исследована модель КС для уточнения алгоритма работы натурной КС.

Исследуемая модель КС, фотография которой приведена на рис. 2, а, представляет собой сегмент, составляющий 1/12 часть натурной кольцевой КС ГТУ, и состоит из воздухоохлаждаемых фрагментов фронтальной плиты, ЖТ, газосборника, боковых воздухоохлаждаемых стенок и байпаса, обеспечивающего перепуск до 30 % воздуха на режимах запуска и частичных нагрузок. На фронтальной плите установлены в два ряда десять ГУ по пять в каждом, дежурная форсунка (ДФ) и воспламенитель. Горелочные устройства 2-го ряда, полученные моделированием ГУ 1-го ряда, имеют расходные характеристики почти в 2 раза превышающие эти показатели для 1-го ряда.

Горелочное устройство, схема которого приведена на рис. 2, б, представляет собой двухконтурную конструкцию. В гомогенном контуре (1) обеспечивается перемешивание и подача в ЗГ обедненной топливовоздушной смеси (ТВС). Диффузионный контур (2) предназначен для поддержания устойчивого горения путем подачи обогащенной ТВС с низкой степенью перемешивания. Передний и задний регистры (3, 4) обеспечивают необходимую закрутку ТВС.

Одnogорелочный стенд, на котором проведены испытания ГУ имеет параметры

сред: воздух с расходом до 1 кг/с, давлением до 0,16 МПа и температурой до 40 °С; газообразное топливо – с давлением до 0,6 МПа. Схема установки ГУ (4) на имитаторе фронтальной плиты (5) и измерительной оснастки внутри рабочего отсека

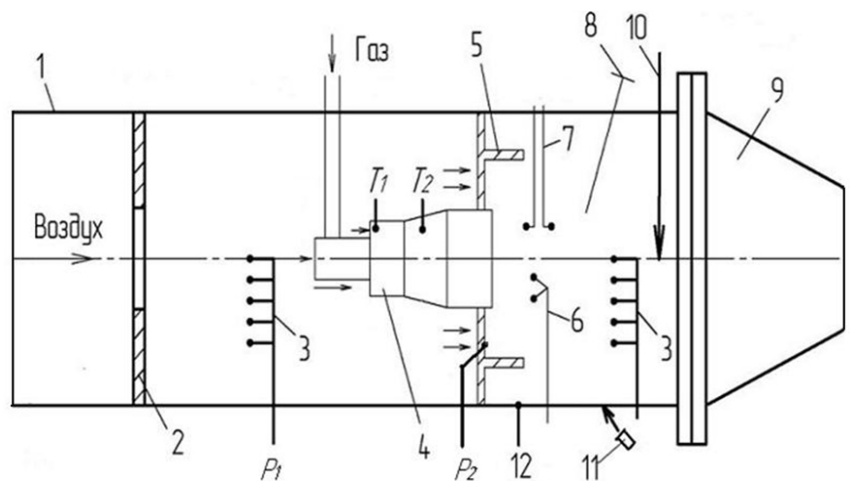


Рис. 3. Одnogорелочный стенд

(1) представлена на рис. 3. Измерение расхода воздуха осуществлено с помощью мер-

ной диафрагмы (2). Потери полного давления на ГУ оценивались по показаниям 5-ти точечных гребенок полного давления (3). Необходимые режимы выставлены с помощью сменных сопел (9) подачей в них подпирающего воздуха. Зажигание ГУ осуществлено при помощи воспламенителя (8). Приведенная скорость потока (λ) на выходе из ГУ определена по давлениям перед (P_1) и за ГУ (P_2). Исследование структуры потока за ГУ осуществлено по характеру изменения скоростей потока и углов его закрутки по высоте выходного сечения ГУ. Эти параметры рассчитаны по полным и статическим давлениям, измеренным с помощью T-образного зонда (7) и двухточечного углового зонда (6), которые перемещались по высоте сечения и поворачивались вокруг своих осей. Изображение факела пламени зафиксировано с помощью видеокамеры (11). Пульсация давления измерена с помощью пьезодатчика (12). Зонд (10) обеспечил измерение температуры потока и отбор пробы для измерения концентрации вредных выбросов выхлопных газов. Контроль проскока пламени в гомогенный контур осуществлен с помощью двух малоинерционных термопар (T_1 , T_2), установленных соответственно на входе в канал и внутри него.

