

Экспериментальное исследование рабочего процесса в камере сгорания мобильного теплогазогенератора

© А.В. Новиков, Е.А. Андреев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В различных отраслях промышленности широко применяют теплогазогенераторы. Их используют, например, при работе сушильных установок, утилизации вредных отходов, производстве строительных материалов. В настоящее время возникла необходимость в создании мобильных теплогазогенераторов, пригодных к транспортировке и быстрому развертыванию в полевых условиях. Цель комплекса работ, проведенных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, — производство цельнометаллических теплогазогенераторов для использования их в сушильных агрегатах. При этом реализован накопленный опыт по разработке камер сгорания ракетных и воздушно-реактивных двигателей. Разработана методика расчета распределения основных параметров рабочего процесса, протекающего в камере сгорания мобильного теплогазогенератора на компонентах топлива воздух — природный газ: методами численного моделирования выбрана оптимальная схема смесеобразования; получены расчетные поля температуры продуктов сгорания и концентрации компонентов топлива в объеме камеры сгорания. Для подтверждения корректности проведенных расчетов и практической реализации рабочего процесса был спроектирован и экспериментально исследован теплогазогенератор. Сравнение расчетных и опытных данных показало удовлетворительную сходимость результатов.

Ключевые слова: теплогазогенератор, сушильные агрегаты, воздух, метан, камера сгорания

Введение. Теоретические и экспериментальные исследования, направленные на создание компактных и высокоэффективных устройств, имеют большое практическое значение. Определяющее влияние на эффективность теплогазогенераторов (ТГГ), а именно на массогабаритные характеристики и полноту сгорания, оказывает организация рабочего процесса сгорания горючего в воздухе — схема смесеобразования и соотношение компонентов [1–3]. Кроме того, требования обеспечения надежности и продолжительного рабочего ресурса обуславливают необходимость определенного распределения температур в проточной части. Цель настоящей работы — экспериментальное подтверждение характеристик распределенной схемы смесеобразования, выбранной в рамках теоретических исследований.

Выбор схемы смесеобразования и полученные распределения параметров потока. Исходными данными для экспериментального исследования послужило численное моделирование процесса в мобильном ТГГ по методике [4, 5], в основе которой лежат апробированные подходы [2, 6–11]. Были рассмотрены и проанализированы

две альтернативные схемы смесеобразования, различающиеся способом подачи воздуха в камеру сгорания. В первом случае весь воздух подается через периферийную щель, а метан, служащий горючим, — через центральное отверстие. Во втором случае (рис. 1) основная часть воздуха (~70 %) также подается через периферийную щель А, а оставшаяся часть — в камеру сгорания (КС) ТГГ через центральное отверстие Б. Горючее поступает в зону горения через равномерно расположенные по окружности В отверстия. Между центральным отверстием Б и поясом В предусмотрена цилиндрическая вставка длиной L и внутренним диаметром D .

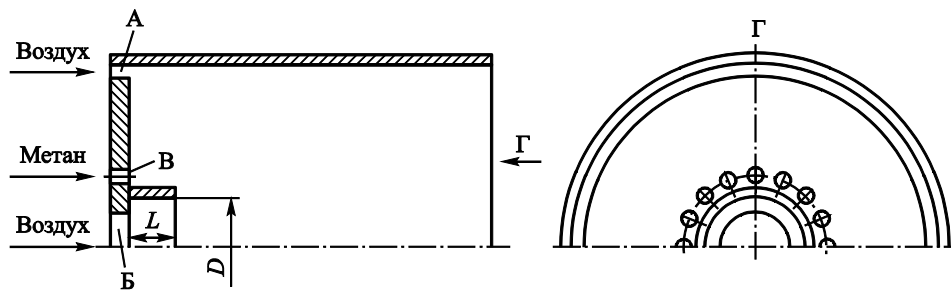


Рис. 1. Схема смесеобразования с распределенной подачей воздуха

Именно такая схема, как показал проведенный параметрический анализ, имеет существенные преимущества перед подачей всего воздуха по периферии. На рис. 2 приведены соответственно распределения функции тока ψ , концентрации метана Z_{CH_4} и температуры рабочего тела T_{pc} по объему КС для схемы, показанной на рис. 1.

Как следует из данных на рис. 2, а, вблизи переднего торца зоны горения образуются мощные вихри, которые обеспечивают устойчивый фронт пламени. Концентрация горючего приближается к нулю уже на расстоянии $\sim 0,5L_{\text{КС}}$ (рис. 2, б), что свидетельствует о полном сгорании метана в зоне горения. Расчетное распределение температуры рабочего тела по объему КС приведено на рис. 2, в.

