DOI: 10.15593/2224-9982/2019.59.07

УДК 62-9

Е.В. Харлина, А.Д. Морозов, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОЗДУШНО-КЕРОСИНОВОЙ ГОРЕЛКЕ

Для обеспечения максимально возможной полноты сгорания при стехиометрическом соотношении компонентов и высокого ресурса работы горелки требуется качественное перемешивание компонентов, с одной стороны, и организация горения в центральной части горелки с сохранением заданных характеристик рабочего тела на выходе, с другой стороны. Приведены результаты численного моделирования рабочего процесса в объеме высокотемпературной охлаждаемой горелки при стехиометрическом соотношении компонентов воздух + керосин. Для обеспечения устойчивого горения, надежного охлаждения и требуемых параметров на выходе из горелки рассмотрены различные варианты подвода и конструктивные схемы узлов подвода компонентов. В программном комплексе ANSYS CFX решена сопряженная задача теплообмена, которая предусматривает включение в расчетную область зон смешения и горения, огневой стенки и рубашки охлаждения. Проанализированы характеристики течения с горением в рабочем объеме горелки, температурного состояния огневой стенки и рубашки охлаждения. В качестве охладителя используется воздух, который после рубашки охладителя в подогретом состоянии подается в зону смешения и горения. В результате исследований предложены конструктивные схемы подвода воздуха, которые обеспечили смещение фронта пламени от форсуночного блока и основной части огневой стенки. Предложенные мероприятия уменьшают температурные напряжения конструктивных элементов и увеличивают ресурс работы горелки.

Ключевые слова: воздушно-керосиновая горелка, стехиометрическое соотношение, численное моделирование, сопряженная задача теплообмена, огневая стенка, форсуночный блок.

E.V. Kharlina, A.D. Morozov, N.L. Bachev, R.V. Bulbovich

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF THE WORKING PROCESS IN A HIGH-TEMPERATURE AIR-KEROSENE BURNER

To ensure the highest possible completeness of combustion at the stoichiometric ratio and a high operating life of the burner requires a quality mixing of the components, on the one hand, and the organization of combustion in the Central part of the burner while maintaining the specified characteristics of the working fluid at the output, on the other hand. The article presents the results of numerical simulation of the working process in the volume of a high-temperature cooled burner with a stoichiometric ratio of air + kerosene components. To ensure stable combustion, reliable cooling and the required parameters at the exit of the burner considered various options of approach and structural layout of the nodes of the feed components. In the ANSYS CFX software package, the coupled heat transfer problem is solved, which provides for the inclusion of mixing and combustion zones, a fire wall and a cooling jacket in the calculation area. The characteristics of the flow with combustion in the working volume of the burner, the temperature state of the fire wall and the cooling jacket are analyzed. Air is used as a cooler, which, after a cooler jacket, in a heated state, is supplied to the mixing and combustion zone. As a result of the research, constructive air supply circuits were obtained, which ensured the displacement of the flame front from the nozzle block and the main part of the fire wall. The proposed measures reduce the temperature stresses of structural elements and increase the life of the burner.

Keywords: air-kerosene burner, stoichiometric ratio, numerical simulation, coupled heat transfer problem, fire wall, nozzle block.

В процессе разработки высокотемпературной малоэмиссионной горелки при стехиометрическом соотношении компонентов возникают проблемные вопросы по организации устойчивого горения, надежного охлаждения и обеспечения заданных характеристик рабочего тела на выходе из горелки. В работе [1] авторами с использованием газодинамических функций [2] получены режимные и геометрические параметры горелки в составе установки для циклических испытаний образцов с термобарьерными покрытиями.

В работе [3] предложено наружное проточное охлаждение [4, 5] этой горелки с использованием воздуха в качестве охладителя, который в подогретом состоянии подается в зону смешения и горения.

Для уточнения ранее принятых технических решений и разработки рекомендаций по организации устойчивого горения и надежного охлаждения выполнено численное моделирование рабочего процесса и сопряженного теплообмена в высокотемпературной воздушно-керсиновой горелке при различных схемах подвода воздуха через форсуночный блок.