Результаты экспериментов на одногорелочном стенде показали, что надежный розжиг ГУ осуществляется при следующих параметрах перед зажиганием: коэффициент избытка воздуха в зоне горения

$\alpha_x=1,7...1,8$, приведенная скорость $\lambda_x=0,35...0,40$, доля диффузионного топлива $\Theta = (10...20) \%$. Розжиг с $\Theta=5 \%$ при тех же α и λ приводит к проскоку пламени в гомогенный контур (рис. 4). Возникновение этого явления диагностируется по резкому увеличению температуры ТВС внутри контура (T_2) и температуры воздуха на его входе (T_1).

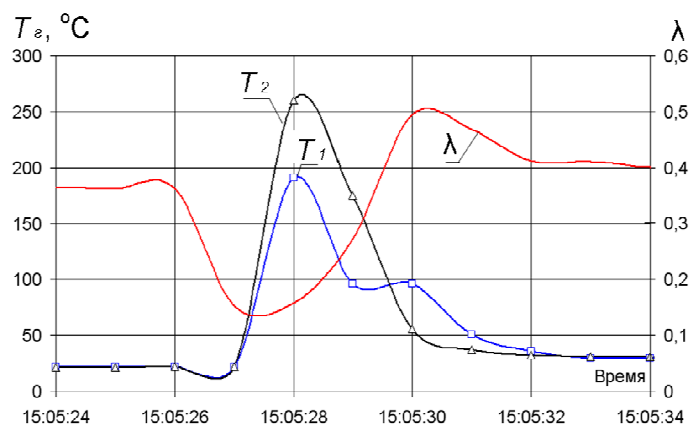


Рис. 4. Проскок пламени в ГУ

После розжига в результате увеличения температуры происходит снижение параметров до $\alpha_e=1,0...1,1$ и $\lambda_e=0,19...0,20$. Впоследствии при испытаниях модели КС значения параметров, установившиеся после розжига, подтвердились. Полученные результаты являются исходными при отработке розжига натурной КС. Индексы «х» и «г» означают момент перед и после розжига соответственно.

Результаты видеонаблюдения за факелом пламени при различных режимах работы ГУ представлены на рис. 5. На режиме стехиометрии и «обедненной» смеси факел представляет собой усеченный конус с ярко выраженными образующими, исходящими

от лобового кольца. При «обогащении» ТВС ярко выраженного конуса уже не наблюдается, и наиболее яркая часть факела удаляется от лобового кольца. С приближением к границе «богатого» срыва происходит изменение формы факела и значительное его удаление от ГУ.

