

УДК 004.9+621.452.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МНОГОГОРЕЛОЧНОЙ НИЗКОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

©2013 И. С. Морева, Д. К. Василюк, Р. Е. Кириченко

ОАО «НПО «САТУРН»

Представлены результаты расчётов сопряжённого теплообмена четырёх вариантов многогорелочной жаровой трубы экспериментальной камеры сгорания, стенки жаровой трубы которой имеют двойную сегментную конструкцию с ударно-конвективной системой охлаждения. Расчёты проведены с учётом горения и влияния лучистых потоков. Приведено сравнение теплового состояния стенок жаровой трубы, определённого по результатам численного эксперимента, с данными натурных испытаний камеры сгорания в составе газогенератора двигателя. Предложены рекомендации по модернизации конструкции жаровой трубы для улучшения теплового состояния её сегментов.

*Камера сгорания, жаровая труба, ударно-конвективное охлаждение, горение, ANSYS CFX.*

### Введение

Для обеспечения экологических требований по уровню выбросов вредных веществ на двигателях семейства Е70/8РД в ОАО «НПО «Сатурн» разрабатывается конструкция многогорелочной низкоэмиссионной камеры сгорания (КС). В рамках данной работы рассматриваем разработку системы охлаждения с уменьшенным подводом охлаждающего воздуха в зону горения с «богатой» топливо-воздушной смесью.

Экспериментальная камера сгорания спроектирована по принципу богатобедного горения, и основным источником образования NO в жаровой трубе (ЖТ) является высокотемпературная область в районе основных отверстий, где происходит резкое разбавление продуктов неполного сгорания из «богатой» зоны вторичным воздухом.

Разработка и оптимизация выполнялись на основании численного моделирования и стендовых испытаний камеры сгорания в составе установки полноразмерной камеры сгорания и газогенератора.

### Предмет исследования

Предметом исследования является экспериментальная прямооточная кольце-

вая камера сгорания с 72-горелочной жаровой трубой (рис. 1).

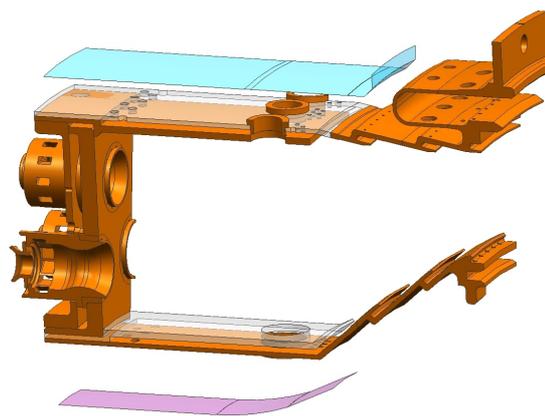


Рис. 1. Разрез камеры сгорания

В результате процесс горения стенки жаровой трубы камеры сгорания подвергается тепловому нагружению за счёт конвективного и лучистого теплообмена.

Для обеспечения заданного ресурса жаровой трубы необходимо создание системы охлаждения с максимальным отводом тепла к охлаждающему воздуху.

В исследуемых моделях стенки жаровой трубы экспериментальной камеры сгорания имеют двойную сегментную конструкцию с ударно-конвективной системой охлаждения.

На наружной стенке 18 сегментов, на внутренней – 12.

В начале «холодной» наружной и внутренней стенок расположены два ряда отверстий для ударного натекания струй воздуха на поверхность сегмента и его конвективного охлаждения (туннельная схема).

Воздух, участвующий в ударно-конвективном охлаждении сегмента, выходит через щель туннеля в виде кольцевой завесы.

В конце «холодной» стенки выполнен один ряд основных отверстий (или пазов, в зависимости от конструкции), через которые вторичный воздух поступает в зону разбавления.

За каждым из основных отверстий на «холодной» стенке расположены отверстия для ударного натекания воздуха на поверхность сегментной стенки.

Для экспериментальной отработки системы охлаждения на первом этапе жаровую трубу камеры сгорания разделили на три конструктивно различных сектора (по 120 ° каждый).

