

УДК 621.438

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ И ДОВОДКА СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СТенок ЖАРОВОЙ ТРУБЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ТРЁХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2015 С. Г. Матвеев, В. М. Анисимов, И. А. Зубрилин,
О. В. Коломзаров, Н. С. Миронов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Приведены результаты расчёта теплового состояния стенок жаровой трубы (ЖТ) на примере кольцевой камеры сгорания (КС) газотурбинного двигателя (ГТД). Использовался пакет трёхмерного моделирования Ansys Fluent. Была создана сопряжённая конечно-элементная модель. Особенностью сетки является конформный (узел в узел) интерфейс «газ-металл». Количество элементов по толщине стенки принималось минимум 5. Общее количество элементов - 8,6 миллионов. В качестве материала стенки ЖТ был использован жаропрочный сплав ХН50ВМТЮБ-ВИ. Теплозащитное покрытие (ТЗП) нанесено на стенки жаровой трубы со стороны «горячей» зоны. Толщина керамического покрытия была принята равной 0,4 мм. ТЗП состоит из интерметаллидного связующего слоя, который содержит в себе элементы материала стенки ЖТ и керамики, и из керамического защитного слоя с низким коэффициентом теплопроводности. Для учёта ТЗП задавалась оболочечная поверхность на стенках ЖТ. Задавалась плотность керамического покрытия, равная 6 т/м^3 , и зависимость изобарной теплоёмкости ТЗП от температуры в диапазоне 473 до 1473 К. Распространение теплового потока в ТЗП учитывалось только в направлении, перпендикулярном поверхности стенки. Проанализировано влияние ТЗП на температурное состояние стенок ЖТ. Приведены мероприятия по доводке системы охлаждения стенок ЖТ. Проанализированы изменения температуры стенок ЖТ по её длине.

Камера сгорания кольцевого типа, система охлаждения стенок жаровой трубы, численное моделирование камеры сгорания.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-119-128

Введение

При проектировании камеры сгорания важным вопросом является обеспечение требуемого теплового состояния стенок жаровой трубы. Экспериментальное определение температуры достаточно проблематично в условиях работы КС. Одним из путей решения данной задачи является применение методов трёхмерного моделирования. В работах [1-6] отмечается, что численных исследований с неадиабатической стенкой было проведено мало. В ряде работ показано, что распределение температуры на стенках ЖТ носит сложный характер, так как оно является результатом влияния трёхмерного течения потока в КС.

Одной из основных целей данных работ было определение поля температур на стенках ЖТ для дальнейшего опреде-

ления коэффициента теплопередачи, доводки системы охлаждения или прочностной доводки. Недостатком рассмотренных работ является отсутствие в использованных методиках влияния теплозащитного покрытия на тепловое состояние стенок ЖТ. В этих работах присутствуют упрощения на каждом этапе трёхмерного расчёта: упрощение объёмной геометрии КС, конечно-элементной сетки и моделей решателя. Это может повлиять на качественное решение поставленной задачи. Для более детального анализа в работе данные упрощения не будут использованы.

В работе представлены результаты расчётов процессов, протекающих в КС, особенностью которых является возможность учёта сопряжённого теплообмена газового потока со стенками жаровой трубы, в том числе с учётом многослойности

стенок, например, при нанесении теплозащитного покрытия.

Целью работы является доводка системы охлаждения стенок ЖТ для обеспечения её работоспособности.

Поставлены следующие задачи:

1) определение расчётным методом влияния теплозащитного покрытия и его толщины на тепловое состояние стенки ЖТ;

2) доводка расчётным методом системы охлаждения стенок ЖТ.

Методы и инструменты

Предметом исследования является малоэмиссионная КС кольцевого типа. Фронтное устройство содержит 28 лопаточных завихрителей с индивидуальным подводом топлива в каждый. Вторичный воздух подводится через один ряд крупных отверстий во внешней и внутренней обечайке ЖТ. На систему охлаждения приходится суммарно 20 % всего воздуха.

Геометрическая модель расчётной области состоит из трёх тел. Первое тело содержит проточную часть камеры сгорания и служит для расчёта течения газа (рис. 1). Два других тела содержат металлические элементы стенок жаровой трубы и служат для расчёта теплового потока между ними и газом (рис. 2).

При генерации конечно-элементной сетки необходимо учитывать материал стенки жаровой трубы. Особенностью сетки является конформный (узел в узел) интерфейс сетки «газ-металл». Количество элементов по толщине стенки принималось минимум 5. Общее количество элементов – 8,6 миллионов.