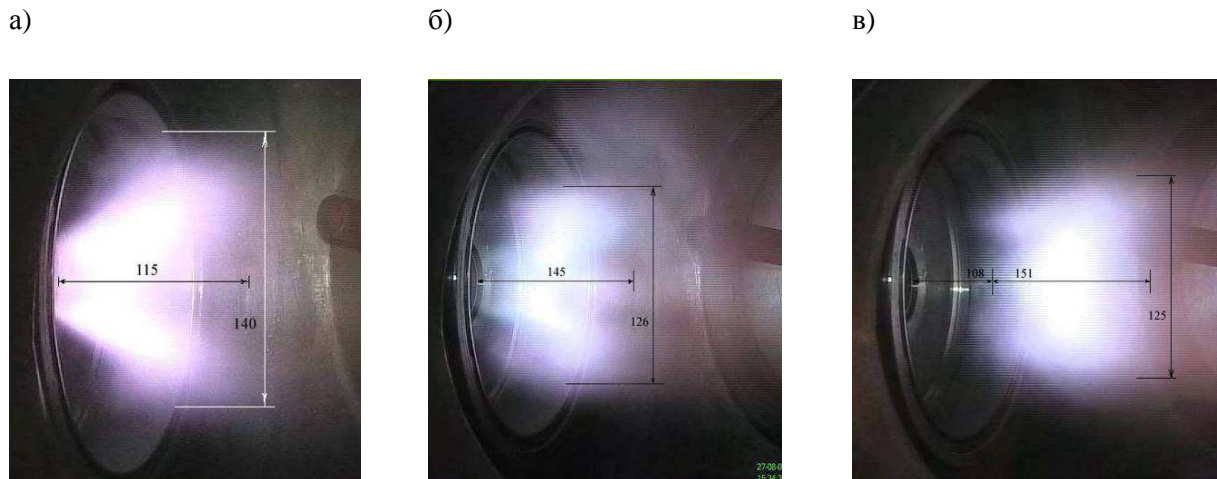


Рис. 5. Факел пламени на режиме: а - стехиометрии и «обедненной» смеси; б - «обогащенной» смеси; в - «богатого» срыва

После розжига осуществлено измерение: полноты сгорания топлива – 99,96 %; пульсаций давления – 1 кПа; потерь полного давления – 3 %; температуры металла фронтальной плиты – 200 °С. Диапазон устойчивой работы ГУ на режиме розжига: $\alpha_2=0,75...1,22$; $\lambda_2=0,18...0,232$. Изменение доли диффузионного топлива с 0 до 20 % приводит к расширению границы устойчивости на 10,9 % и увеличению концентрации оксидов азота в 2,3 раза.

Результаты испытаний по исследованию структуры потока на срезе ГУ представлены на рис. 6. Из приведенных зависимостей следует, что относительная скорость потока (\bar{v}) и угол закрутки (φ) меняют свой знак при относительном радиусе $\bar{R}=0,33$, что указывает на существование зоны обратных токов. Результаты применены для верификации расчетов главы 2.

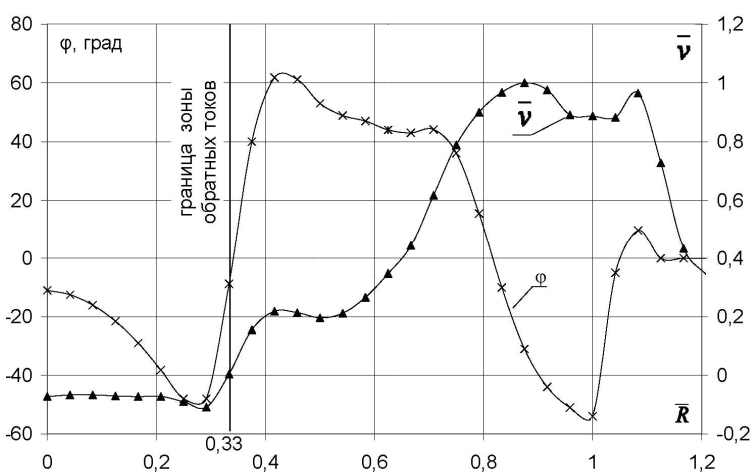


Рис. 6. Изменение относительной скорости потока (\bar{v}^*) и угла закрутки (φ) на срезе ГУ

Стенд огневых испытаний модели КС позволяет испытать модель при натуральных значениях: температуры воздуха на входе в отсек t_0 , приведенной скорости λ , коэффици-

циентов избытка воздуха в зоне горения α и соотношений расходов топлива по контурам ГУ Θ . Схема установки исследуемой модели в испытательном отсеке с указанием основных измеряемых параметров представлена на рис. 7. В процессе испытаний измерены давление, температура и расход воздуха ($P_в$, $t_в$, $G_в$) и расход топлива (G_2) на входе в модель, перепады давления на стенках ЖТ ($\Delta p_{ж.т}$), по которым определяется приведенная скорость λ , температуры стенок модели ($T_м$), температура ТВС внутри ГУ ($T_{пр}$) и воспламенителя (T_z), пульсация давления в ЖТ ($\delta p_{ж.т}$), степень открытия байпаса воздуха за зону горения ϕ .