На «холодной» наружной стенке выполнено:

- два ряда отверстий, обеспечивающих подвод охлаждающего воздуха в полость между стенкой и сегментом;
- один ряд основных отверстий в виде втулок;
- за каждой втулкой пять отверстий для охлаждения поверхности сегментов.

Все 18 сегментов наружной стенки изготовлены одинаковыми.

Внутренняя стенка разбита на три сектора.

В первом секторе на «холодной» внутренней стенке расположены:

- два ряда отверстий, обеспечивающих подвод охлаждающего воздуха в полость между стенкой и сегментом;
- один ряд основных отверстий в виде втулок;

- за каждой втулкой семь отверстий для охлаждения поверхности сегментов.

Сегмент заканчивается за основными отверстиями.

Во втором секторе на «холодной» внутренней стенке выполнены:

- два ряда отверстий, обеспечивающих подвод охлаждающего воздуха в полость между стенкой и сегментом;
- один ряд основных отверстий в виде пазов без втулок.

Сегмент заканчивается перед основными отверстиями.

В третьем секторе на «холодной» внутренней стенке расположены:

- два ряда отверстий, обеспечивающих подвод охлаждающего воздуха в полость между стенкой и сегментом;
- один ряд основных отверстий без втулок.

Сегмент заканчивается перед основными отверстиями.

В связи с тем, что внутренняя стенка жаровой трубы экспериментальной камеры сгорания состоит из трёх конструктивно различных секторов, расчёты по определению теплового состояния стенок выполнялись на трёх моделях.

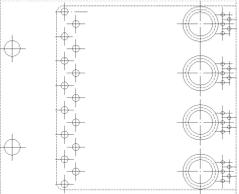
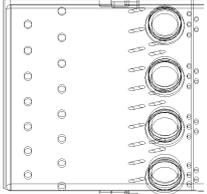
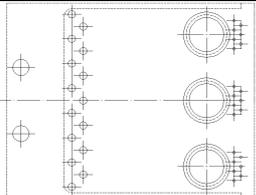
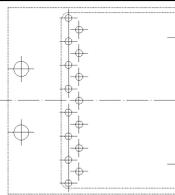
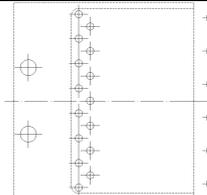
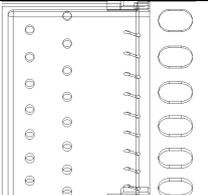
Описание исследуемых моделей приведено в табл. 1 (модели 1, 2 и 3).

Для улучшения теплового состояния стенок жаровой трубы была разработана модернизированная конструкция жаровой трубы на базе модели 3 (модель 4).

Наружная стенка модели 4 выполнена с ударно-конвективной системой охлаждения. Отверстия подвода охлаждающего воздуха в полость между стенкой и сегментом смещены вниз по потоку в район натекания газа из горелки на внутреннюю поверхность сегмента.

На сегменте в районе основных отверстий выполнена наклонная перфорация для увеличения пропускной способности туннеля и для дополнительного охлаждения наиболее горячей зоны сегмента.

Таблица 1. Основные отличительные особенности рассчитываемых моделей

	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
<b>Двойная наружная стенка жаровой трубы</b>				
<i>«Холодная» стенка</i>				
Отверстия охлаждения	круглые без втулок в районе фронта			круглые без втулок, смещены от фронта
Основные отверстия	круглые в виде втулок			
<i>Сегмент</i>				
Сегменты	длинные			
Перфорация	отсутствует			в районе основных отверстий
				
<b>Двойная внутренняя стенка жаровой трубы</b>				
<i>«Холодная» стенка</i>				
Отверстия охлаждения	круглые без втулок в районе фронта			круглые без втулок, смещены от фронта
Основные отверстия	круглые в виде втулок	круглые без втулок	в виде овальных пазов	
<i>Сегмент</i>				
				
Сегменты	длинные	короткие		
Перфорация	отсутствует			в районе основных отверстий

### Исходные данные и полученные результаты

Расчёты проводились в 3D постановке с помощью комплекса программ вычислительной газодинамики ANSYS CFX. Расчётные сетки генерировались посредством приложения ANSYS ICEM CFD неструктурированные, тетраэдрические со сгущением на стенках, с призматическими элементами, моделирующими пограничные слои, средний размер сетки составлял около 8 млн. узлов и 24 млн. элементов.