На рис. 3 и 4 представлены общие виды конечно-элементных моделей проточной части и стенок ЖТ, а также сетка в сборе вблизи зоны сопряжения, где 1 – кольцевая зона холодного воздуха, 2 – стенка жаровой трубы, 3 – зона горячего газа.

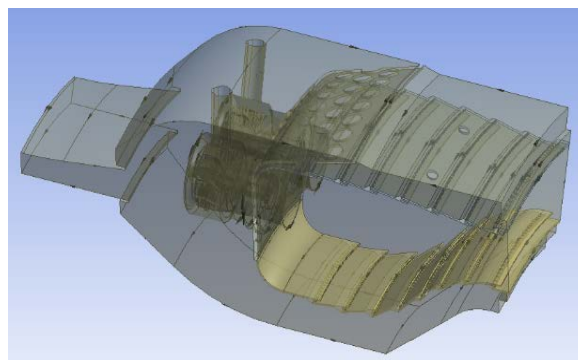


Рис. 1. Геометрическая модель проточной части КС

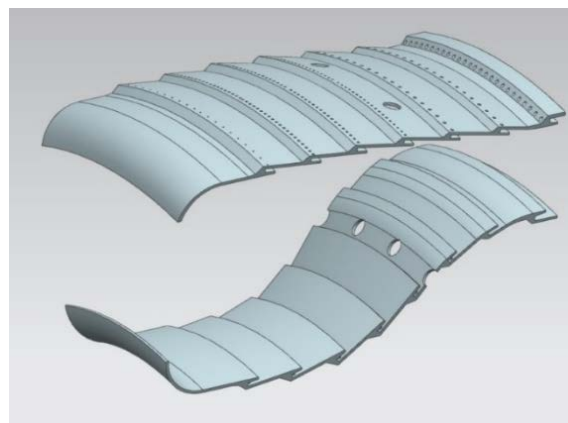


Рис. 2. Геометрическая модель стенок ЖТ

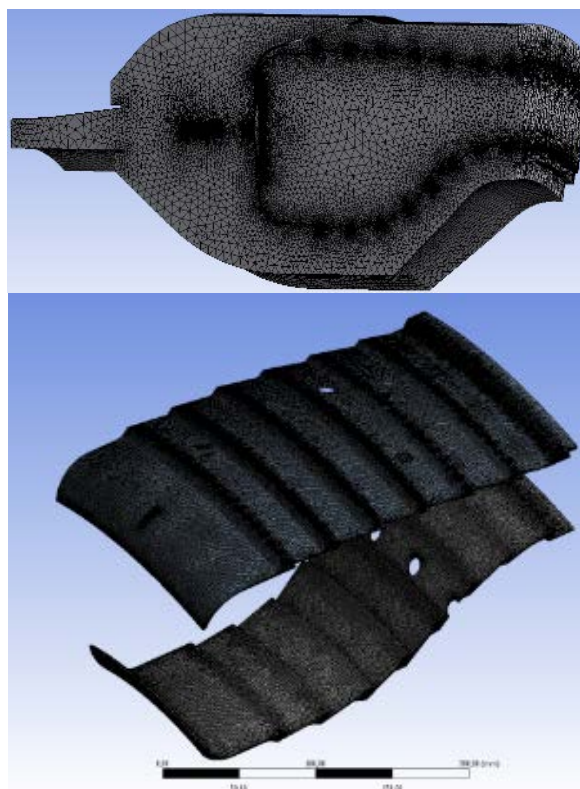


Рис. 3. Конечно-элементная модель КС

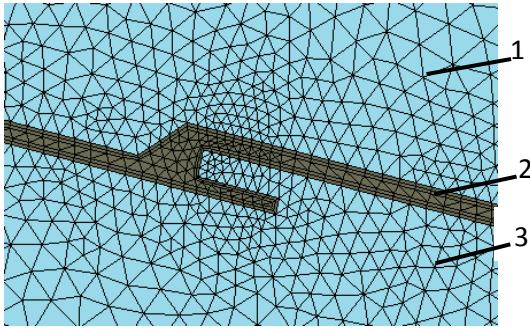


Рис. 4. Сопряжённая конечно-элементная модель КС вблизи стенки ЖТ

Для твёрдотельной области решалось только уравнение энергии. Моделирование процессов турбулентного горения проводилось в нестационарной трёхмерной постановке с решением осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с использованием модели переноса рейнольдсовых напряжений [7].