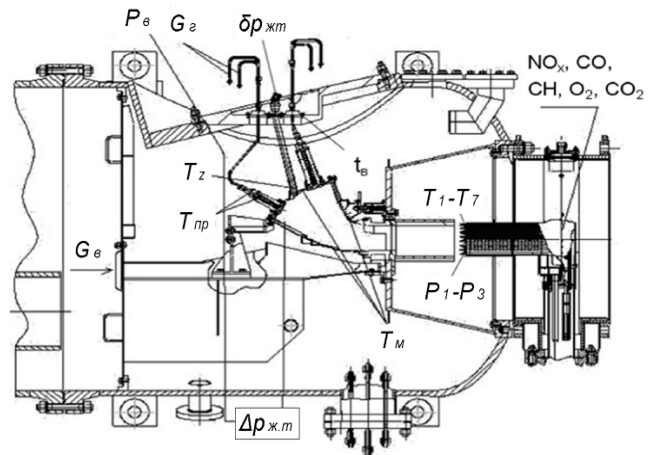


Рис. 7. Схема установки для испытаний модели

Поля температур и концентрации вредных выбросов определены в выходном патрубке модели с помощью поворотной гребенки турели, по высоте которой было расположено семь термопар ($T_1 - T_7$) и три отбора проб вредных выбросов (P_1, P_2, P_3). Температура продуктов сгорания усредняется по гребенке турели (t_2). Полученные пробы после объединения направлены по электрообогреваемой линии в газоанализатор. Измеренные значения концентрации усреднены по выходному сечению модели и приведены к 15 % содержанию кислорода.

Получаемая со всех датчиков информация с помощью автоматической измерительной системы (АИС) записана на электронный носитель. По измеренным значениям температур и давлений с использованием АИС в ходе эксперимента рассчитывались основные безразмерные параметры, по которым задавались необходимые режимы работы модели КС.

Результаты экспериментального определения основных параметров работы модели при нагрузках $N^* = 0, 50$ и 100 % представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры работы модели КС

N^*	$P_в$	$t_в$	$t_{2\text{cp}}$	G_{21}	G_{22}	λ	α_{Σ}	α_1	α_2	Θ_1	Θ_2
%	кПа	°C		г/с		-					%
0	318	335	535	26,3	-	0,235	11,8	1,28	-	24	-
50	414	371	1193	27,2	48,4	0,236	2,66	1,55	1,59	6,2	4
100	422	407	1320	31,7	54,6	0,263	2,33	1,53	1,67	5,1	3

Индексы «1» и «2» относятся к параметрам 1-ого и 2-ого ряда ГУ соответственно. Индекс «ср» - означает осреднение параметра по выходному патрубку.

В результате проведенных экспериментов установлено, что устойчивый розжиг осуществляется при следующих параметрах после розжига: $\alpha_2=0,93$; $\lambda_2=0,186$; $\Theta=28,9\%$. В момент розжига приведенная скорость λ уменьшается на величину $\Delta\lambda=0,073...0,079$, коэффициент избытка воздуха α – на величину $\Delta\alpha=0,32... 0,34$.

В ходе исследований определены границы «бедного» срыва на режимах раскрутки ротора от 42 до 224 сек., холостого хода и работы модели под нагрузкой 10 – 50 % от номинальной. Результаты эксперимента представлены в таблице 2. Индекс «ср» – означает, что параметр записан для момента срыва.