При проведении расчётов принимались следующие условия и допущения:

– для сокращения машинного времени область расчёта жаровой трубы КС сведена к сектору с центральным углом  $10^\circ$ ;

– отвод тепла через стенки корпуса камеры сгорания отсутствует, процесс адиабатный;

– для моделирования сопряжённого теплообмена на охлаждаемых сегментах ЖТ устанавливался интерфейс типа «газ – твёрдое тело»; на остальных стенках принималось условие – «адиабатная стенка с прилипанием»;

– на боковых поверхностях задавалось условие – «периодичность»;

– использовалась k-ε модель турбулентности со стандартным набором модельных констант.

В связи с применением достаточно подробной сетки с большим количеством элементов для наилучшего описания теплообмена между стенкой и газом, а также из-за ограничений по вычислительным ресурсам лучистый теплообмен моделировался P1 моделью, ограниченной расчётным случаем теплообмена между сильно нагретыми оптически тонким слоем газа и холодной стенкой.

Процесс горения моделировался комбинированием модели распада турбулентного вихря (EDM) с ограничителем продуктов реакции  $B = 0,5$  и модели ко-

нечной скорости химической реакции (FRC). Фактическая скорость реакции в этом случае вычисляется как минимум из скорости турбулентного смешения реагентов (или свежих и отработанных газов) и скорости образования продуктов сгорания, которая определяется процессами химической кинетики.

Моделировался номинальный режим работы двигателя на газообразном топливе. Соотношение площадей отверстий в жаровой трубе было подобрано так, чтобы обеспечить коэффициент избытка воздуха в «богатой» зоне  $\alpha_{3,r} = 0,7$ ; а для жаровой трубы –  $\alpha_{жт} = 2,9$ .

Схема приложения граничных условий показана на рис. 2.

