

УДК 536.04+621.438

## ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ ТЕЧЕНИЯ С ОСЕВЫМ ПРОТИВОТОКОМ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ВОДОРОД-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ В СРЕДЕ ВОДЯНОГО ПАРА

© 2013 А. И. Гурьянов, И. М. Верещагин

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный  
технический университет имени П.А. Соловьёва»

Представлены сравнительные результаты численного исследования горения стехиометрической водород-кислородной смеси в среде водяного пара при различных способах организации смешения топливных компонентов в жаровой трубе трубчатой камеры сгорания. Определена геометрия камеры смешения, обеспечивающая достижение наиболее высокого значения полноты сгорания и равномерности температуры в выходном сечении камеры сгорания.

*Водород, кислород, пар, противоток, горение, жаровая труба, полнота сгорания, массовая концентрация.*

### Введение

Сбережение энергоресурсов и рост стоимости топлива создали условия, вынуждающие внедрять высокоэффективные технологии преобразования химической энергии топлива в электрическую. С увеличением температуры рабочего тела термический, а следовательно, электрический и эффективный КПД ГТУ и ПГУ возрастают, поэтому комбинированные парогазовые энергоустановки, снабжённые высокотемпературными турбинами, являются одним из решений проблемы повышения энергоэффективности.

Практическая реализация высокотемпературных циклов ПГУ возможна с использованием технологий перегрева пара, использующих сжигание водородного топлива. Целесообразность применения водорода обусловлена рядом причин: ограниченностью ископаемого топлива и развивающейся в энергетике тенденции поиска альтернативных источников энергии; высокой теплотой сгорания водорода (120,7 МДж/кг); экологической целесообразностью применения водорода, продуктом сгорания которого в кислороде является водяной пар.

Одной из главных проблем использования водород-кислородных камер сгорания в энергетике является обеспечение высокой полноты сгорания (более 0,999) с целью исключения скапливания водорода в элементах проточной части ПГУ.

Задачей численного исследования является выбор схемы организации газодинамического течения в камере сгорания, обеспечивающей наибольшую полноту сгорания топлива и равномерность поля температуры в выходном сечении.

Качество сжигания топлива оценивалось с использованием следующих параметров:

- неравномерность поля температуры по сечению жаровой трубы

$$q = f(\bar{r}); q = \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max} - T_{\text{ex}}},$$

где  $T_i$  – температура в рассматриваемой точке, К;  $T_{\max}$  – максимальная температура, К;  $T_{\text{ex}}$  – температура пара на входе в камеру сгорания ( $T_{\text{вх}}=603$  К), К;  $\bar{r}$  – относительный радиус  $\bar{r} = r/r_i$ ;

- относительная скорость потока

$$\bar{w} = f(\bar{r}); \bar{v} = \frac{w}{w_{cp}},$$

где  $w$  – скорость потока, м/с;  $w_{cp}$  – среднерасходная по сечению скорость потока, м/с;

- среднеквадратичная неравномерность массовой концентрации водорода по сечению жаровой трубы

$$\bar{e} = f(\bar{l}); \bar{e} = \sqrt{\frac{\int_F (g_{H_2} - \bar{g}_{H_2})^2 rwdF}{\int_F rwdF}},$$

где  $rwdF$  – массовый расход водорода через площадку  $dF$ , кг/с;  $\bar{l}$  – относительная длина  $\bar{l} = l/d$ ;  $\bar{g}_{H_2}$  – среднерасходное значение массовой доли водорода в произвольном сечении;

- полнота сгорания

$$h = f(\bar{l}); h = 1 - g_{H_2i},$$

где  $g_{H_2i}$  – массовая доля водорода в рассматриваемом сечении.

