

ТЕПЛОФИЗИКА ВОДОРОД-КИСЛОРОДНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТУРБИН КОМБИНИРОВАННЫХ ПГУ

© 2011 А. И. Гурьянов, Г. Ш. Пиралишвили, И. М. Верещагин

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьёва

Представлены результаты численного моделирования и опытного исследования горения водород-кислородной смеси в закрученном течении перегретого водяного пара в условиях аэродинамического противотока. Выполнены исследования малоразмерной противоточной водород-кислородной камеры сгорания для перспективных энергоустановок парового и комбинированного цикла. Определена геометрия проточной части, обеспечивающая качество смесеобразования, условия стабилизации пламени зоны горения, отсутствие локальных областей перегрева элементов конструкции камеры сгорания, температуру перегретого пара 1300 К и полноту сгорания 99,9%.

Горение, высокотемпературный пар, водород, кислород, стехиометрическая смесь, камера сгорания.

Введение. На российском и мировом рынке энергоносителей рост стоимости углеводородного топлива и требования к экологическим показателям энергетических установок создали условия, вынуждающие внедрять высокоэффективные технологии производства электроэнергии с электрическим КПД 60% и более. Применение энергокомплексов комбинированного цикла, снабженных высокотемпературными газовыми и паровыми турбинами, является возможным решением проблемы. Над практической реализацией этой задачи работают ведущие Российские и зарубежные компании - производители энергетических установок.

Если в газотурбинном цикле возможность повышения температуры газа перед турбиной ограничена рабочим диапазоном применяемых жаростойких сплавов и покрытий, уровнем развития систем охлаждения, жесткими требованиями к эмиссионным характеристикам и составляет величину порядка 1800 К, то в паротурбинном цикле она ограничена значениями 550 – 600°C. Это обусловлено тем, что для получения пара высоких температур использование применяемых теплообменных аппаратов рекуперативного типа неприемлемо, так как возможность перегрева свыше 600°C ограничена проблемами термического разрушения и пережога теплообменных поверхностей. Однако с точки зрения термодинамической эффективности целесообразно увеличивать температуру пара до значений 900 – 1400°C. Возможным решением проблемы является применение теплообменных устройств смешительного типа, работающих по принципу камер сгорания водородного топлива в окис-

лительной смеси кислорода с низкотемпературным водяным паром. Водородная энергетика рассматривается как одно из важнейших приоритетных направлений в научных и технологических исследованиях ведущих стран мира. Среди факторов, определяющих перспективы её развития, важную роль играет стремление к сокращению выбросов парниковых газов, истощение запасов ископаемого жидкого и газообразного углеводородного топлива, тенденции повышения КПД энергоустановок. Выбор водорода в качестве источника энергии объясняется тем, что теплота сгорания водорода наиболее высока, а продуктом полного сгорания в кислороде является вода, которая может вновь вводиться в цикл энергокомплексов, работающих с использованием водорода в качестве топлива.

В работе [1] приведены результаты исследования горелочных устройств с противоточной схемой течения рабочего тела. Они показали ряд преимуществ противотока течения, касающихся интенсификации смесеобразования, охлаждения теплонагруженных поверхностей, ограждающих зону горения, расширения диапазона устойчивой работы по коэффициенту избытка воздуха в области бедных смесей.

Вопрос о возможности и целесообразности применения противоточной схемы течения в камерах сгорания, работающих на стехиометрических водород-кислородных смесях, требует изучения газодинамических и термохимических процессов, определяющих интегральные параметры отмеченных устройств.

Необходимость таких исследований обусловлена существенным различием скорости горения водород-кислородной и углеводород-воздушных смесей, а также характерным временем предпламенных процессов обусловленных разницей термодинамических параметров ГТУ и ПГУ (в первую очередь величины полного давления в камере сгорания, которая в ГТУ составляет ~2-4 МПа, а для перспективных ПТУ и парового цикла ПГУ достигает значений ~15-30 МПа).

Организация рабочего процесса противоточной водород-кислородной камеры сгорания. Проводя аналогию подходов к принципам организации рабочего процесса углеводород-воздушных и водород-кислородных камер сгорания, следует отметить, что применение «классического» механизма диффузионного горения в объеме первичной зоны реакции с раздельной подачей компонентов, обуславливающего ряд проблем с эмиссионными характеристиками при горении ископаемого топлива, определяет проблемы и в случае использования водород-кислородных смесей. Основная из них – проблема охлаждения теплонапряженных элементов горелочного устройства – связана с тем, что адиабатная температура горения водорода в кислороде при их стехиометрическом соотношении составляет 3600 – 3800 К. Если при горении углеводородного топлива в кислороде воздуха снижение локальных температур в зоне реакции возможно за счет перехода в нестехиометрическую «бедную» область работы по составу топливоздушной смеси, в случае горения водорода в кислороде необходимо обеспечить их строго стехиометрическое $\alpha=1$ соотношение и полноту сгорания выше 99,9%, так как наличие в продукте сгорания неконденсирующихся газов, как водорода, так и кислорода, недопустимо по соображениям безопасности.