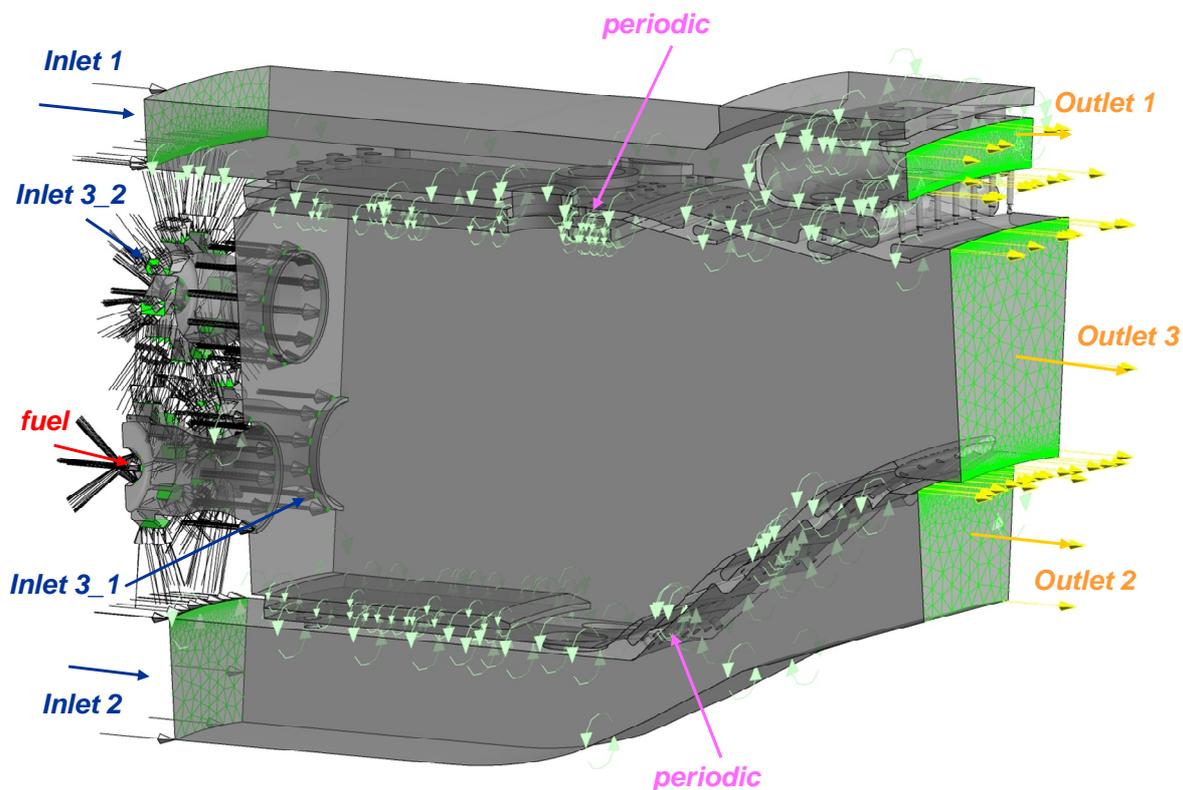


Рис. 2. Расчётная область – 1/36 часть жаровой трубы КС

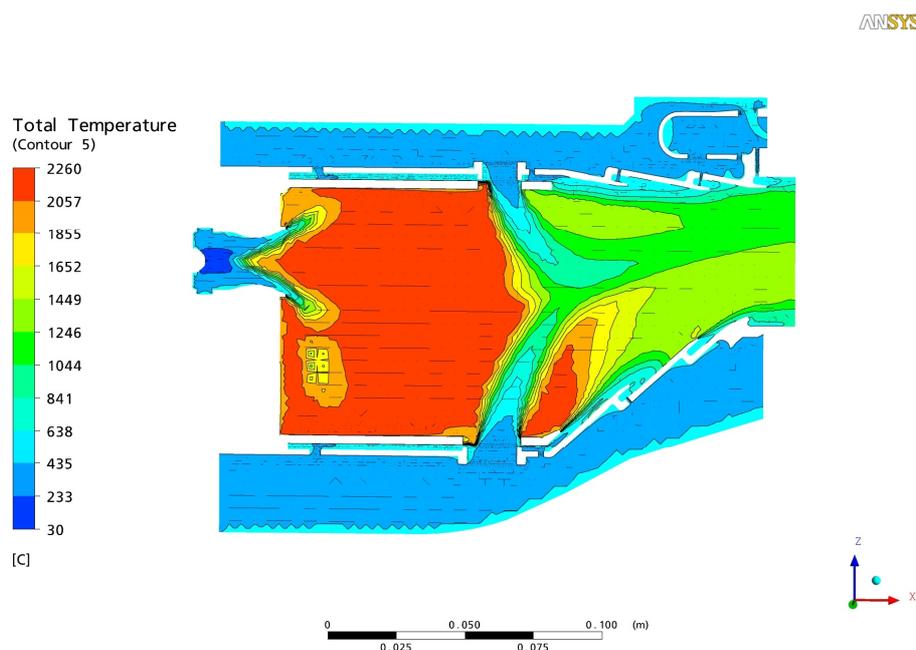


Рис. 3. Распределение полной температуры воздуха по длине жаровой трубы в плоскости угла  $5^\circ$

Картина распределения температуры, полученная с помощью комбинированной модели горения EDM/FRC (рис.3), вполне соответствует физическим представлениям о структуре течения в жаровой трубе.