Движение среды описывается методом Лагранжа. Перенос тепла задавался в рамках гомогенной модели переноса полной энтальпии. Расчёты течения газа получены численным интегрированием полной стационарной системы уравнений Навье–Стокса, осреднённой по Рейнольдсу. Для замыкания системы уравнений применена двухпараметрическая модель турбулентности  $k - \epsilon$ . Горение описывалось с использованием модели EDM.

Рассмотрено 4 варианта моделей жаровых труб с течениями: прямооток; закруткой; закруткой и противотоком; закруткой, противотоком течения и профилированной геометрией торцевой части. Диаметр жаровой трубы  $d = 20$  м, относительная длина –  $\bar{l} = l/d = 20$ . Для соблюдения газодинамического и геометрического подобия все варианты поставлены в одинаковые граничные условия.

Соотношение расходов водорода и кислорода выбрано стехиометрическим.

Первый вариант – жаровая труба с прямооток течения. Трёхмерная модель представлена на рис. 1. В центре торцевой стенки расположено отверстие для подачи водорода 1. Вокруг него находятся четыре канала 2, имеющих форму сектора, которые предназначены для подачи кислорода. Пар подаётся через кольцевое отверстие 3.

Второй вариант – жаровая труба с закруткой течения (рис. 2). Водород и кислород подаются через те же отверстия, что и в предыдущем варианте (водород – отверстие 1, кислород – отверстия 2). Пар подаётся через тангенциальные подводы 3, расположенные вблизи торцевой стенки.

Третий вариант – модельная жаровая труба с закруткой и противотоком течения (рис. 3). Пар подаётся через тангенциальные каналы, расположенные на расстоянии  $\bar{l} = 5$  калибров от торцевой стенки трубы.

Четвёртый вариант – жаровая труба с закруткой, противотоком течения и профилированной геометрией торцевой части (рис. 4). Профилирование выполнено согласно рекомендациям [1].