Измеренные концентрации NO_x на режимах от 50 до 100 % номинальной нагрузки после приведения и усреднения по всему сечению составили $60...73 \text{ мг/м}^3$. Для снижения концентрации NO_x исследовано влияние отключения диффузионного контура ГУ при нагрузке 50 %, что привело к значительному снижению концентрации NO_x^* во всему сечению с 60 до 28 мг/м^3 при сохранении устойчивости горения.

Таблица 2
Исходные и срывные коэффициенты избытка воздуха

Режим	Исходные		Срывные	
	α_1	α_2	$\alpha_{1ср}$	$\alpha_{2ср}$
42 сек	1,58	-	1,92	-
101,5 сек	1,79	-	1,97	-
144 сек	1,63	-	1,98	-
224 сек	1,32	-	1,98	-
XX	1,28	-	2,38	-
10%	1,37	1,31	2,08	2,04
20%	1,3	1,25	2,25	1,99
30%	1,43	1,53	1,87	2,36
40%	1,42	1,46	1,98	1,91
50%	1,53	1,55	1,95	1,86

Показатели максимальной окружной и усредненной радиальной неравномерности соответствуют установленным требованиям. В качестве примера они приведены на рис. 8. для режима 100 % нагрузки. Окружные эпюры построены для всех семи сечений в этом направлении, а радиальные - для 3-х сечений, два из которых включают наибольшие по окружности температуры (координаты $-6^0, 4^0$) и третье - наименьшую температуру (координата -2^0).

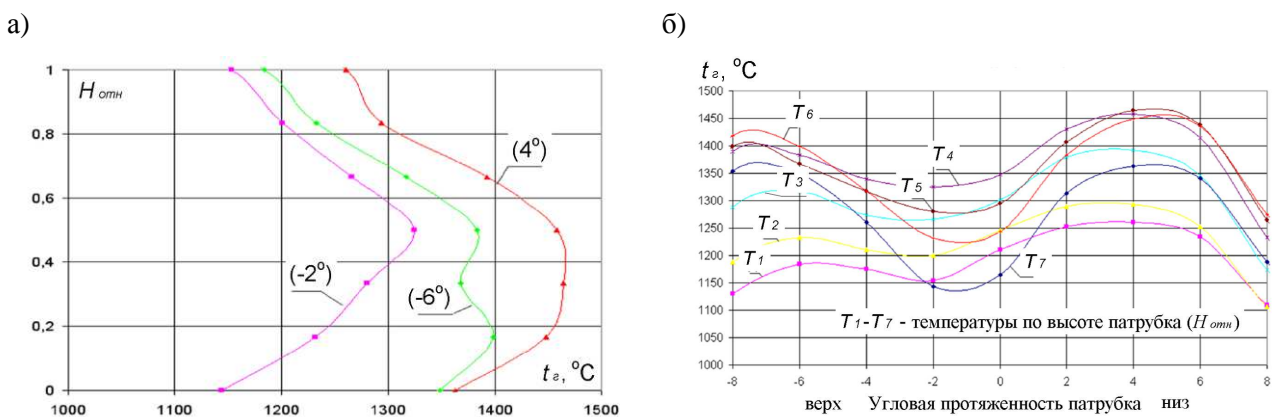


Рис. 8. Радиальные (а) и окружные (б) поля температур продуктов сгорания

Показатели относительной окружной и радиальной неравномерностей:

$$\Theta = (t_{г_max} - t_{г_ср}) / (t_{г_ср} - t_{г}) , \quad (4.1)$$

где t_{2_max} и t_{2_cp} – максимальная и средняя температура продуктов сгорания соответственно. Значения относительной окружной ($\theta_{окр}$) и радиальной ($\theta_{рад}$) неравномерностей для различных режимов работы представлены в таблице 3.