В качестве топлива был принят метан. Моделью турбулентного горения являлась Flamelet Generated Manifold [8]. Сила тяжести не учитывалась. В расчёте использовался кинетический механизм горения метана GRI 3.0 [9]. Моделировался номинальный по мощности режим работы двигателя. Для расчёта использовалось программное обеспечение Ansys Fluent и суперкомпьютер «Сергей Королёв» [10].

Задавалась зависимость коэффициента теплопроводности λ и свойства материала стенки и ТЗП от температуры T (рис. 5) [11,12].

В качестве материала стенки жаровой трубы был использован жаропрочный сплав ХН50ВМТЮБ-ВИ. Теплозащитное покрытие нанесено на стенки жаровой трубы со стороны «горячей» зоны. Толщина керамического покрытия была принята равной 0,4 мм. ТЗП состоит из интерметаллидного связующего слоя, который содержит в себе элементы материала стенки ЖТ и керамического слоя, и керамического защитного слоя с низким коэффициентом теплопроводности.

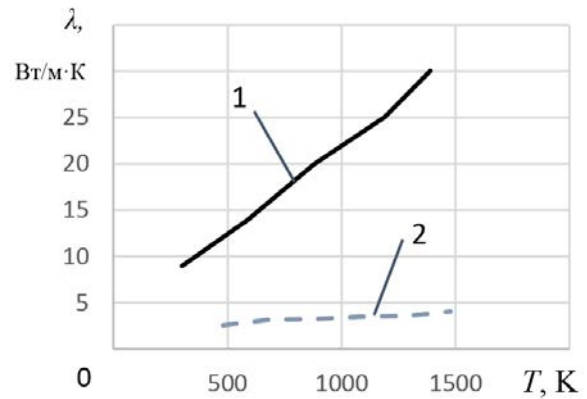


Рис. 5. Теплопроводность стенки ЖТ и керамического покрытия:

1 – материал ЖТ; 2 – керамическое покрытие

Для учёта ТЗП задавались оболочечная поверхность на стенках ЖТ, плотность керамического покрытия, равная 6 т/м^3 , и зависимость изобарной теплоёмкости ТЗП от температуры в диапазоне 473 К до 1473 К. Распространение теплового потока в ТЗП учитывалось только в направлении, перпендикулярном поверхности стенки.

Расчёт проводился в нестационарной постановке. С целью обеспечения устойчивости расчёта и уменьшения времени было принято решение проводить его в четыре этапа (рис. 6).

Различие временных шагов на этапах объясняется масштабностью различных физических процессов: если аэродинамические процессы на данных скоростях потока и теплообмена относительно «медленные», то процессы горения при данных граничных условиях более «быстрые» и имеют временные масштабы на порядки меньше. Расчёт проводился по алгоритму, представленному на рис. 6.