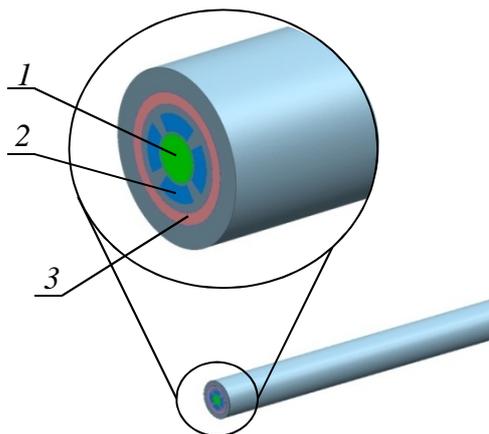


Рис. 1. Модель прямоточной трубы

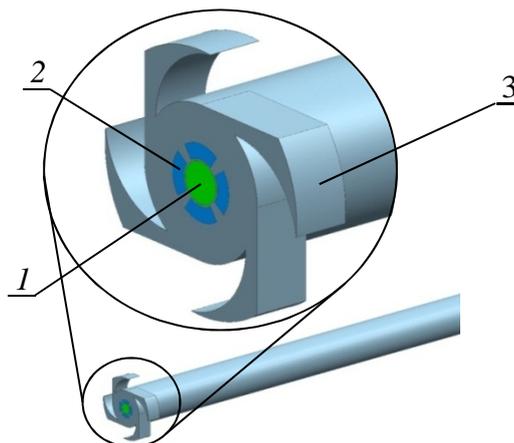


Рис. 2. Модель трубы с закруткой течения

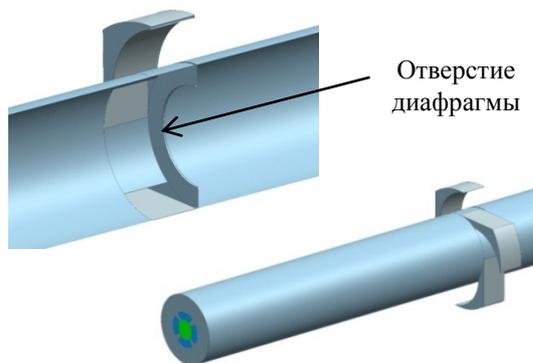


Рис. 3. Модель трубы с закруткой и противотоком течения

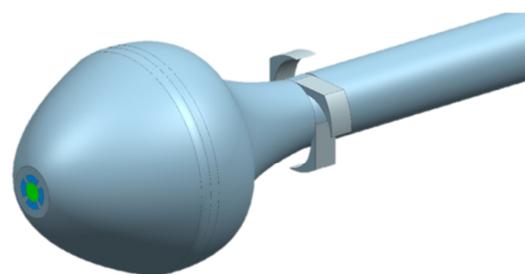


Рис. 4. Модель трубы с закруткой, противотоком течения и профилированной геометрией торцевой части

### Результаты исследования

Рассмотрим неравномерность температурного поля в проточной части на различном удалении от среза сопла (10 калибров, 15 калибров и выходное сечение) (рис. 5–7).

В жаровой трубе с прямоточной схемой течения (вариант 1) кривые имеют два максимума, расположенных симметрично относительно оси трубы. Подобное поведение объясняется тем, что потоки

водорода и кислорода имеют только осевую составляющую скорости (линии тока параллельны (рис. 6 а)) и взаимодействуют строго в одной кольцевой области. Экстремальный вид кривой сохраняется до самого выходного сечения; разница температур на стенке трубы и в точках максимума составляет 1000-1100 °С. Такая высокая неравномерность температурного поля является неприемлемой для современных камер сгорания [2].