Предлагаемая возможность решения отмеченных проблем связана с применением схем предварительного смешения кислорода с низкотемпературным водяным паром, являющимся инертной примесью, присутствующей в зоне горения, не участвующей в реакции и снижающей адиабатную температуру горения без изменения стехиометрического соотношения водорода и кислорода. Интенсификация теплообменных про-

цессов и реакций горения в зоне реакции возможна за счет применения противоточной схемы движения пара и парокислородной смеси.

Изучение условий стабилизации пламени и охлаждения элементов камеры сгорания потребовало проведения цикла расчётно-экспериментальных исследований, начальным этапом которых, согласно принятому в международной практике двигателестроения подходу, является отработка геометрии и режимных характеристик при давлении близком к атмосферному с последующим выходом на рабочие давления камеры сгорания в составе энергетической установки.

В предлагаемой статье приведены результаты численного моделирования и физического эксперимента малоразмерной противоточной водород-кислородной камеры сгорания при давлении 0,1 МПа с использованием предварительного перемешивания водород-кислородной смеси.

Численное моделирование аэродинамики водород-кислородной камеры сгорания. Геометрическая модель исследуемого устройства представлена на рис. 1. При проектировании высокотемпературных камер сгорания для паровых турбин одной из основных является задача организации условий протекания процессов смесеобразования и горения с учетом требований по минимизации потерь полного давления, повышения полноты сгорания. Отмеченные процессы противоречат друг другу, так как для увеличения качества смесеобразования требуется увеличение пространственных размеров зоны смешения и турбулизации потока за счет закрутки, а снижение потерь давления требует уменьшения линейных размеров проточной части и интенсивности закрутки течения. Аналитические методы расчета параметров рабочего процесса пароперегревателей не позволяют построить методику нахождения разумного компромисса между отмеченными факторами. Построенная расчётная сетка модели проточной части является многоблочной. Каждый блок имеет регулярную структуру, состоящую из гексагональных элементов со сгущением вблизи областей вдува водородных и кислородных струй, а также значительных градиентов термогазодинамических параметров потока пара.