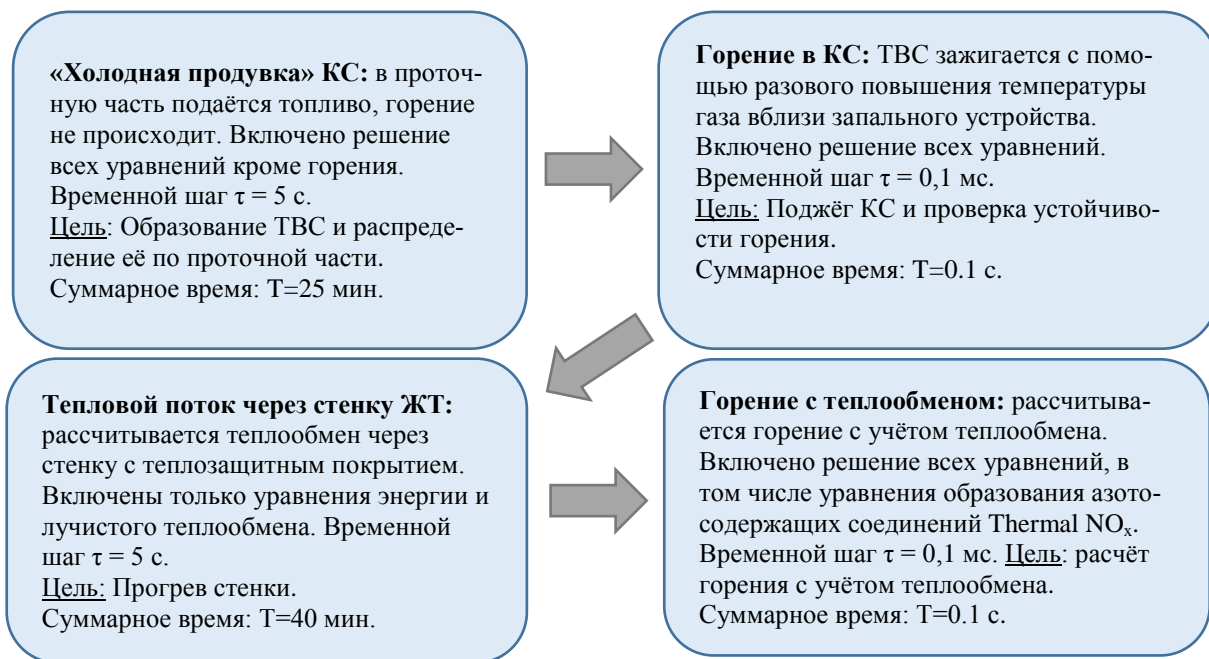


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчёта газодинамических процессов в КС

Результаты и обсуждения

На рис. 7 представлено сравнение изменения температуры по толщине стенки при расчёте с учётом и без учёта ТЗП. Из рисунка видно, что без учёта ТЗП температура стенки выше на 250 К. Использование теплозащитного покрытия позволяет уменьшать неравномерность распределения температуры в стенке ЖТ.

Для трёх различных зон (рис. 8) представлены графики изменения температуры стенок жаровой трубы $T_{ст}$ между горелками по длине $l_{жт}$ КС (рис. 9, 10):

1) в потоке перед ТЗП со стороны «горячей» части характеризует температуру материала теплозащитного покрытия;

2) в теле за ТЗП характеризует температуру металла на границе с ТЗП;

3) внешняя поверхность стенки характеризует температуру металла со стороны кольцевого канала.

Разница между позициями 1 и 2 определяет перепад температуры на ТЗП. Разница между позициями 2 и 3 определяет перепад температуры на металлической части стенки ЖТ.

Максимальный перепад на металлической части стенки составляет порядка

50-70 К для внутренней стенки и 40-50 К для внешней стенки.

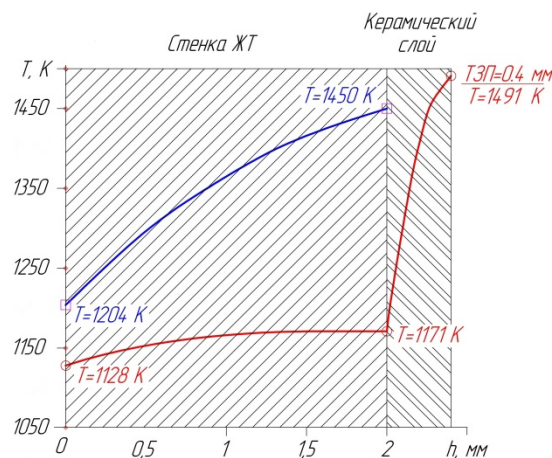


Рис. 7. Сравнение изменения температуры стенки ЖТ с керамическим покрытием и без него

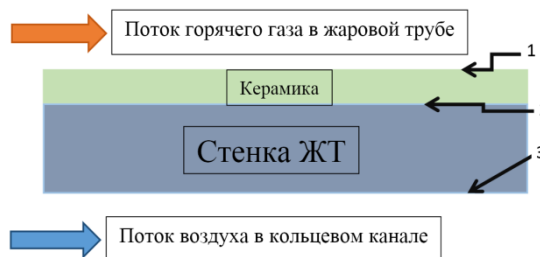


Рис. 8. Схема участков измерения температуры

Основным мероприятием по доводке температурного состояния стенок ЖТ было изменение площадей поясов системы охлаждения. При этом суммарная площадь системы охлаждения оставалась постоянной. Было необходимо снизить температуру стенок до 1150 К. Снижения температуры до этого значения удалось достигнуть только на третьем этапе доводки благодаря увеличению диаметров отверстий перед горячими зонами и уменьшению диаметров отверстий на поясах перед более холодными зонами. На рис. 11, 12 представлено относительное

распределение площадей \bar{F} системы охлаждения исходного варианта КС и после доводки по относительной длине ЖТ \bar{l} . Величина \bar{F} характеризует относительную суммарную площадь системы охлаждения для данного сечения, приведённую к суммарной площади системы охлаждения стенок ЖТ. На рис. 13 представлено изменение температуры внешней и внутренней стенок ЖТ между горелками по длине КС исходного варианта и после третьего этапа доводки системы охлаждения.