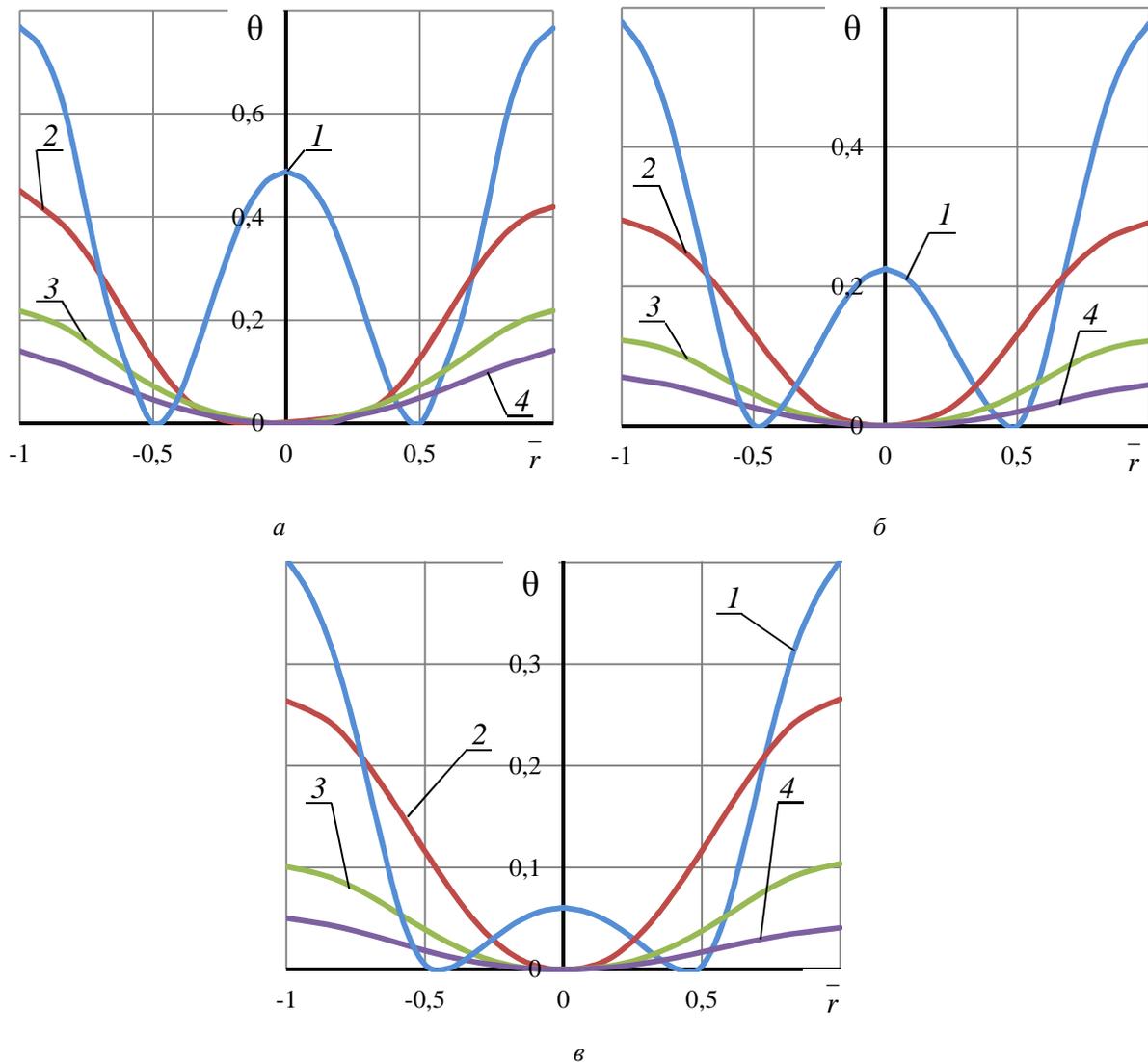


Рис. 5. Поля температуры в сечениях жаровых труб на расстоянии: а – 10 калибров; б – 15 калибров; в – выходное сечение (цифрами обозначены варианты труб)

Вторая расчётная модель (труба с закруткой потока) характеризуется несколько меньшей неравномерностью температурного поля в поперечном сечении. Максимум температуры расположен на оси трубы, минимум – на стенках, разница составляет  $400-600^{\circ}\text{C}$ . Полученное распределение объясняется наличием центрального высокотемпературного ядра струи (рис. 6б). Выравнивание температурного поля наблюдается по мере движения потока к выходному сечению жаровой трубы. Этот процесс протекает значительно быстрее, чем в трубе с прямотоком. Подобное поведение объясняется тем, что на расстоянии  $\bar{l} \approx 5$  калибров закрученный поток пара (см. рис. 6б) вносит

тангенциальную составляющую скорости в струю водорода, что обеспечивает более интенсивное перемешивание компонентов. Наиболее равномерное распределение температуры, из всех рассмотренных схем, получено в жаровых трубах с противотоком (см. рис. 6 в, г). Разность температур у стенки и на оси трубы не превышает  $90-120^{\circ}\text{C}$  в третьей и  $50-70^{\circ}\text{C}$  в четвёртой схемах. Это объясняется формированием противоположно перемещающихся в радиальном направлении вдоль оси жаровой трубы вихрей, обеспечивающих эффективное смешение потока пара и высокотемпературных продуктов сгорания водорода в кислороде, в максимально короткой зоне горения.