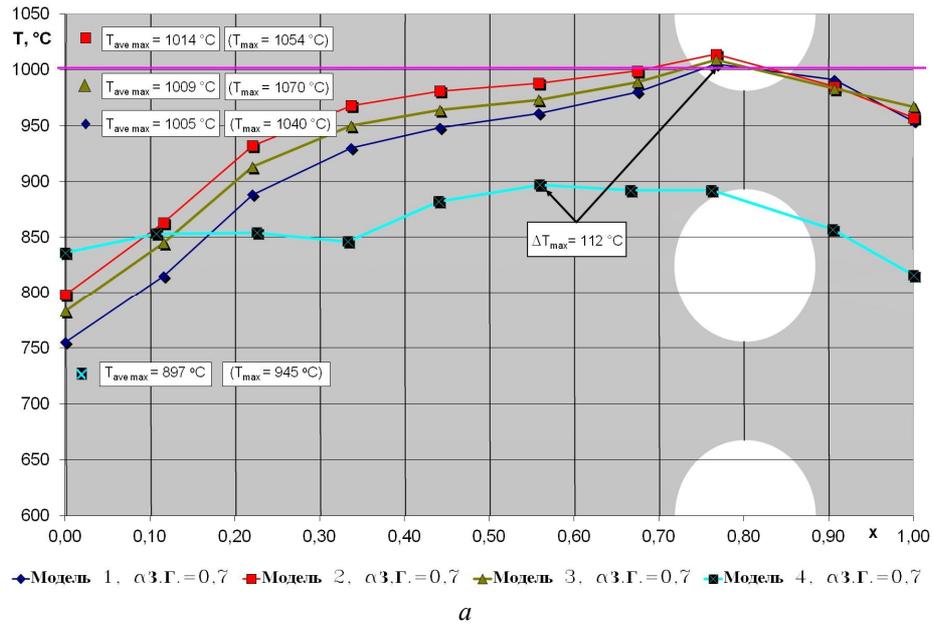
На рис. 4 представлены графики распределения температуры металла по длине сегментов со стороны газа и приведены значения максимальных температур, которые локализуются на сегментах в областях резкого разбавления продуктов неполного сгорания из «богатой» зоны холодным воздухом из основных отверстий. Распределение получено осреднением температуры в окружном направлении по площади сегментов.

Можно видеть, что максимальные температуры сегментов жаровой трубы экспериментальной камеры сгорания (модель 1 – 3) превышают рабочую температуру ( $1000^\circ\text{C}$ ) материала ЭП648-ВИ, из которого они изготовлены, по наружному сегменту – от  $40$  до  $70^\circ\text{C}$ , по внутреннему – от  $4$  до  $109^\circ\text{C}$  в зависимости от кон-

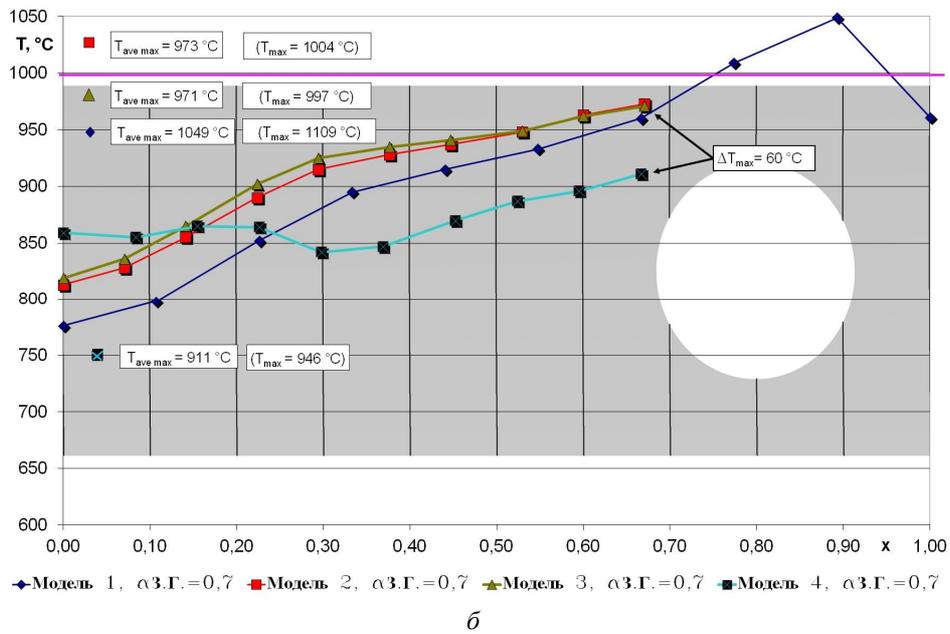
струкции сегмента. Введение частичной перфорации на сегментах в районе основных отверстий (модель 4) обеспечивает дополнительное охлаждение наиболее горячей зоны сегмента. Поэтому максимальные рассчитанные температуры сегментов модернизированной жаровой трубы не превышают рабочую температуру ( $1000^\circ\text{C}$ ) материала ЭП648-ВИ, из которого они изготовлены.