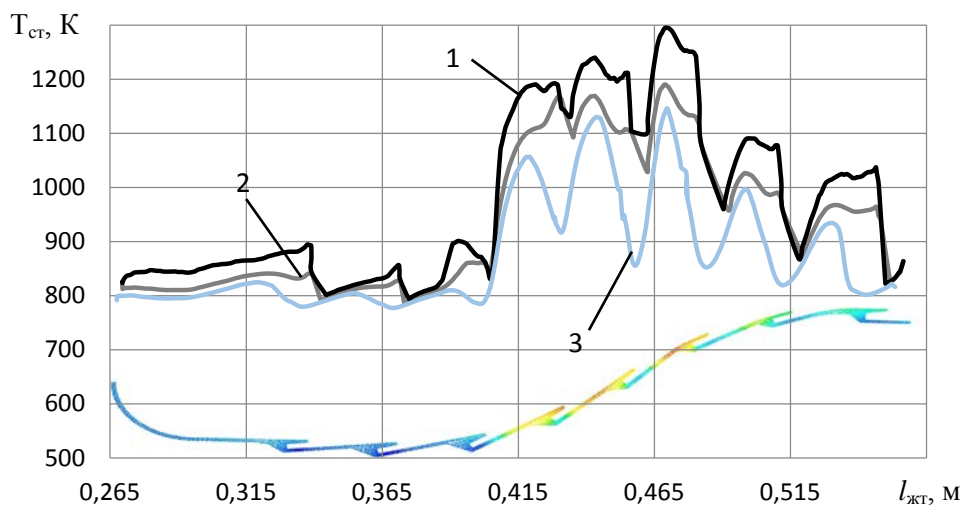


Рис. 9. Распределение температуры на внутренней стенке ЖТ:
1 – в потоке перед ТЗП; 2 – в теле за ТЗП; 3 – внешняя поверхность стенки

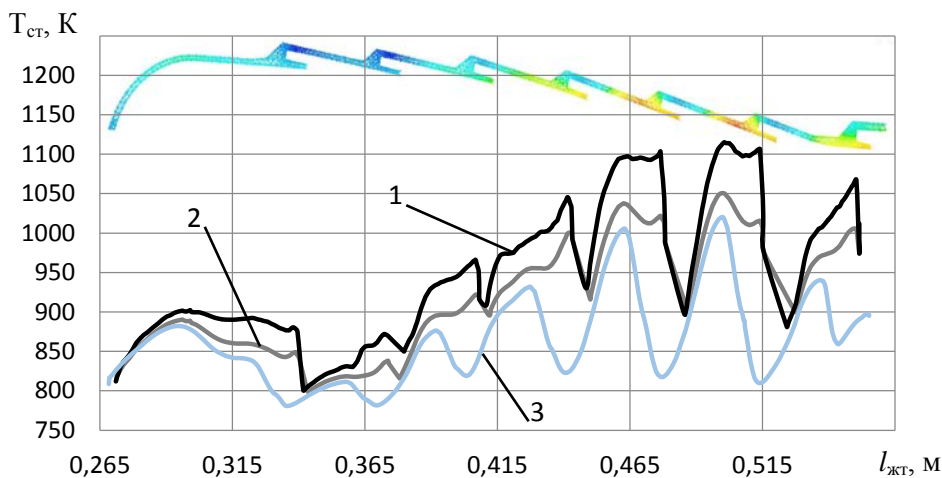


Рис. 10. Распределение температуры на внешней стенке ЖТ:
1 – в потоке перед ТЗП; 2 – в теле за ТЗП; 3 – внешняя поверхность стенки