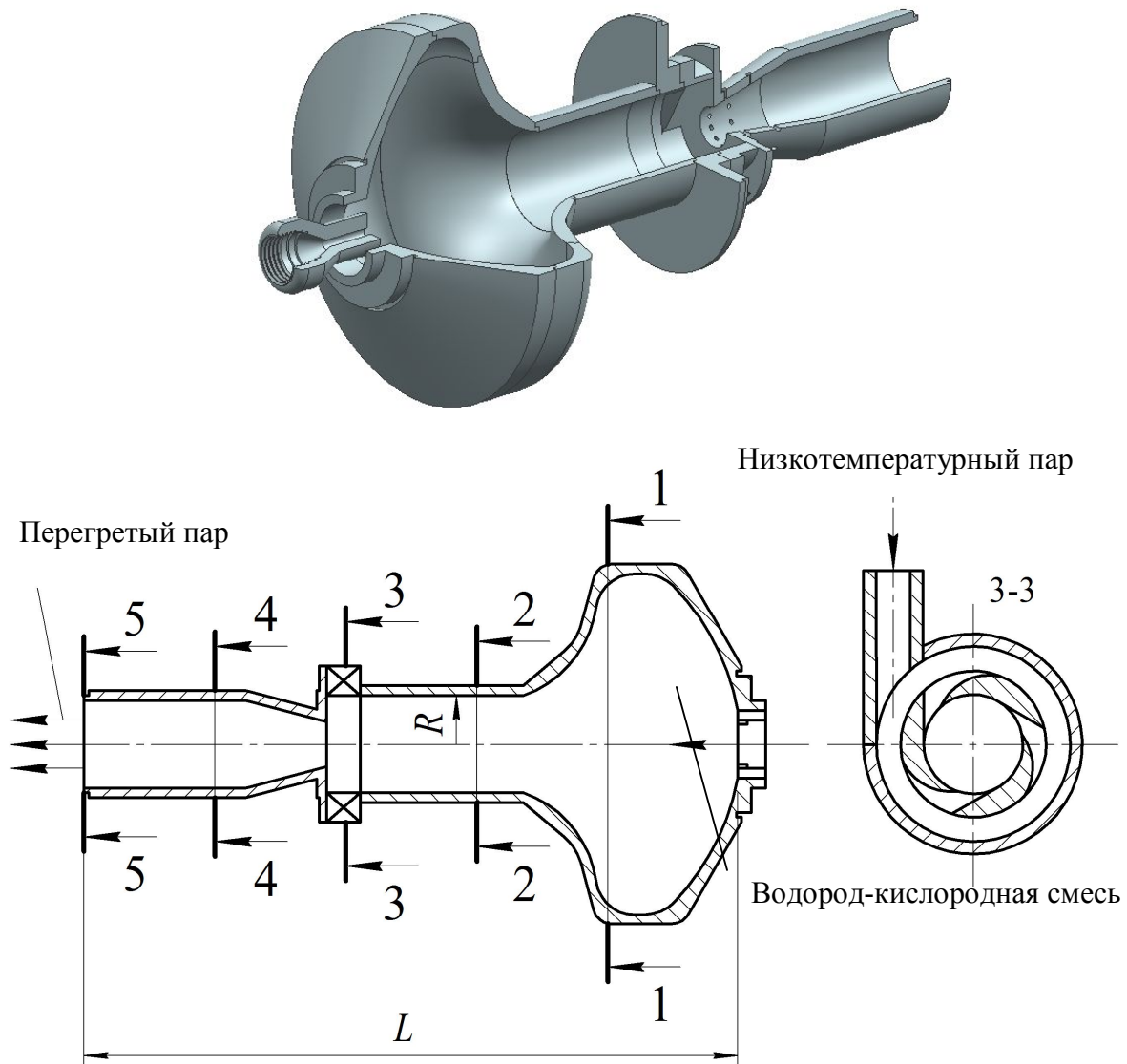


Рис. 1. Геометрическая модель малоразмерной противоточной водород-кислородной камеры сгорания

Численное моделирование термогазодинамики выполнено с использованием системы уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу в стационарной постановке.

Моделирование турбулентного переноса осуществлялось с помощью двухпараметрической $k-\epsilon$ модели. Граничные условия задавались в виде условий Стокса и адиабатности стенок. В качестве начальных условий считались известными температуры на входе в камеру сгорания, а также массовые расходы водорода, кислорода и пара, определяющие требуемые значения коэффициента избытка окислителя в зоне горения.

На рис. 2 показаны поле полной скорости и визуализация линий тока в зоне горения малоразмерной камеры сгорания. Видно,

что на участке смешения за закручивающим устройством, направляющим водяной пар в зону горения водород-кислородной смеси, происходит безотрывной разгон потока с максимумом скорости в области диафрагмированного выходного сечения.

Величина скорости в этой зоне составляет ~ 300 м/с. Газодинамика течения позволяет организовать эффективное смешение потока низкотемпературного пара с горящим водород-кислородным факелом. Диаметр диафрагмированного выходного сечения подобран таким образом, что в проточной части образуется приосевая зона возвратных течений. Уровень скоростей в закручивающем устройстве составляет величину порядка 90 м/с.