Максимальная осреднённая температура стенки наружного сегмента модернизированной жаровой трубы уменьшилась на  $112^\circ\text{C}$ , а внутреннего – на  $60^\circ\text{C}$  по сравнению с исходной экспериментальной моделью 3 без перфорации.

При испытаниях экспериментальной камеры сгорания в составе газогенератора двигателя температура сегментов жаровой трубы измерялась с помощью термопар, установленных со стороны охлаждающего воздуха. Площадь фронтального устройства обеспечивала коэффициент избытка воздуха в «богатой» зоне  $\alpha_{3,r} = 0,5$ .



а



б

Рис. 4. Распределение температуры стенки по длине наружного (а) и внутреннего (б) сегментов ЖТ (со стороны газа)

Для сравнения с экспериментом были проведены дополнительные расчёты с изменённым распределением воздуха по длине жаровой трубы.

Результаты расчётов и термометрирования представлены на рис. 5.

Расчётные кривые получены осреднением температуры в окружном направлении по площади участков сегментов.

Значения температуры, измеренные термометрами, нанесены на диаграмму в виде точек.

Результаты численного исследования удовлетворительно сходятся с данными натурных испытаний, максимальная разность составляет 14 % в конце наружного сегмента ( $x = 0,95$ ). Значения рассчитанных температур лежат в диапазоне из-

меренных. Исключение составляют заниженные значения измеренных температур, зафиксированные в местах, близких к замковым соединениям сегментов, утечки воздуха через которые в численном исследовании не моделировались.

Уменьшение коэффициента избытка воздуха в «богатой» зоне до  $\alpha_{3,Г} = 0,5$  приводит к уменьшению температуры в зоне горения и, следовательно, к уменьшению температуры сегментов: температура наружного сегмента в среднем уменьшилась на  $40^\circ\text{C}$ , а внутреннего – на  $25^\circ\text{C}$ .