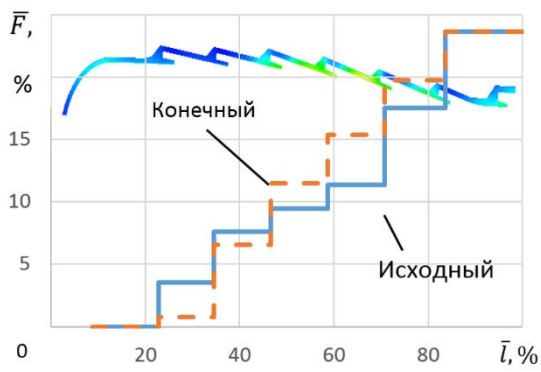


Рис. 11. Распределение относительных площадей поясов системы охлаждения внешней стенки ЖТ

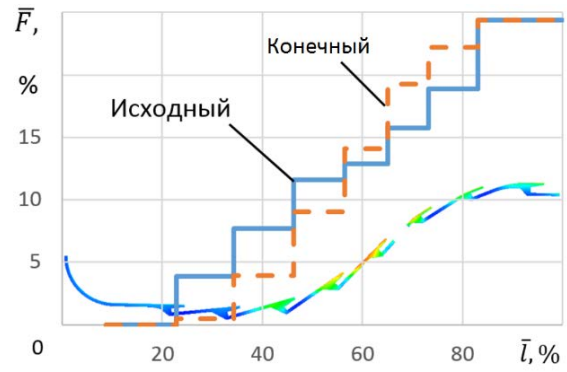


Рис. 12. Распределение относительных площадей поясов системы охлаждения внутренней стенки ЖТ



а



б

Рис. 13. Графики изменения температуры внутренней (а) и внешней (б) стенок по длине КС

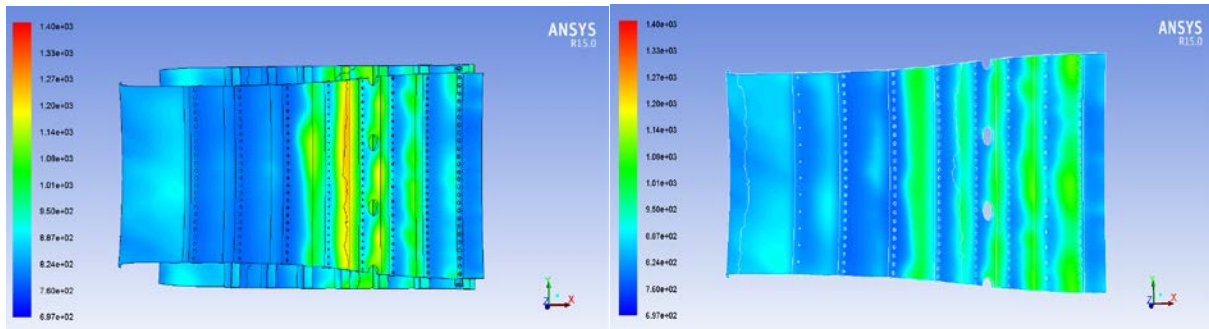


Рис. 14. Распределение температуры на внутренней стенке ЖТ при работе на номинальном режиме работы до и после доводки

За счёт перераспределения площадей отверстий охлаждения удалось увеличить температуру в более холодной области стенки ЖТ и уменьшить – в более горячей зоне. На рис. 14 представлены поля распределения температуры на внутренней стенке ЖТ при работе на номинальном режиме работы двигателя до и после доводки.

Заключение

Результаты расчёта показывают, что после внедрения мероприятий конечного этапа доводки удалось снизить темпера-

туру стенки ниже требуемого уровня для номинального режима работы двигателя.

Расчётным методом определено влияние теплозащитного покрытия на тепловое состояние стенок жаровой трубы.

Методика расчёта может применяться при расчётах камер сгорания различной конфигурации и с использованием различных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления №218 от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777).

Библиографический список

1. Гомзиков Л.Ю. Анализ теплового состояния температурно-нагруженных элементов ГТД на основе трёхмерного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2012. 149 с.
2. Hong Jie, Gao Jinhai, Ma Yanhong, Chen Meng. Local Thermal Buckling Analysis Method of Combustor Liner // Proceeding of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air. 2009. V. 3. P. 1373-1386. doi.org/10.1115/gt2009-59635
3. Andreini A., Facchini B., Mazzei L. Assessment of Aero-Thermal Design Methodology For Effusion Cooled Lean Burn Annular Combustors // Proceeding of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. 2014. V. 5C. doi.org/10.1115/gt2014-26764
4. Yong Kim, Partha Dutta, Hee-Koo Moon, Ram Srinivasan. Experimental and Numerical Investigation of Convective Heat Transfer in a Gas Turbine Can Combustor // Proceeding of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air. 2009. V. 3. P. 1363-1371. doi.org/10.1115/gt2009-59377
5. Andreas Jeromin, Christian Eichler, Berthold Noll, Manfred Algner. Full 3D Conjugate Heat Transfer Simulation and Heat Transfer Coefficient Prediction for the Effusion – cooled Wall of a Gas Turbine Combustor // Proceeding of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air. 2008. V. 4. P. 1747-1756. doi.org/10.1115/gt2008-50422
6. Jun Su Park Namgeon Yun, Hokyuu Moon, Kyung Min Kim, Sin-Ho Kang,