Таблица 3. Относительные окружные и радиальные неравномерности температурных полей продуктов сгорания

N^*		50	60	70	80	90	100
$\theta_{окр}$	%	16,6	9,7	7,7	10,5	11,3	10,1
$\theta_{рад}$		13,4	13,7	13,4	12,5	10,7	9

Проскок пламени в гомогенных контурах ГУ не зафиксирован; максимальный уровень пульсаций давления в ЖТ модели КС зафиксирован на режиме 90 % номинальной нагрузки и составил 0,46 кПа при частоте пульсаций 290 Гц; температуры стенок ЖТ не превышают 625 °С.

Алгоритм работы 1 и 2-го рядов рабочих горелок, их контуров, а также ДФ и байпаса при различных режимах испытаний представлен на рис. 9. На режимах от розжига до XX включительно работает только 1-й ряд ГУ с ДФ, а после этого к нему начинает подключаться группами 2-й ряд ГУ. ДФ работает с момента розжига до режима 40 % нагрузки включительно. Байпас частично открыт на режимах до 80 % нагрузки включительно и полностью закрыт на режимах большей мощности. Доля топлива, поступающего в диффузионные контура ГУ 1-го и 2-го рядов, составляет соответственно 25 % и 14 % на режимах до 40 % нагрузки включительно, и 5 % и 3 % при больших нагрузках. Приведенную скорость λ на всех режимах от розжига до номинальной нагрузки рекомендуется поддерживать в диапазоне от 0,2 до 0,27 путем изменения положения байпаса воздуха за зону горения ϕ . Снижение доли диффузионного топлива в ГУ кольцевой КС можно рекомендовать для уменьшения концентраций NO_x до нормативных значений.

Полученные результаты модельных испытаний КС ГТЭ-65 позволили разработать методику уточнения алгоритма работы (коэффициентов избытка воздуха в зоне горения α и приведенной скорости λ) кольцевой КС. Управление рабочим процессом осуществляется путем применения байпаса воздуха ϕ за ЗГ. Из-за сложности происходящих в КС процессов методика разбита на 3 части: розжиг; режимы от момента розжига до нагрузки 50 % от номинальной; режимы от 50 до 100 % нагрузки.