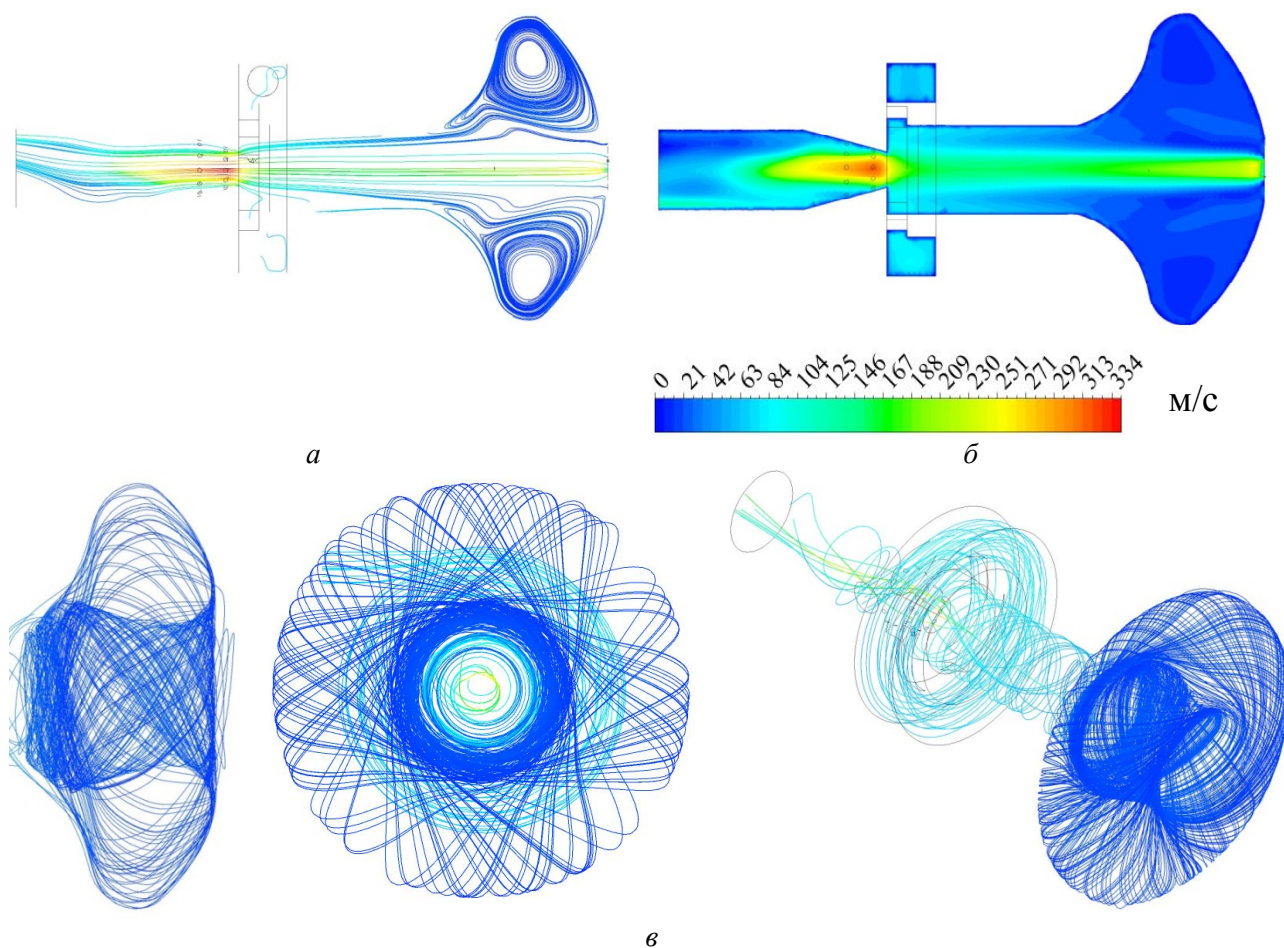


Рис. 2. Осевая проекция линий тока в проточной части (а), поле скоростей (б) и линии тока (в)

Результаты численного моделирования позволили снизить уровень гидравлических потерь в камере сгорания за счет оптимизации геометрии области плавного расширения потока в торцевой части камеры сгорания вблизи водород-кислородной форсунки. Видно, что на периферии в зоне расширения проточной части образуется устойчивая торoidalная вихревая структура, обеспечивающая конвективное охлаждение зоны горения и эффективное смешение парового потока и водород-кислородного факела. На её границах осевая компонента вектора скорости течения меняет направление, переходя через нулевое значение, вблизи которого существует геометрическое место точек, характеризующихся равенством скорости потока топливовоздушной смеси и скорости турбулентного горения. Это является необходимым и достаточным условием обеспечения квазистационарного положения турбулентного фронта волны реакции горения.

Анализ результатов численного расчета позволил внести уточняющие коррективы в решение задачи профилирования геометрии

проточной части малоразмерной камеры сгорания с учетом требований по минимуму гидрпотерь, устойчивости процесса горения и охлаждения стенок, ограничивающих зону горения.

На рис. 3 показано радиальное распределение температуры в проточной части камеры сгорания на различном удалении от среза сопла водород-кислородной форсунки. Видно, что максимальная относительная температура на стенке достигает значения 3,47 в выходном сечении камеры сгорания, в то время как на стенках вихревой камеры, охлаждаемой периферийным закрученным потоком водяного пара, её максимальное значение не превышает величины 1,5 (рис. 3, а) на расстоянии 1,3 калибра от сечения соплового ввода. Полученные результаты подтвердили необходимость разработки системы охлаждения выходного сопла, реализованной в экспериментальной модели камеры сгорания. Охлаждение стенок вихревой камеры обеспечивается за счёт аэродинамического противотока течения.