Hyung Hee Cho. Thermal Analysis of Cooling System in a Gas Turbine Transition Piece // Proceeding of ASME Turbo Expo 2011. 2011. V. 5. P. 1915-1924.

doi.org/10.1115/gt2011-45961

7. Launder B.E., Reece G.J. and W. Rodi. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure // Journal Fluid Mechanics. 1975. V. 68, Iss. 3. P. 537-566.

doi.org/10.1017/s0022112075001814

8. Anderson W. and Bonhus D.L. An Implicit Upwind Algorithm for Computing Turbulent Flows on Unstructured Grids // Computers Fluids. 1994. V. 23, Iss. 1. P. 1–21. doi.org/10.1016/0045-7930(94)90023-x

9. A. van Oijen and L.P.H. de Goeij. Modelling of Premixed Laminar Flames Using Flamelet-Generated Manifolds // Combustion Science and Technology. 2000. V. 161, Iss. 1. P. 113–137.

doi.org/10.1080/00102200008935814

10. Суперкомпьютерный центр СГАУ. <http://hpc.ssau.ru>

11. Шалин П. Е. Авиационные материалы. В 9 т. Т. 3. Сплавы на основе тугоплавких металлов. М: ВИАМ, 1989. 566 с.

12. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б. Свойства теплозащитных покрытий, наносимых электронно-лучевой технологией // Новые технологические процессы и надёжность ГТД. Вып. 7. М.: ЦИАМ, 2008. С. 125-144.

Информация об авторах

Матвеев Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: msg@ssau.ru. Область научных интересов: рабочий процесс и методы моделирования камер сгорания ГТД, процессов горения и смесеобразования, химическая кинетика горения.

Анисимов Владислав Михайлович, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vradi@mail.ru. Область научных интересов: моделирование процессов горения в камере сгорания.

Зубрилин Иван Александрович, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени ака-

демика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: zubrilin416@mail.ru. Область научных интересов: применение CAE/CAD-технологий в расчётах процессов горения и турбулентных течений.

Коломзаров Олег Владимирович, магистрант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kolomzarov@gmail.com. Область научных интересов: вычислительная газовая динамика, горение в турбулентных потоках.

Мионов Николай Сергеевич, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: fergus6@yandex.ru. Область научных интересов: моделирование процессов горения в камере сгорания.

**DETERMINATION OF THERMAL STATE AND MODIFICATION
OF THE FLAME TUBE COOLING SYSTEM
WITH THE HELP OF THREE-DIMENSIONAL MODELING METHODS**

© 2015 S. G. Matveev, V. M. Anisimov, I. A. Zubrilin,
O. V. Kolomzarov, N. S. Mironov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The results of calculating the thermal state of the flame tube walls are presented, a gas turbine engine annular combustor taken as an example. The three-dimensional Ansys Fluent simulation package is used. A finite element conjugate model is created. The conformal (node-to-node) interface «gas-to-metal» is a characteristic feature of the grid. The number of elements over the thickness of the wall is taken to be not less than 5. The total number of elements is 8.6 million. The HN50VMYUB-VI heat-resistant alloy is used as the material of the flame tube. A thermal barrier coating (TBC) is deposited on the hot side of the flame tube. The thickness of the ceramic coating is assumed to be equal to 0.4 mm. The thermal barrier coating consists of an intermetallic bonding layer that contains elements of the wall material of the flame tube and ceramics, as well as a ceramic protective layer with low thermal conductivity. The shell surface of the flame tube walls is assigned to take into account the thermal barrier coating. The density of the ceramic coating is 6 t/m^3 , and the dependence of the isobaric heat capacity of the thermal barrier coating on the temperature in the range of 473 K to 1473 K is specified. The distribution of the heat flux in the thermal barrier coating is taken into account only in the direction perpendicular to the surface of the flame tube. The influence of the thermal barrier coating on the flame tube thermal condition is analyzed. Measures have been taken to improve the cooling system of the flame tube. Variations of the temperature of the flame tube along its length are analyzed.