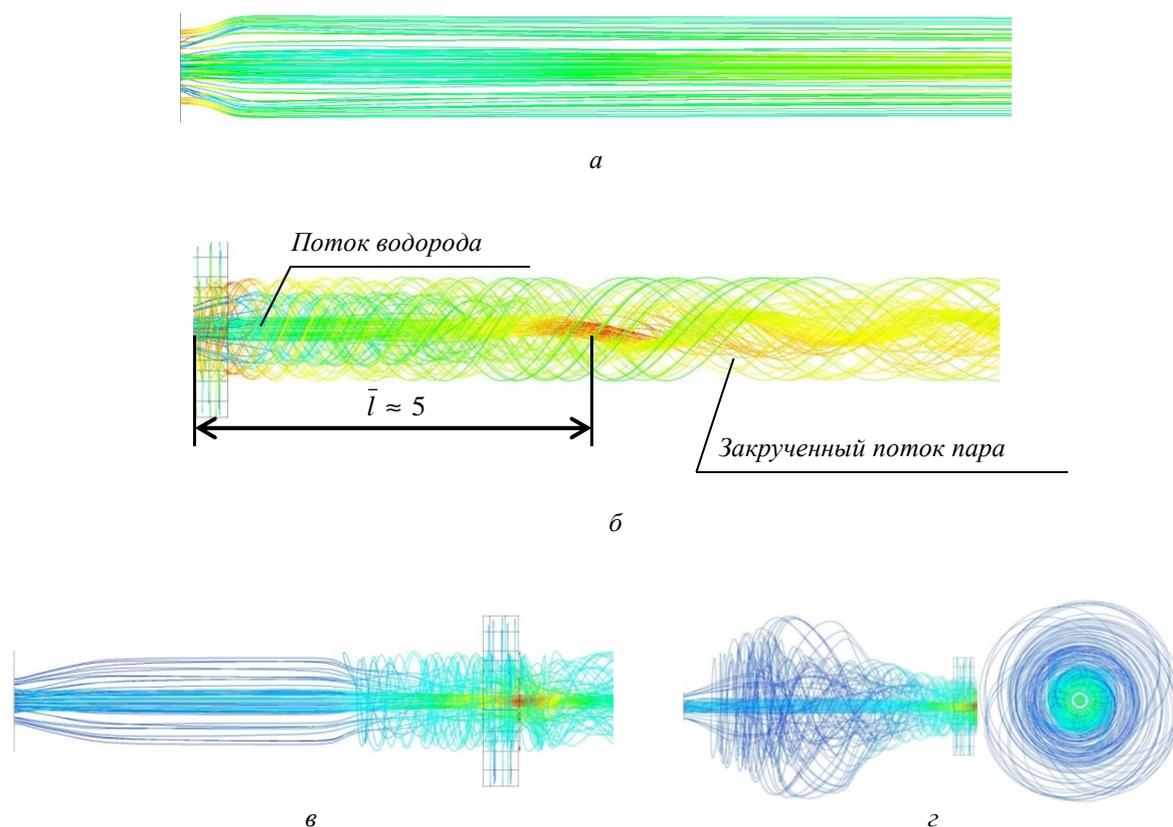


Рис. 6. Распределение линий тока в моделях трубы с сечением:  
 а – прямоточным; б – закруткой; в – закруткой и противотоком;  
 г – закруткой, противотоком и профилированной торцевой частью

Профиль течения в трубе с прямотоком (кривые 1 на рис. 7) имеет максимум на оси, а на стенке, вследствие прилипания, скорость равна 0. Поток можно рассматривать как одномерный (см. рис. 6а), так как в нём преобладает осевая составляющая скорости.

В трубе с закруткой течения кривые 2 имеют два максимума, симметричных относительно оси. Это объясняется трёхмерным движением потока (три составляющие скорости: осевая, радиальная, тангенциальная) и, как следствие, градиентом статического давления. Под действием центробежной силы, вызванной радиальной составляющей скорости, сни-

жается статическое давление в приосевой области потока, что и приводит к искривлению профиля скорости.

В схемах с противоточным течением (кривые 3 на рис. 7) наблюдается подобная картина, однако в приосевой области ( $-0,25 < \bar{r} < 0,25$ ) профиль имеет форму, близкую к прямолинейной. Такое поведение объясняется малым радиальным градиентом давления вследствие низкой интенсивности закрутки потока в приосевой области по сравнению с предыдущим вариантом.