Представленные ниже результаты численного моделирования получены с использованием программного пакета ANSYS.CFX [6–8]. В основу математической модели турбулентного горения, течения и сопряженного теплообмена положены законы сохранения массы, энергии, импульса топливоздушной смеси с применением к-ε-модели турбулентности. Схема задания граничных условий представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схема задания граничных условий: 1 – условия входа окислителя; 2 – условия входа топлива; 3 – условия стенки; 4 – условия выхода

В таблице приведены исходные данные для численного моделирования, полученные ранее в процессе гидрогазодинамических расчетов [1, 3].

Исходные данные для численного моделирования

№ п/п	Параметр	Размерность	Величина
1	Расход окислителя	кг/с	0,220
2	Расход топлива	кг/с	0,015
3	Суммарный расход	кг/с	0,235
4	Полное давление	МПа	0,44
5	Статическое давление на выходе	МПа	0,3
6	Полная температура	К	2321
7	Статическая температура на выходе	К	2182
8	Температура подачи топлива	К	288
9	Температура подачи воздуха	К	673

Конструктивная схема № 1

На рис. 2 представлены схема струйно-кольцевой форсунки (см. рис. 2, а) [9, 10] и объемная модель воздушно-керсиновой горелки (см. рис. 2, б). Конструкция форсунки предусматривает предварительное перемешивание топлива и окислителя внутри форсунки и впрыск смеси под углом от 20°–25° относительно ее оси.

Рис. 2. Объемная модель горелки конструктивной схемы № 1

На рис. 3 представлено температурное поле по объему горелки.

Рис. 3. Температурное поле по объему горелки конструктивной схемы № 1

Анализ рис. 3 показывает, что горение топливоздушнoй смеси происходит по всему объему камеры. Температура газа в пристеночных областях достигает 2350 К, что потребует больших затрат на организацию охлаждения конструктивных элементов с целью обеспечения заданного ресурса.

Конструктивная схема № 2

В результате анализа данных численного моделирования было принято решение о размещении в форсуночном блоке дополнительных периферийных струйных форсунок для подвода окислителя в горелку при неизменном суммарном расходе окислителя.

На рис. 4 представлен форсуночный блок и объемная модель горелки с периферийными форсунками окислителя.

Рис. 4. Форсуночный блок и объемная модель горелки конструктивной схемы № 2

На рис. 5 представлено температурное поле по объему горелки при подводе окислителя по схеме № 2.

Рис. 5. Температурное поле по объему горелки конструктивной схемы № 2

Анализ рис. 5 показал, что рассматриваемый форсуночный блок обеспечивает отвод фронта пламени от конструктивных элементов и позволяет снизить температуру в области форсуночного блока до 1430 К, однако не обеспечивает необходимого снижения значений температуры в пристеночной зоне. Кроме того, наблюдаются колебания фронта пламени, что приводит к неравномерному нагреву огневой стенки по длине горелки.

Конструктивная схема № 3

По сравнению с конструктивной схемой № 2, предлагается установка второго ряда струйных форсунок окислителя, расположенных параллельно периферийным форсункам. Для демпфирования колебаний фронта пламени было предложено установить кольцо, что будет способствовать удержанию пламени по центру горелки [11, 12].

На рис. 6 представлен форсуночный блок с трехрядной системой подачи окислителя и демпфирующим кольцом.

Рис. 6. Форсуночный блок и объемная модель горелки конструктивной схемы № 3

На рис. 7 представлено температурное поле по объему горелки при подводе окислителя по схеме № 3.

Анализ рис. 7 позволяет сделать вывод о создании низкотемпературного пристеночного слоя в области форсуночного блока и части стенок камеры сгорания. Это в полной мере удовлетворяет требованиям по обеспечению заданных режимных параметров воздушно-керсиновой горелки.

Рис. 7. Температурное поле по объему горелки конструктивной схемы № 3

Конструктивная схема № 4

Для обеспечения максимальной температуры огневой стенки горелки не более чем 1300 К необходимо применение наружного противоточного воздушного охлаждения стенок горелки.

В конструктивной схеме № 4 форсуночный блок остается неизменным, но предполагается наличие «гладкой» рубашки охлаждения между кожухом и огневой стенкой. Окислитель, нагретый в рубашке охлаждения, через форсуночный блок подается в зону горения, повышая эффективность работы горелки.