Annular combustion chamber, flame tube cooling system, numerical simulation of a combustion chamber.

References

1. Gomzikov L.Y. *Analiz teplovogo sostoyaniya temperaturno-nagruzhennykh elementov GTD na osnove trekhmernogo modelirovaniya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Analysis of the thermal state of the temperature-loaded elements of GTD based on three-dimensional modeling: thesis of Candidate of Technical Sciences]. Perm, 2012. 149 p.
2. Hong Jie, Gao Jinhai, Ma Yanhong, Chen Meng. Local Thermal Buckling Analysis Method of Combustor Liner. *Proceeding of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air*. 2009. V. 3. P. 1373-1386. doi.org/10.1115/gt2009-59635
3. Andreini A., Facchini B., Mazzei L. Assessment of Aero-Thermal Design Methodology For Effusion Cooled Lean Burn Annular Combustors. *Proceeding of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2014. V. 5C. doi.org/10.1115/gt2014-26764
4. Yong Kim, Partha Dutta, Hee-Koo Moon, Ram Srinivasan. Experimental and Numerical Investigation of Convective Heat Transfer in a Gas Turbine Can Combustor. *Proceeding of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air*. 2009. V. 3. P. 1363-1371. doi.org/10.1115/gt2009-59377
5. Andreas Jeromin, Christian Eichler, Berthold Noll, Manfred Aligner. Full 3D Conjugate Heat Transfer Simulation and Heat Transfer Coefficient Prediction for the Effusion – cooled Wall of a Gas Turbine Combustor. *Proceeding of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air*. 2008. V. 4. P. 1747-1756. doi.org/10.1115/gt2008-50422
6. Jun Su Park Namgeon Yun, Hokyuu Moon, Kyung Min Kim, Sin-Ho Kang, Hyung Hee Cho. Thermal Analysis of Cooling System in a Gas Turbine Transition Piece. *Proceeding of ASME Turbo Expo 2011*. 2011. V. 5. P. 1915-1924. doi.org/10.1115/gt2011-45961
7. Launder B.E., Reece G.J. and W. Rodi. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. *Journal Fluid Mechanics*. 1975. V. 68, Iss. 3. P. 537-566. doi.org/10.1017/s0022112075001814

8. Anderson W. and Bonhus D.L. An Implicit Upwind Algorithm for Computing Turbulent Flows on Unstructured Grids. *Computers Fluids*. 1994. V. 23, Iss. 1. P. 1-21. doi.org/10.1016/0045-7930(94)90023-x

9. A. van Oijen, L.P.H. de Goey. Modelling of Premixed Laminar Flames Using Flamelet-Generated Manifolds // *Combustion Science and Technology*. 2000. V. 161, Iss. 1. P. 113–137. doi.org/10.1080/00102200008935814

10. *Superkomp'yuternyy tseñtr SGAU* [SSAU Supercomputer Center]. <http://hpc.ssau.ru>

11. Shalin R.E. Aviation materials. V.3. Alloys based on refractory metals. M: VIAM Publ., 1989. 566 p.

12. Tamarin Y.A., Kachanov E.B. Properties of thermal barrier coatings applied electron beam technology. *New processes and reliability of GTE*. Iss. 7. Moscow: CIAM Publ., 2008. P. 125-144. (In Russ.)

About the author

Matveev Sergey Gennadyevich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: msg@ssau.ru. Area of Research: combustion, mixing, emissions and formation of hazardous substances, chemical kinetics.

Anisimov Vladislav Mikhaylovich, Master Student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: vradik@mail.ru. Area of Research: modeling of combustion processes in the combustion chamber.

Zubrilin Ivan Aleksandrovich, engineer, Samara State Aerospace University,

Samara, Russian Federation. E-mail: zubrilin416@mail.ru. Area of Research: the use of CAE / CAD-technologies in the calculations of combustion processes and turbulent flows.

Kolomzarov Oleg Vladimirovich, Master Student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: kolomzarov@gmail.com. Area of research: computational fluid dynamics, combustion in turbulent flows.

Mironov Nikolay Sergeevich, undergraduate student, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: fergus6@yandex.ru. Area of Research: modeling of combustion processes in a combustion chamber.