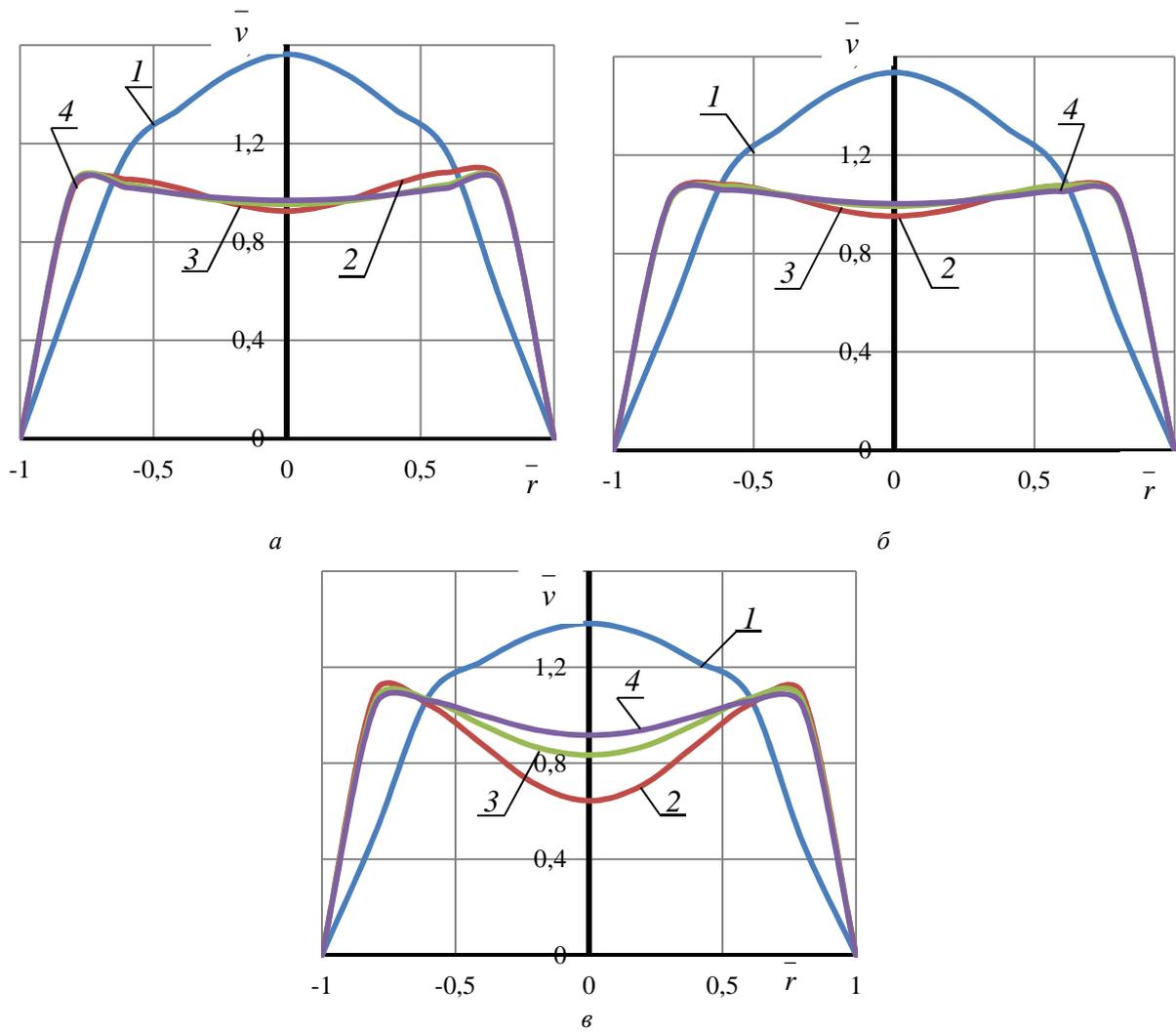


Рис. 7. Распределение относительной скорости в сечениях жаровых труб на расстоянии: а – 10 калибров; б – 15 калибров; в – выходное сечение (цифрами обозначены варианты труб)