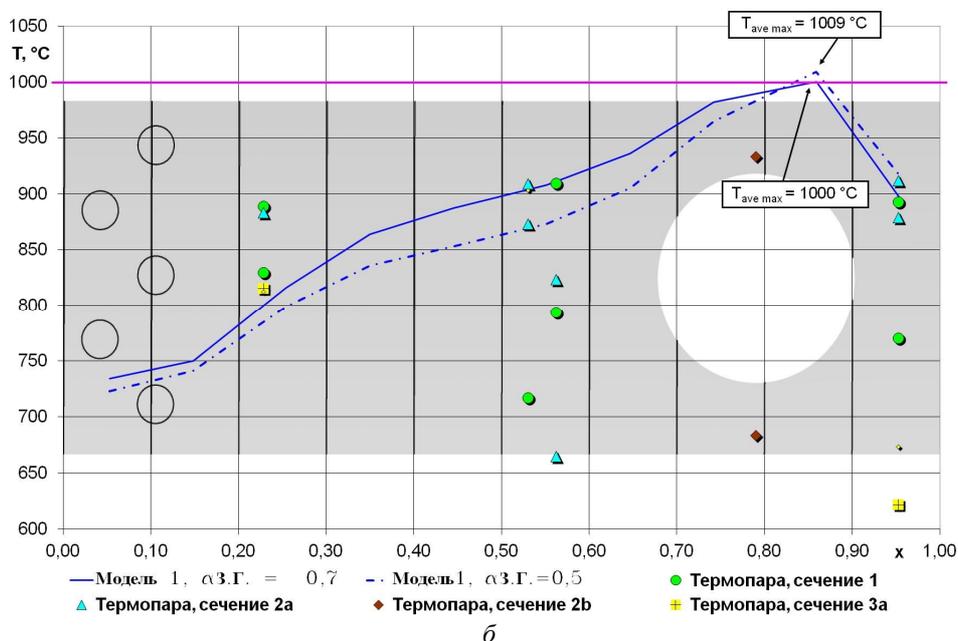
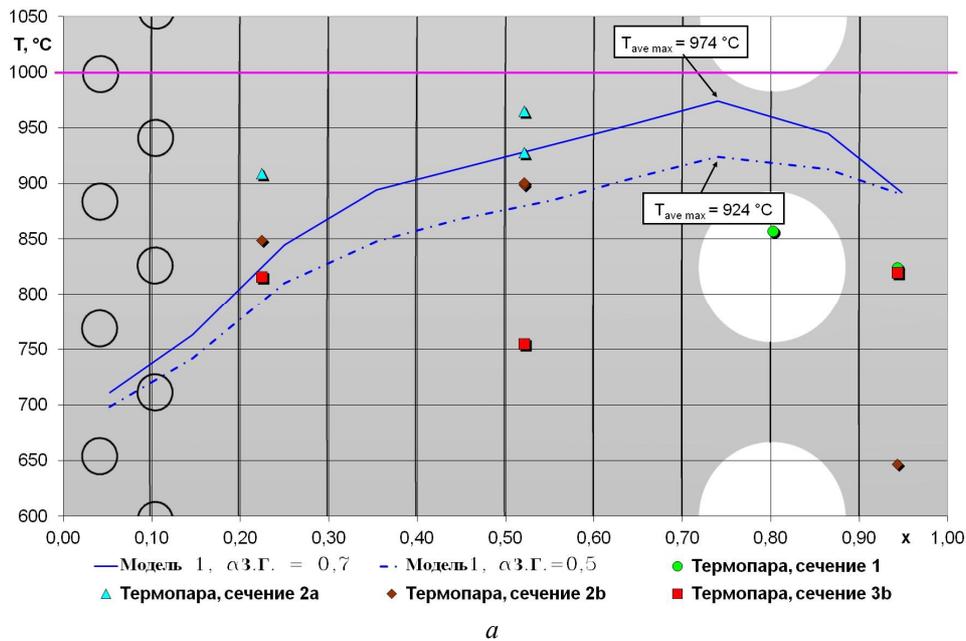


Рис. 5. Сравнение результатов расчётов с результатами термометрирования. Распределение температуры стенки по длине наружного (а) и внутреннего (б) сегментов ЖТ (со стороны газа)