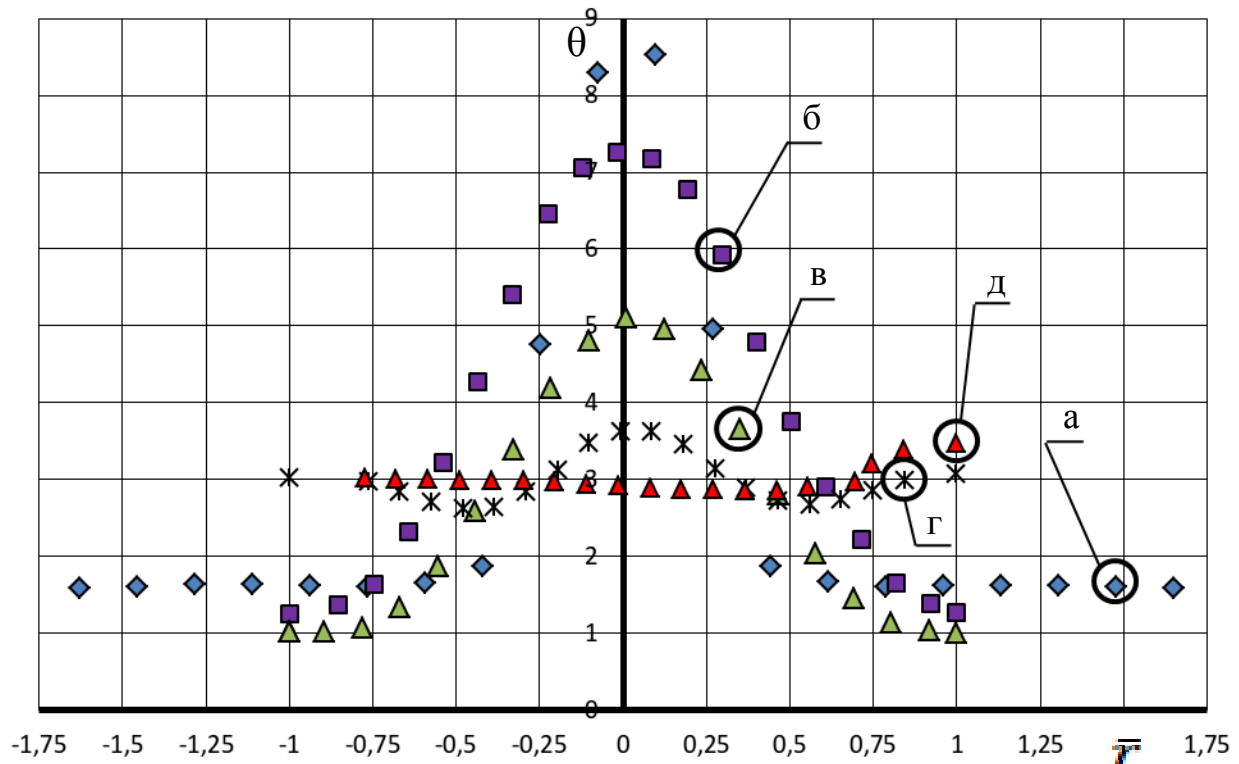


Рис. 3. Радиальное распределение температуры в проточной части камеры сгорания на различном удалении от среза сопла водород-кислородной форсунки:

а сечение 1-1; б - сечение 2-2; в - сечение 3-3; г - сечение 4-4; д - выходное сопло.

$\bar{r} = r_i/R$, $\theta = T_i/T_{i, \max}$, где T_i — температура в сечении на расстоянии r_i от оси трубы

Вид кривой «д» на рис. 3 показывает, что профиль температуры в выходном сечении имеет несимметричный относительно оси камеры сгорания вид. Это обусловлено влиянием геометрии канала подвода низкотемпературного водяного пара, распределяемого от одного тангенциального патрубка через трёхзаходное закручивающее устройство.

Сравнительные результаты определения полноты сгорания по длине камеры в случае противоточной и проточной схем течения с закруткой тока показаны на рис. 4. Видно, что применение противотока позволяет получить полноту сгорания в выходном сечении 99,99%, в то время как проточная схема даёт 99,30%. В результате формирования развитого тороидального вихря в торцевой части камеры сгорания и интенсификации массообменных процессов полнота сгорания в противотоке на расстоянии 1,35 калибров от среза сопла форсунки достигает значений 99,5%, в то время как в проточном закрученном течении на 2,6% меньше.

Это позволяет сделать вывод, что с точки зрения длины полного выгорания противоточная схема обладает преимуществом.