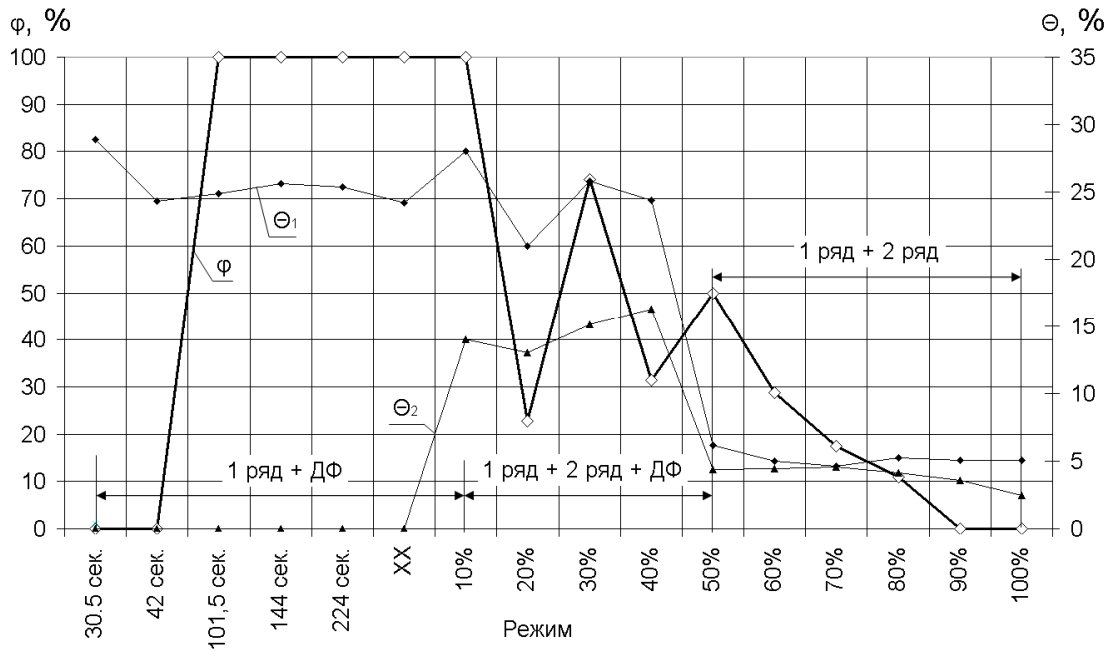


Рис. 9. Алгоритм работы модели КС

Методика для розжига позволяет определить параметры работы модели перед моментом розжига (α_x и λ_x) с учетом их резкого изменения в момент розжига таким образом, чтобы не допустить проскока пламени и срыва потока. В методике используются данные о давлении p_2 и температуре T_2 воздуха за КС перед розжигом, характеристика компрессора, для учета которой введен коэффициент z , а также данные эксперимента на моделях об оптимальных параметрах после розжига (α_2 и λ_2). Соотношения методики выведены с использованием формулы Стодолы-Флюгеля, уравнения неразрывности, уравнения Бернулли и газодинамической функции $q(\lambda)$ – безразмерной плотности тока:

$$q(\lambda_x) = q(\lambda_2) \pi_p \sqrt{\tau_p \cdot \frac{p_{x2}^2 - p_a^2}{\pi_p^2 p_{x2}^2 - p_a^2}}, \quad \alpha_x = \alpha_2 \sqrt{\tau_p \cdot \frac{p_{x2}^2 - p_a^2}{\pi_p^2 p_{x2}^2 - p_a^2}}, \quad \pi_p = 1 + z \left(\frac{\sqrt{\tau_p (p_{x2}^2 - p_a^2)} + p_a^2}{p_{x2}^2} - 1 \right) \quad (4.2)$$

где $\tau_p = T_{22}/T_{x2}$; $\pi_p = p_{22}/p_{x2}$; p_a – атмосферное давление. Проведено сопоставление результатов расчета и эксперимента. Отличие составило 2,6-4,2 % для α и 9,8-10 % для λ .

На режимах от розжига до 50 % нагрузки методика позволяет поддерживать экспериментально определенную оптимальную температуру в зоне горения $t_{32}=1560$ °С. Критерием оптимальности является экспериментально определенный режим с минимальными выбросами NO_x и CO при сохранении устойчивости горения. Искомые величины α_y и λ_y определяются путем решения системы уравнений:

$$t_{32} = (-0,00019816439 \cdot \alpha_y^4 + 0,0049551 \cdot \alpha_y^3 - 0,0478038 \cdot \alpha_y^2 + 0,224835 \cdot \alpha_y + 0,4604964) \cdot (t_6 + 273) + 1,0695565 \cdot \alpha_y^4 - 26,8615665 \cdot \alpha_y^3 + 259,7700927 \cdot \alpha_y^2 - 1215,6692462 \cdot \alpha_y + 2577,74, \quad (4.3)$$

$$q(\lambda_y) = q(\lambda_u) \cdot (\alpha_y / \alpha_u), \quad (4.4)$$

где индекс «и» - исходный режим; «у» - уточненный в соответствии с методикой режим. Уравнение (4.3) предложено КТЭУ для природного газа среднего состава, соотношение (4.4) выведено из уравнения неразрывности и уравнения Бернулли с использованием газодинамической функции $q(\lambda)$.

На режимах нагрузки от 50 до 100 % включительно методика позволяет поддерживать постоянный небольшой запас устойчивости горения с целью снижения выбросов NO_x :

$$\alpha_y = \alpha_{cp} / 1,15, \quad (4.5)$$

где α_{cp} – коэффициент избытка воздуха в зоне горения, при котором происходит «бедный» срыв пламени.