На рис. 8 показана объемная модель воздушно-керосиновой горелки конструктивного варианта № 4.

Рис. 8. Объемная модель горелки конструктивной схемы № 4

На рис. 9 представлено температурное поле по объему горелки конструктивной схемы № 4, полученное в результате численного решения сопряженной задачи теплообмена [13–15].

Рис. 9. Температурное поле по объему горелки конструктивной схемы № 4

Анализ результатов численного моделирования на рис. 9 показал, что применение воздушного охлаждения способствует уменьшению температуры большей части стенок камеры сгорания ниже предельных 1300 К. Однако для надежного охлаждения конфузорной части горелки необходимо интенсифицировать теплообмен в этой области.

Конструктивная схема № 5

Данная конструктивная схема предполагает наличие ребер в рубашке охлаждения на конфузорной части горелки. Подвод охлаждающего воздуха осуществляется симметрично с использованием конфузорной части в качестве коллектора.

На рис. 10 представлена объемная модель воздушно-керсиновой горелки с поперечными ребрами в кофузорной части рубашки охлаждения.

Рис. 10. Объемная модель горелки конструктивной схемы № 5

На рис. 11 представлено температурное поле по объему охлаждаемой горелки, полученное в результате численного решения сопряженной задачи теплообмена.

Рис. 11. Температурное поле по объему горелки конструктивной схемы № 5

Анализ данных на рис. 11 показал, что установка оребрения позволяет снизить температуру стенки конфузора до 960 К. Данный факт свидетельствует о работоспособности и обеспечении длительного ресурса предложенной конструкции.

Таким образом, результаты численного моделирования показали, что усовершенствованный форсуночный блок позволяет повысить эффективность и надежность наружного проточного охлаждения воздушно-керосиновой горелки при стехиометрическом горении компонентов.

Библиографический список

1. Выбор геометрических и режимных параметров керосино-воздушной горелки в составе установки для испытаний термобарьерных покрытий / Е.В. Бояршинова, Н.Л. Бачев, О.О. Матюнин, Р.В. Бульбович // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 49. – С. 95–102.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1989. – 824 с.
3. Бояршинова Е.В., Бачев Н.Л., Бульбович Р.В. Охлаждение воздушно-керосиновой горелки в составе установки для испытаний для термобарьерных покрытий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 58. – С. 5–15.
4. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 452 с.
5. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей / Г.Г. Гахун [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 424 с.
6. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство / ООО «Бином-Пресс». – М., 2004. – 448 с.
7. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в Ansys Workbench: учеб.-метод. пособие для студ. естеств.-науч. дисциплин. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с.
8. САЕ-моделирование рабочего процесса газогенератора ГТД в программном комплексе Ansys CFX: электрон. учеб. пособие / М.Ю. Орлов, О.В. Батурин, Л.С. Шаблий, А.В. Кривцов, С.С. Матвеев, В.С. Зинковский, Д.А. Колмакова, Г.М. Попов; Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2012. – URL: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-posobiya/CAEmodelirovanie>

rabochego-processa-gazogenerators-GTD-v-programmnom-komplekse-Ansys-CFX- Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54318/1/%D0%9E%D1%80%D0%BB%D0%BE%D0%B2%20%D0%9C.%D0%AE.%20CAE%20-%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5.pdf (дата обращения: 25.11.2019).

9. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 368 с.

10. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – 220 с.

11. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. – М.: Наука, 1986. – 290 с.

12. Неустойчивость горения в ЖРД / под ред. Д.Т. Харрье, Ф.Р. Рирдона. – М.: Мир, 1975. – 869 с.

13. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. – 659 с.

14. Сударев А.В., Антоновский В.И. Камеры сгорания газотурбинных установок. Теплообмен. – Л.: Машиностроение, 1985. – 272 с.

15. Кошкин В.К. Основы теплопередач в авиационной и ракетно-космической технике. – М.: Машиностроение, 1975. – 624 с.

References

1. Boyarshinova E.V., Bachev N.L., Matyunin O.O., Bulbovich R.V. Vibor geometricheskikh i regimnih parametrov kerosino-vozdushnoy gorelki v sostave ustanovki dlya ispitaniy termobariernih pokritiy [Selection of geometric and regime parameters of the kerosene-air burner in the composition of the stand for testing thermo-barrier coatings]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2017, no. 49, pp. 95-102.