Как показали экспериментальные исследования, режим истечения струи водород-кислородной смеси оказывает существенное влияние на длину зоны горения. Оценка этой величины достаточно важна с точки зрения организации тепловой защиты внутренних поверхностей пароперегревателя, ограничивающих первичную зону горения, а также с позиции тепло- и массообмена высокотемпературного факела с закрученным потоком пара. Экспериментально измеренные значения длины зоны горения водород-кислородного факела в зависимости от числа Рейнольдса в выходном сечении сопла форсунки показаны на рис. 5. Видно, что эти зависимости имеют экстремальный характер с максимумами в области значений Re , соответствующих переходному режиму истечения. Полученные результаты согласуются с известными данными.

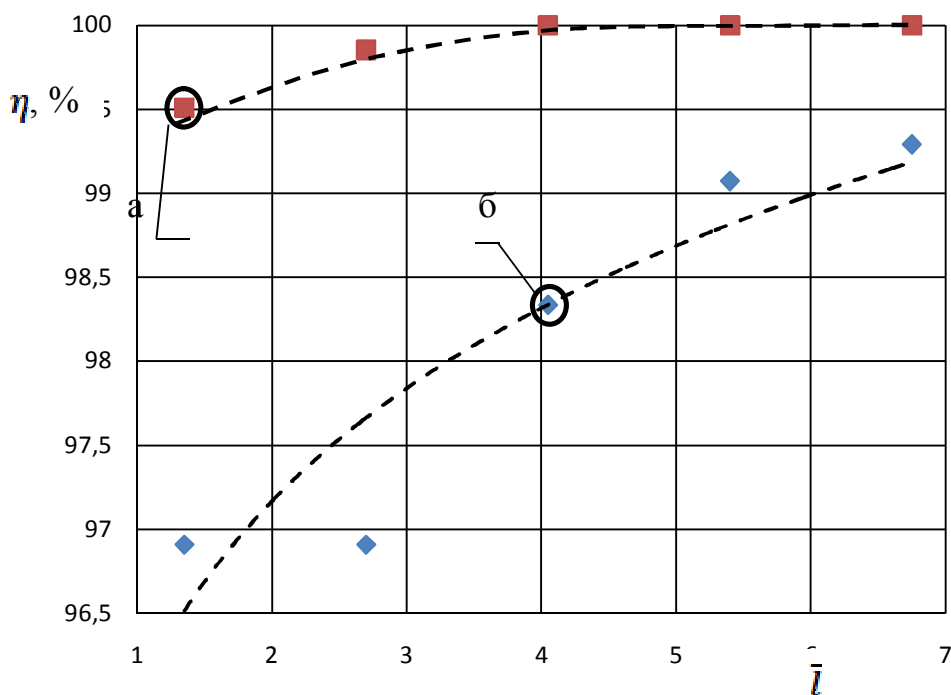


Рис. 4. Полнота сгорания водорода для противоточной (а) и прямоточной (б) камеры сгорания