Экспериментальное исследование выбранной схемы смесеобразования. Для подтверждения полученных расчетных зависимостей был создан экспериментальный образец, схема и основные конструктивные размеры которого представлены на рис. 3. При этом основные технические требования, предъявляемые к конструкции ТГГ на этапе проектирования и испытаний, были следующие:

- температура стенок КС должна быть ниже допустимой для данного материала;
- содержание вредных примесей на выходе из ТГГ должно соответствовать ГОСТ Р 50591–93;

- распределение температуры по поперечному сечению на выходе из зоны смешения ТГГ должно быть по возможности равномерным;
- на выходе из ТГГ должно иметь место практически полное сгорание природного газа.

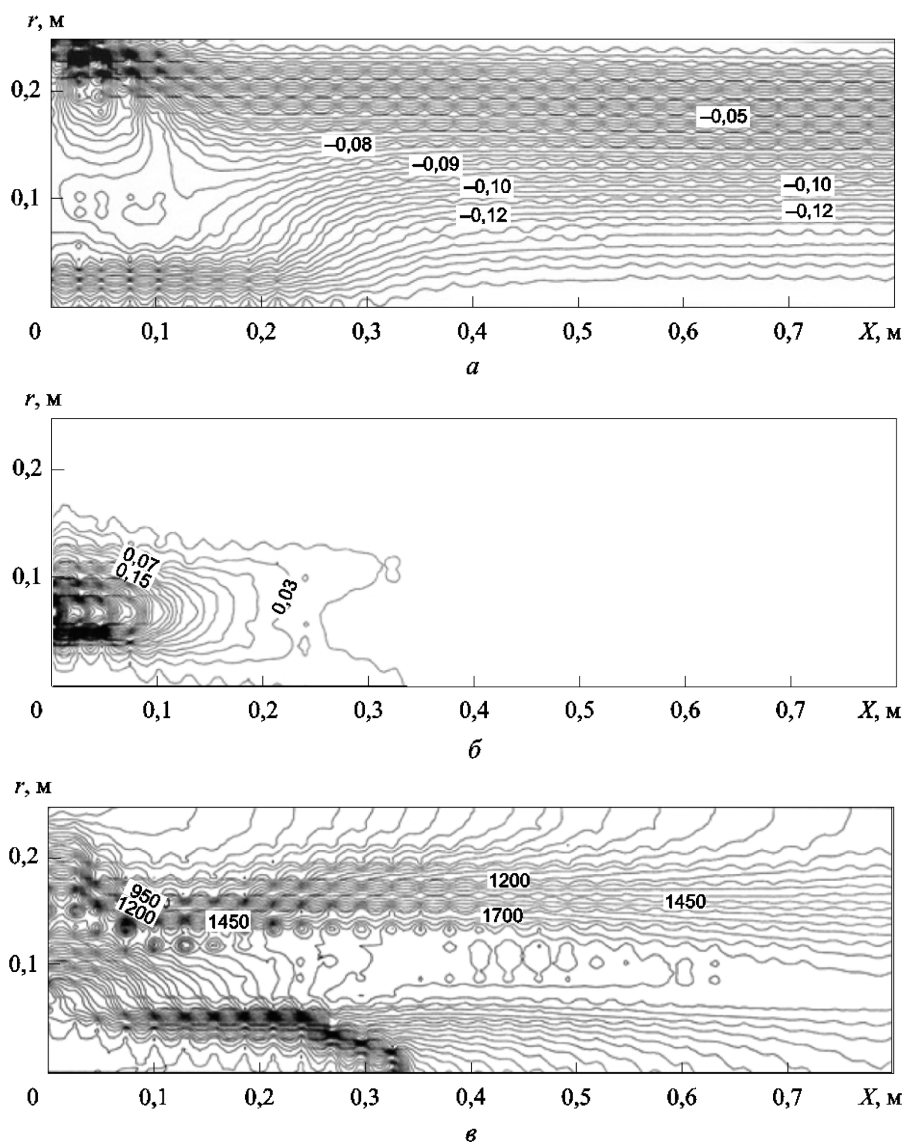


Рис. 2. Результаты расчета:

a — распределение функции тока ψ по объему КС; b — распределение концентрации метана по объему КС Z_{CH_4} ; v — распределение температуры рабочего тела T_{nc} по объему КС; r, X — соответственно радиус и длина расчетной области