Полученный в ходе исследований массив экспериментальных данных позволил, на основании методов регрессионного анализа, вывести эмпирическую зависимость величины α_{cp} от температуры входящего в КС воздуха T_v , приведенной скорости потока λ , доли диффузионного топлива Θ :

$$\alpha_{cp} = C \cdot \left(\frac{T_g}{T_{gc}} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_c} \right)^{-0,34} \cdot \left(\frac{\Theta + 100}{\Theta_c + 100} \right)^{0,57}, \quad (4.6)$$

где C – константа, зависящая от формы ЖТ и конструкции ГУ; индекс «с» соответствует параметрам, при которых была определена константа C . Определив величину C при наиболее удобных для этого условиях, можно использовать ее для прогнозирования величины α_{cp} в любых других условиях опытов. Для исследованной модели КС на режимах:

- от розжига до 40 % нагрузки: $C=2,2$; $T_{gc}=500$ К; $\lambda_c=0,23$; $\Theta_c=22\%$; ДФ вкл.
- от 50 до 100 % величина $C=2,04$; $T_{gc}=683$ К, $\lambda_c=0,236$; $\Theta_c=5,1$ %; ДФ выкл.

Искомые величины α_y и λ_y на режимах от 50 до 100 % номинальной нагрузки определяются путем решения системы уравнений (4.4 – 4.6).

Выводы

1. Экспериментально усовершенствован алгоритм работы модели, обеспечивающий ее оптимальные характеристики на режимах от розжига до номинальной нагрузки.
2. При исследовании характеристик модели во всем диапазоне ее работы установлено: запасы по срыву более 20 %; эмиссия оксидов азота менее 50 мг/м³; температура стенок жаровой трубы модели менее 800 °С; радиальная неравномерность температурного поля продуктов сгорания не превышает 13,7 %; окружная неравномерность – менее 16,6%; пульсации давления менее 1 %; полнота сгорания топлива более – 0,998.

3. Предложена методика, позволяющая на основании модельных испытаний оценить алгоритм работы натурной кольцевой КС на режимах от розжига до номинальной нагрузки.
4. Экспериментально установлен способ снижения NO_x за счет регулирования распределения топлива по контурам горелочных устройств.
5. Предложена и расчетно-экспериментально проверена концепция применения квадратной формы жаровой трубы одnogорелочных стендов, позволяющая по сравнению с круглым сечением избежать прилипания факела при необходимой площади поперечного сечения. Это позволит выдерживать натурные теплонапряжения при сохранении близкого к натурному угла раскрытия факела.
6. Усовершенствована методика определения полноты сгорания топлива за счет учета: осушки пробы; образования оксидов азота; всех компонентов природного газа и воздуха; молярной массы продуктов сгорания, а не воздуха.

Список публикаций

1. Данилец Л.А. Методика определения полноты сгорания газообразного топлива в газотурбинных установках методом анализа пробы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – Том 2. – С. 27–31.

2. Ведищев А.Ф., Данилец Л.А., Хряков Б.В. Влияние формы жаровой трубы камеры сгорания ГТУ на структуру потока // Газотурбинные технологии. – 2010. – №10. – С. 6–9.

3. Данилец Л.А. Стендовые испытания горелочного устройства камеры сгорания ГТЭ-65 // LVII Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин «Научно-технические проблемы производства и эксплуатации наземных газотурбинных установок»: тезисы докладов, 21-24 сентября 2010 г. – Уфа: ОАО «ВТИ». – С. 141–150.

4. Ведищев А.Ф., Данилец Л.А., Козлов Д.А., Пономарев Н.Н., Снятков Г.Л. Стендовые испытания горелочного устройства камеры сгорания ГТЭ-65 // Газотурбинные технологии. – 2010. – №5. – С. 22–25.