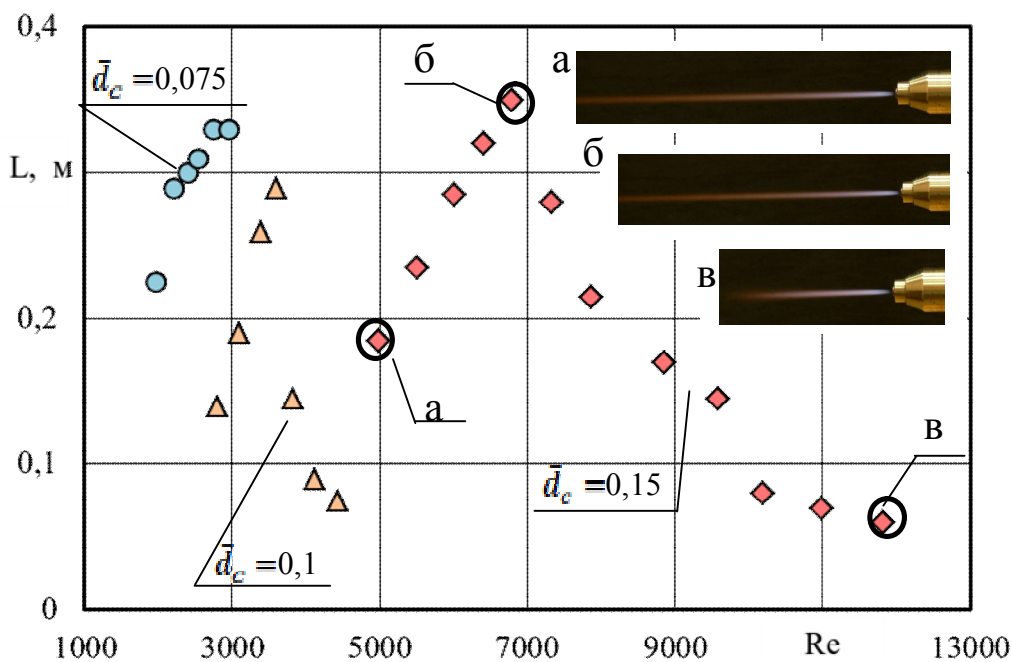


Рис. 5. Зависимость длины зоны горения водород-кислородного факела от различных режимов истечения горючей смеси для форсунок с различными относительными диаметрами

$$\bar{d}_c = d_{\phi} / (2 \cdot R), \text{ где } d_{\phi} - \text{ диаметр сопла форсунки}$$

Одной из основных характеристик камеры сгорания для использования в циклах высокотемпературных паровых турбин для комбинированных энергетических установок является температура перегретого пара на выходе, а также возможность ее динамического регулирования в зависимости от типа турбины, ее мощности и термодинамических

параметров цикла. Выполненные опытные исследования малоразмерной противоточной камеры сгорания позволили определить абсолютную величину температуры перегрева пара $\Delta T_{\text{п}}^*$ в зависимости от его относительного расхода и тепловой мощности. Результаты приведены на рис. 6.

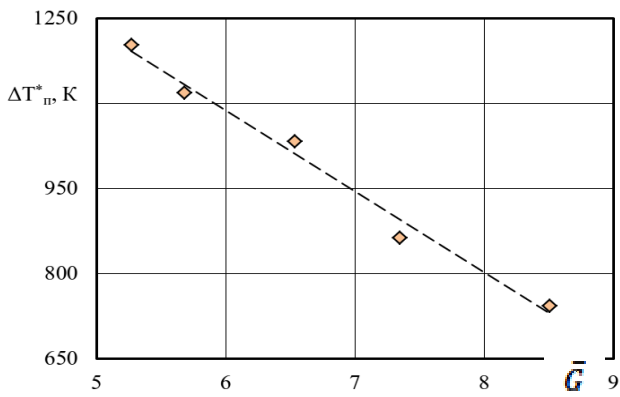


Рис. 6. Зависимость абсолютной величины температуры перегрева пара от его относительного расхода. $\bar{G} = G_{II} / G_{см.}$, где G_{II} – расход пара, $G_{см.}$ – расход водород-кислородной смеси;

$$\Delta T_{II}^* = T - T_{п.вх.}^*$$

где $T_{п.вх.}^*$ – температура пара на входе в камеру сгорания

С уменьшением относительного расхода перегреваемого пара величина температуры перегрева возрастает по закону близкому к линейному.

Важным требованием, предъявляемым к камерам сгорания любого типа, в том числе, и водород-кислородным, является равномерность поля термогазодинамических параметров в выходном сечении, которая оказывает существенное влияние на тепловое состояние лопаток высокотемпературной ступени турбины и их ресурс. Результаты экспериментального исследования радиального распределения температуры в выходном сечении противоточной камеры сгорания представлены на рис. 7.

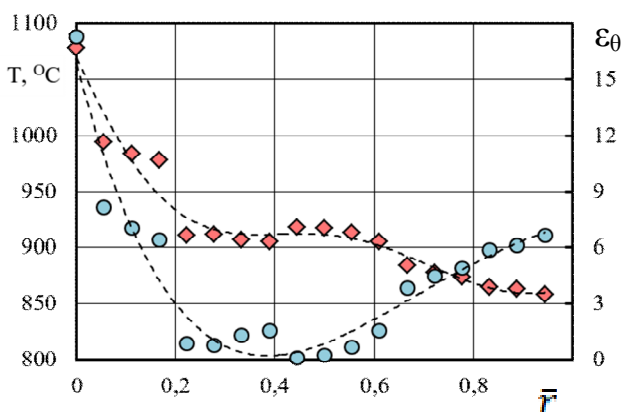


Рис. 7. Распределение температуры перегретого пара и относительного коэффициента неравномерности температуры в выходном сечении пароперегревателя

Видно, что максимум температуры находится на оси струи перегретого пара, а минимум на стенках выходного сопла. Анализ

приведенной зависимости позволяет выделить вблизи оси потока область относительно высоких значений температуры, которая по-видимому, связана с наличием центрального ядра струи, радиус которого, очевидно, связан со значением относительного радиуса выходного сопла диафрагмы. Достаточно большая неравномерность поля температур на выходе обусловлена малой тепловой мощностью пароперегревателя, поскольку существенное влияние оказывают потери тепла в окружающую среду, приводящие к охлаждению периферийного потока перегретого пара в выходном сечении сопла. Как показывают результаты физического эксперимента, подобный масштабный эффект наблюдается при опытных исследованиях камер сгорания различного назначения, работающих на жидком и газообразном топливах. Однозначное решение проблемы возможно лишь при исследовании пароперегревателей с более высокой тепловой мощностью, что является предметом дальнейших исследований.