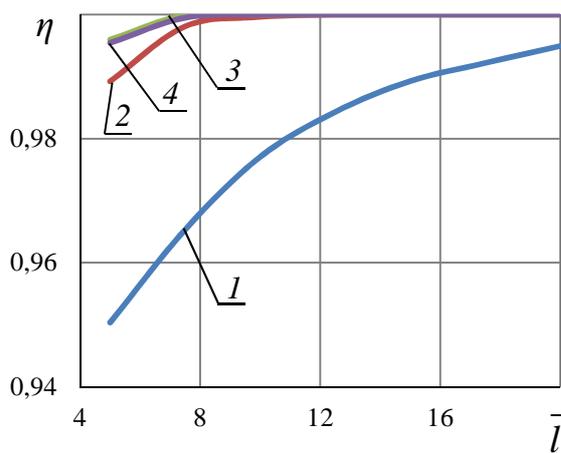


Рис. 8. Зависимость полноты сгорания от относительной длины (цифрами обозначены варианты труб)

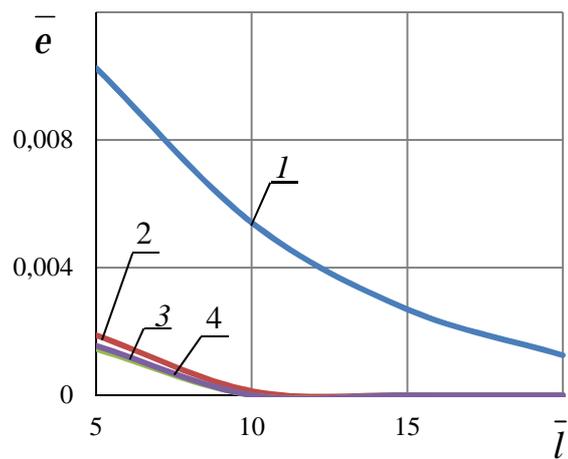


Рис. 9. Среднеквадратичная неравномерность массовой концентрации водорода по длине трубы (цифрами обозначены варианты труб)

Сравнительный результат расчёта полноты сгорания водорода по длине жаровой трубы во всех рассмотренных схемах течения показан на рис. 8. Видно, что в результате формирования развитого торoidalного вихря и интенсификации массообменных процессов в торцевой части жаровой трубы (см. рис. 6, в, г) с противотоком течения обеспечивается значение полноты сгорания 0,999 на расстоянии  $\bar{l} = 8$  калибров, в то время как прямая схема и схема с закруткой течения дают 0,967 и 0,997 соответственно в этом же сечении.

Среднеквадратичная неравномерность массовой концентрации водорода в различных сечениях жаровых труб представлена на рис. 9.

В процессе взаимодействия водорода и кислорода кривые плавно опускаются, стремясь к нулю. Это говорит о том, что концентрация водорода по мере выгорания уменьшается. Скорость выгорания тем больше, чем выше интенсивность перемешивания компонентов. Во 2-м и 3-м вариантах жаровых труб значение среднеквадратичной неравномерности массовой концентрации водорода находится близко к нулю на расстоянии  $\bar{l} = 7,5-8$  калибров от начала трубы, а в жаровой трубе с противотоком течения и профилированной торцевой частью отклонение равно 0 уже на расстоянии  $\bar{l} = 6-7$  калибров. Полученный результат среднеквадратичной неравномерности массовой концентрации водорода согласуется с данными предшествующего графика по полноте сгорания.

Таким образом, с точки зрения длины полного выгорания вихревая противоточная схема жаровой трубы обладает несомненным преимуществом.

### Вывод

Исследование поля температуры в характерных сечениях показало, что в трубе с противотоком течения и с профилированной торцевой частью обеспечивается самый интенсивный из всех рассмот-

ренных моделей жаровых труб тепло- и массообмен, поэтому разность температур на стенке и на оси составляет  $q = 0,1$  уже на расстоянии  $\bar{l} = 10$  калибров, а полнота сгорания достигает  $h = 0,999$  на расстоянии  $\bar{l} = 0,25$  калибров.