2. Abramovich G. N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1989, 824 p.

3. Boyarshinova E.V., Bachev N.L., Bulbovich R.V. Ohlagdenie vozdushno-kerosinovoy gorelki v sostave ustanovki dlya ispitaniy termobariernih pokritiy [Cooling system of the air-kerosene burner in the composition of the stand for testing thermo-barrier coatings] PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2017, no. 58, p. 5-15.

4. Dobrovolskiy M.V. Gidkostnie raketnie dvigateli [Liquid rocket engines]. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman, 2005, 452 p.

5. Gakhun G. G., etc. Konstruktsiya i proektirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley [Design and design of liquid rocket engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 424 p.

6. Prokhorenko V.P. SolidWorks. Prakticheskoye rukovodstvo [SolidWorks. A practical guide]. Moscow: JSC «Binom – Press», 2004, 448 p.

7. Ivanov D.V., Dol A.V. Vvedeniye v Ansys Workbench: Ucheb. – metod. posobiye dlya studentov yestestvenno – nauchnykh distsiplin [Introduction to Ansys Workbench: Textbook. -method. allowance for students of natural - scientific disciplines]. Saratov: Amirit, 2016, 56 p.

8. Orlov M.Yu., Baturin O.V., Shabliy L.S., Krivtsov A.V., Matveyev S.S., Zinkovskiy V.S., Kolmakova D.A., Popov G.M. CAE – modelirovaniye rabochego protsessa gazogenerators GTD v programmnom komplekse Ansys CFX [Elektronnyi resurs] [Modeling the work process of a gas turbine engine generator in the Ansys CFX software package]. Samara, 2012. URL: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-posobiya/CAEmodelirovanie-rabochego-processa-gazogenerators-GTD-v-programmnom-komplekse-Ansys-CFX-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-posobie-54318/1/%D0%9E%D1%80%D0%BB%D0%BE%D0%B2%20%D0%9C.%D0%AE.%20CAE%20-%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5.pdf> (Application date: 25.11.2019).

9. Inozemtsev A.A., etc. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Bases of designing of aviation engines and power stations]. Moscow, 2008, vol. 2, 368 p.

10. Mingazov B.G. Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley [Combustion chambers of gas-turbine engines]. Kazan state technical university, 2006, 220 p.

11. Kuznetsov V.R., Sabelnikov V.A. Turbulentnost i gorenije [Turbulence and burning]. Moscow: Nauka, 1986, 290 p.

12. Neustoychivost gorenija v ZHRD [The instability of combustion in the rocket engine]. Edited by D.T. Kharrie, F.R. Rirdon. Moscow: Mir, 1975, 869 p.

13. Kutateladze S.S. Osnovi teorii teploobmena [Basics of heat transfer theory]. Novosibirsk: Nauka, 1970, 659 p.

14. Sudarev A.V., Antonovsky V. I. Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh ustanovok. Teploobmen [Combustion chambers of gas-turbine installations. Heat exchange]. Leningrad: *Mashinostroenie*, 1985, 272 p.

15. Koshkin V.K. Osnovi teploperedach v aviacionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike [Basics of heat transfer in aviation and rocket and space technology]. Moscow: *Mashinostroenie*, 1975, 624 p.

Об авторах

Харлина Екатерина Владимировна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: katerinka_bev@mail.ru).

Морозов Андрей Дмитриевич (Пермь, Россия) – инженер кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: andrew_winter@mail.ru).

Бульбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bulbovich@pstu.ru).

Бачев Николай Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bnl54@yandex.ru).

About the authors

Ekaterina V. Kharlina (Perm, Russian Federation) – PhD Student of Rocket and Space Technology, Generating Units Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: katerinka_bev@mail.ru).

Andrey D. Morozov (Perm, Russian Federation) – Engineer of Rocket and Space Technology, Generating Units Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: andrew_winter@mail.ru).

Roman V. Bulbovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Rocket and Space Technology, Generating Units Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bulbovich@pstu.ru).

Nikolay L. Bachev (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Docent of Rocket and Space Technology, Generating Units Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bnl54@yandex.ru).

Получено 26.11.2019