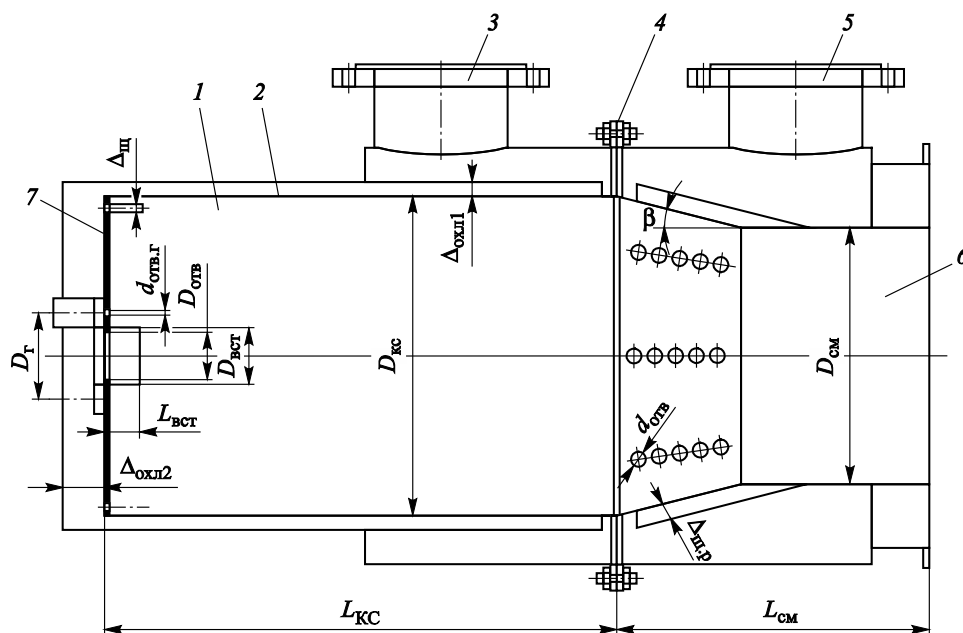


Рис. 3. Схема и основные конструктивные размеры теплогазогенератора:

1 — зона горения; 2 — внутренний узел; 3, 5 — патрубки; 4 — фланцевое соединение; 6 — зона смешения; 7 — передняя стенка внутренней части зоны горения; D_{KC} , D_{CM} , L_{KC} , L_{CM} — соответственно диаметры и длины камер сгорания и смешения; $D_{вст}$, $L_{вст}$ — соответственно диаметр и длина вставки для подачи воздуха; $D_{отв}$ — внутренний диаметр канала вставки; $D_{Г}$ — диаметр участка вставки, на котором осуществляется ввод горючего через $n_{отв,Г}$ отверстий диаметром $d_{отв,Г}$ каждое; $\Delta_{охла1}$, $\Delta_{охла2}$ — соответственно размеры охлаждающих зазоров на головке КС и по боковым стенкам; $n_{отв}$ — число отверстий диаметром $d_{отв}$ с шагом $\Delta_{щ,р}$ для подачи воздуха в зону смешения; $\Delta_{щ}$ — линейный размер щели для подачи воздуха по периферии КС; β — угол конусности камеры смешения

Двухзонный ТГГ имеет зоны горения 1 и смешения 6 (см. рис. 3). Последняя предназначена для подачи в нее рециркулята или воздуха в целях снижения температуры на выходе из ТГГ. Геометрические размеры зоны горения были выбраны на основании анализа результатов проведенных расчетов и модельных испытаний выбранной схемы [8, 9] с последующим пересчетом на натурные условия. При выборе был учтен опыт работы с подобными изделиями с двухзонной подачей компонентов топлива на кафедре «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Обе зоны имеют наружное регенеративное охлаждение стенок воздухом. В обоих случаях $n_{отв,Г} = 48$.

Основные размеры зоны горения, мм: D_{KC} — 500; L_{KC} — 800; $D_{отв}$ — 84; $D_{вст}$ — 98; $L_{вст}$ — 47; $\Delta_{щ,р}$ — 6,9; $D_{Г}$ — 135; $d_{отв,Г}$ — 6,2; $\Delta_{охла1}$ — 25; $\Delta_{охла2}$ — 50.

Основные размеры зоны смешения: D_{CM} — 400 мм; L_{CM} — 700 мм; $d_{отв}$ — 20 мм; $\Delta_{щ,р}$ — 10 мм; $\Delta_{щ}$ — 10 мм; β — 15...20°.

Подвод воздуха в зону горения осуществляется через патрубок 3, подвод воздуха или рециркулята в зону смешения — через патрубок 5 (см. рис. 3). Зоны 1 и 6 выполнены в виде отдельных блоков (горения и смешения), соединенных между собой с помощью фланцевого соединения 4. При этом внутренний узел 2 зоны горения 1 может быть съемным и заменяемым, что позволяет увеличить ресурс ТГГ.