Вывод. Организация горения стехиометрической водород-кислородной смеси в инертной среде водяного пара в условиях аэродинамического противотока течения позволяет организовать естественное конвективное охлаждение камеры сгорания с максимальным значением $\theta = 1,5$ на стенке жаровой трубы.

Применение противотока позволяет получить полноту сгорания на выходе 99,9%, в то время как прямоточная схема движения закрученного потока даёт 99,3%. Среднемассовая температура перегретого пара составляет 1300К.

Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. Пиралишвили Ш.А.

Библиографический список

- 1 Вихревые горелочные устройства [Текст] / А.И. Гурьянов, О.В. Казанцева, М.В. Медведева [и др.] // Инженерный журнал – 2005. – №5. – С. 8 – 15.
- 2 Аэродинамика закрученного потока в вихревых горелках [Текст] / Ш.А. Пиралишвили, А.И. Гурьянов, Ахмед Мамо Демена [и др.] // Авиакосмическое приборостроение – 2007. – №9 – С. 3 – 8.

3 Перспективы форсирования паро- и газотурбинных энергоустановок [Текст] / Ш.А. Пиралишвили, С.В. Веретенников, В.П. Добродеев [и др.] // Газотурбинные технологии. – 2009. -№6. – С. 24-30.

4 Пиралишвили, Ш.А. Вихревые горелки с противотоком [Текст] / Ш.А. Пиралишвили, А.И. Гурьянов // Конверсия в машиностроении. – Conversion in machine building of Russia. – 2008. № 1. – С. 11 – 16.

THERMAL PHYSICS OF HYDROGEN-OXYGEN COMBUSTOR CHAMBERS FOR HIGH-TEMPERATURE TURBINES COMBINED-CYCLE POWER PLANT

© 2011 A. I. Guryanov, G. Sh. Piralishvili, I. M. Vereschagin

Rybinsk state academy of aviation technology named after P.A. Solovyev

There are presented the results of the numerical modeling hydrogen combustion in oxidizing environment of the premixed steam-oxygen mixture in operating conditions of the promising combustion chambers that can be used as high-temperature steam's generators for combined cycle power plants. It is defined a geometry of the mixing module, flame stabilizer and primary combustion zone that provides high mixing quality and absence of local zones of overheating construction's elements of the combustion chamber.

Burning, high-temperature steam, hydrogen, oxygen, stoichiometric mixture, combustor chambers.

Информация об авторах

Гурьянов Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент Рыбинской государственной авиационной технологической академии. E-mail: marialex2004@mail.ru. Область научных интересов: вихревые противоточные горелочные устройства, горение водород-кислородных смесей в среде водяного пара.

Пиралишвили Гиви Шотаевич, аспирант Рыбинской государственной авиационной технологической академии. E-mail: marialex2004@mail.ru. Область научных интересов: вихревые противоточные горелочные устройства, горение водород-кислородных смесей в среде водяного пара.

Верещагин Иван Михайлович, студент Рыбинской государственной авиационной технологической академии. E-mail: ivan_ver89@mail.ru. Область научных интересов: горение водород-кислородных смесей в среде водяного пара.

Guryanov Alexander Igorevich, Candidate of Technical Sciences, associate Professor of Rybinsk state academy of aviation technology named after P.A. Solovyev. E-mail: marialex2004@mail.ru. Area of research: vortex counterflow burners, hydrogen-oxygen combustion in a steam atmosphere.

Piralishvili Givi Shotavich, the post-graduate student of Rybinsk state academy of aviation technology named after P.A. Solovyev. E-mail: marialex2004@mail.ru. Area of research: vortex counterflow burners, hydrogen-oxygen combustion in a steam atmosphere.

Vereschagin Ivan Mihaylovich, student of Rybinsk state academy of aviation technology named after P.A. Solovyev. E-mail: ivan_ver89@mail.ru. Area of research: hydrogen-oxygen combustion in a steam atmosphere.