Численные исследования влияния закрутки и противотока течения подтвердили предположение о приближённости процесса горения стехиометрической водород-кислородной смеси в потоке водяного пара к условиям гомогенного реактора и целесообразность их применения в современных камерах сгорания для создания условий газодинамической стабилизации пламени.

### Библиографический список

1. Гурьянов, А.И. Теплофизика водород-кислородных камер сгорания высокотемпературных турбин комбинированных ПГУ [Текст] / А.И. Гурьянов, И.М. Верещагин, Г.Ш. Пиралишвили // Вестник СГАУ им. С.П. Королёва. – 2011. – №3(27). – С.137-144.
2. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания газотурбинных двигателях [Текст] / А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Льюис, Б. Горение, пламя и взрывы в газах [Текст] / Б. Льюис, Г. Эльбе; пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
4. Clavin, P. Flamelet library for turbulent wrinkled flames. Lecture Notes in Engineering: Turbulent Reactive Flows [Text] / P. Clavin, G. Joulin – 1989. – V.40. – P. 213-239.
5. Пиралишвили, Ш.А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения [Текст] / Ш.А. Пиралишвили, В.М. Поляев, М.Н. Сергеев; под ред. А.И. Леонтьева. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.
6. Гельфанд, Б.Е. Водород: параметры горения и взрыва [Текст] / Б.Е. Гельфанд, О.Е. Попов, Б.Б. Чайванов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 288 с.

## THE INFLUENCE OF SWIRLING OF A FLOW WITH AXIAL COUNTERCURRENT ON THE PROCESS OF BURNING OF HYDROGEN- OXYGEN MIX IN THE STREAM OF WATER STEAM

© 2013 A. I. Guryanov, I. M. Vereshchagin

Federal State Educational Budget Institution  
of higher professional education  
«P.A. Solovyov Rybinsk State University of Aviation and Technology»

The paper presents comparative results of the numerical research of the combustion of stoichiometric hydrogen-oxygen mixture in the medium of water steam using various ways of mixing fuel components in the flame tube of a tubular combustion chamber. The geometry of the mixing chamber that makes it possible to achieve the highest values of combustion efficiency and temperature uniformity at the exit of the combustion chamber is defined.

*Hydrogen, oxygen, steam, countercurrent, burning, flame tube, completeness of combustion, mass concentration.*

### Информация об авторах

**Гурьянов Александр Игоревич**, кандидат технических наук, доцент кафедры общей и технической физики, ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва». E-mail: [marialex2004@mail.ru](mailto:marialex2004@mail.ru). Область научных интересов: вихревые противоточные горелочные устройства, горение водород кислородных смесей в среде водяного пара, камеры сгорания.

**Верещагин Иван Михайлович**, студент (магистрант 2-го курса), ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва». E-mail: [ivan\\_ver89@mail.ru](mailto:ivan_ver89@mail.ru). Область научных интересов: численные расчёты, горение и теплообмен водород-кислородных смесей в среде водяного пара.

**Guryanov Alexander Igorevich**, candidate of technical science, associate professor of the department of general and applied physics, Federal State Educational Budget Institution of higher professional education «Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University». E-mail: [marialex2004@mail.ru](mailto:marialex2004@mail.ru). Area of research: counterflow vortex burners, combustion of hydrogen-oxygen mixtures in the medium of water steam, combustion chambers.

**Vereshchagin Ivan Mikhaylovich**, student (2nd year undergraduate), Federal State Educational Budget Institution of higher professional education «Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University». E-mail: [ivan\\_ver89@mail.ru](mailto:ivan_ver89@mail.ru). Area of research: numerical calculations, combustion and heat transfer in hydrogen-oxygen mixtures in the medium of water steam.