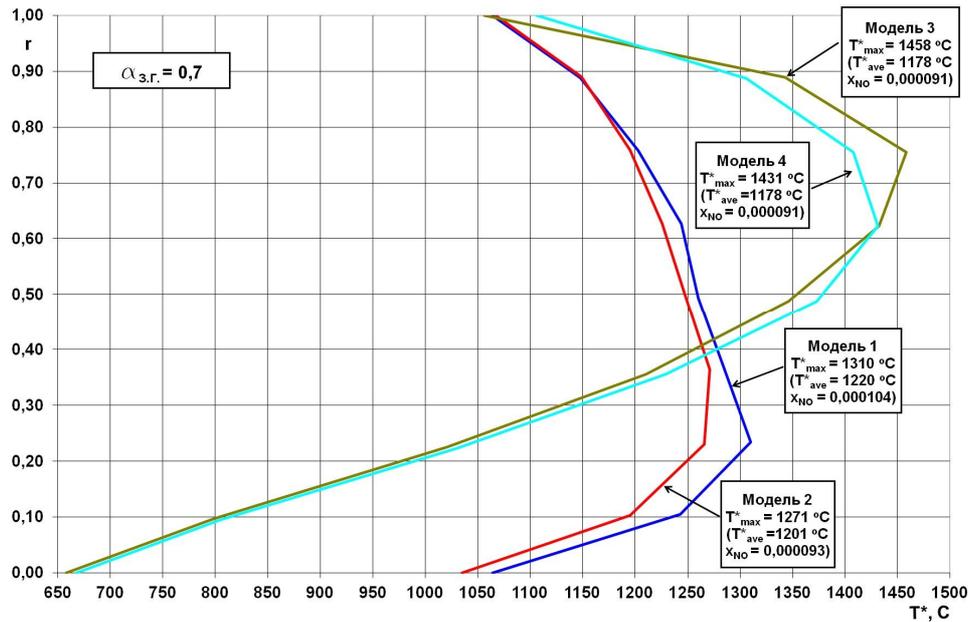


Рис. 6. Средняя температура газа в выходном сечении модели (outlet 3)

На рис. 6 представлены графики средней радиальной неравномерности температуры газа в выходном сечении (outlet 3) для всех моделей численного эксперимента.

Максимальное значение средней радиальной температуры газа лежит в верхней части выходного сечения (outlet 3) – для моделей с основными отверстиями в виде пазов (модели 3, 4) и в нижней части выходного сечения – для моделей с круглыми основными отверстиями (модели 1, 2). Это связано с особенностями геометрии основных отверстий, которые влияют на процессы разбавления и догорания во вторичной зоне жаровой трубы. В верхнюю и в нижнюю пристеночные области выходного сечения жаровой трубы горячий газ не попадает благодаря воздушной завесе из отверстий охлаждения.

В численном эксперименте было оценено образование NO в жаровой трубе, значения молярных долей NO для исследуемых моделей приведены на рис. 6.

Введение частичной перфорации в районе основных отверстий (модель 4) приводит к уменьшению температуры стенок наружного и внутреннего сегментов по сравнению с исходной моделью 3, но не оказывает влияния на увеличение образования NO.

В дальнейшем для экспериментальной проверки рекомендуется использовать ударно-конвективную систему охлаждения жаровой трубы с частичной перфорацией на сегментах в районе основных отверстий. Планируется проработать конструктивно-расчётную схему смешения горячих газов и воздуха из основных отверстий с целью оптимизации температурного поля за КС.

## **3D CALCULATION OF A MULTIPOINT LOW- EMISSION COMBUSTOR COOLING SYSTEM**

© 2013 I. S. Moreva, D. K. Vasilyuk, R. Ye. Kirichenko

NPO SATURN

The results of calculating coupled heat transfer for four versions of a multipoint flame tube are presented. The walls of the tube of an experimental combustion chamber have a double segment structure with an impact-convective cooling system. The calculations were made taking into account the combustion and the influence of radiant fluxes. The thermal state of the flame tube walls determined by the results of a numerical experiment is compared with the data of full-level tests of the combustion chamber as a part of a gas generator of an engine. Recommendations are given concerning the modernization of the flame tube structure in order to improve the thermal state of its segments.

*Combustor, flame tube, impact-convective cooling system, combustion, ANSYS CFX.*

### **Информация об авторах**

**Морева Ирина Сергеевна**, инженер-конструктор конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

**Василюк Дмитрий Константинович**, начальник расчётно-экспериментальной бригады конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

**Кириченко Роман Евгеньевич**, начальник конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». E-mail: [roman.kirichenko@npo-saturn.ru](mailto:roman.kirichenko@npo-saturn.ru). Область научных интересов: камера сгорания ГТД, проектирование, расчёт и эксперимент.

**Moreva Irina Sergeevna**, design engineer, Design Office of Combustion Chambers and Output Devices, NPO Saturn. Area of research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

**Vasilyuk Dmitry Konstantinovich**, Calculation and Experimental Team Leader, Design Office of Combustion Chambers and Output Devices, NPO Saturn. Area of research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

**Kirichenko Roman Yevgenyevich**, Chief of the Design Office of Combustion Chambers and Output Devices, NPO Saturn. E-mail: [roman.kirichenko@npo-saturn.ru](mailto:roman.kirichenko@npo-saturn.ru). Area of research: gas turbine engine combustion chambers, design, calculation and experiment.