Технические характеристики экспериментального образца ТГГ приведены ниже:

| | |
|---|------------------------|
| Компоненты топлива | воздух + природный газ |
| Давление в камере ТГГ p_k , Па | $1 \cdot 10^5$ |
| Номинальный расход природного газа в нормальных условиях m_g , м ³ /ч | 100 |
| Производительность дутьевого вентилятора в нормальных условиях m , м ³ /ч | 4500–11000 |
| Коэффициент избытка окислителя α | 2,0 |
| Максимальная температура внутренних стенок ТГГ, К..... | 1073 |
| Температура рабочего тела на выходе из ТГГ, К..... | 753–1073 |

На выходе ТГГ должен обеспечивать максимальное перемешивание продуктов сгорания топлива и рециркулята и максимально равномерное распределение температур по поперечному сечению. В процессе экспериментальных исследований вместо природного газа был использован метан (в баллонах $V = 0,04 \text{ м}^3$, $p = 15 \text{ МПа}$).

Подача воздуха в натуральных условиях осуществлялась вентилятором, тогда как при проведении испытаний был использован эквивалентный расход воздуха из баллонной батареи.

Работы выполняли на стенде, предназначенном для проведения исследовательских и доводочных испытаний цельнометаллических ТГГ. Пневмогидравлическая система стенда (ОСТ 92-0039–74) приведена на рис. 4.

Воспламенение топлива осуществляется от агрегата зажигания с электроискровой свечой. Функционирование стенда обеспечивают следующие основные системы:

- система подачи сжатого воздуха;
- система подачи метана;
- система принудительной вентиляции отсеков стенда;
- система управления двигателем и стендом, включающая в себя устройства запуска, останова и оперативного управления;
- системы визуального контроля, предупредительной сигнализации, громкоговорящей и телефонной связи;
- система измерений, состоящая из первичных преобразователей и датчиков измерительных цепей, линий связи, регистрирующей аппаратуры и т. д.

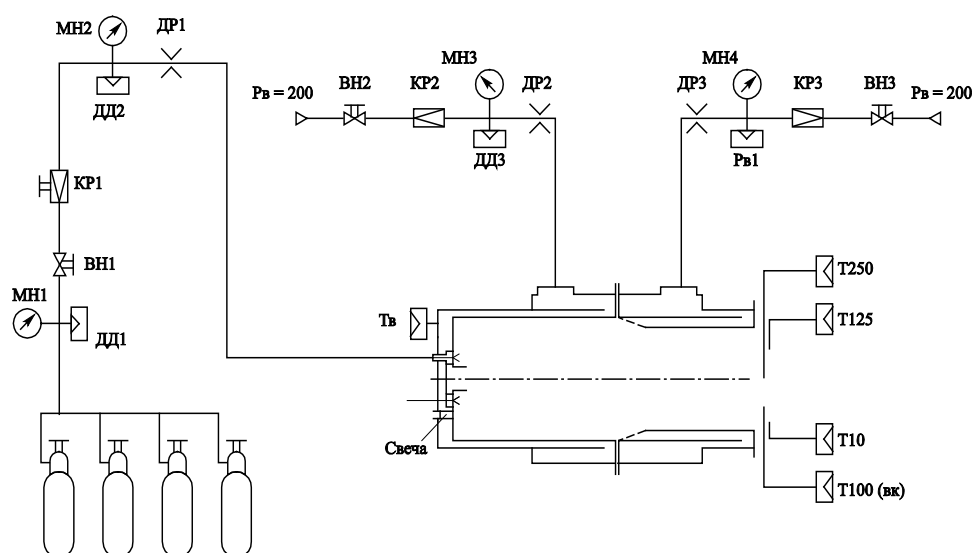


Рис. 4. Пневмогидравлическая система стенда

Система измерений для испытаний описанного ТГГ состоит из регистраторов разных типов и усилительной аппаратуры, расположенной в стендовом корпусе, а также кабельных линий связи и группы датчиков определенного назначения. В зависимости от программы при испытаниях ТГГ одновременно регистрировалось до 15 параметров, таких как давление в подающих магистралях подачи компонентов топлива и агрегатах стенда; перепады давлений на разных участках магистралей и ТГГ; изменения температуры компонентов в системах подачи, элементов конструкции, выходящих продуктов сгорания.

Установка термодпар на выносных элементах обеспечивала измерение температур в локальных точках ядра потока и соответствующее определение профилей этих температур. Измерение профилей температур продуктов сгорания осуществлялось при испытаниях ТГГ на выходе как из зоны смешения, так и из зоны горения. Для измерения профилей температур продуктов сгорания, выходящих из зоны горения, зону смешения отстыковывали и термодпары устанавливали на срезе зоны горения. Такое решение позволило подтвердить расчетное распределение температур (см. рис. 2, в).

Общий вид ТГГ в процессе испытаний приведен на рис. 5. Испытаниям подвергались отдельно как зоны горения, так и ТГГ с зоной горения и зоной теплообмена (зона смешения).

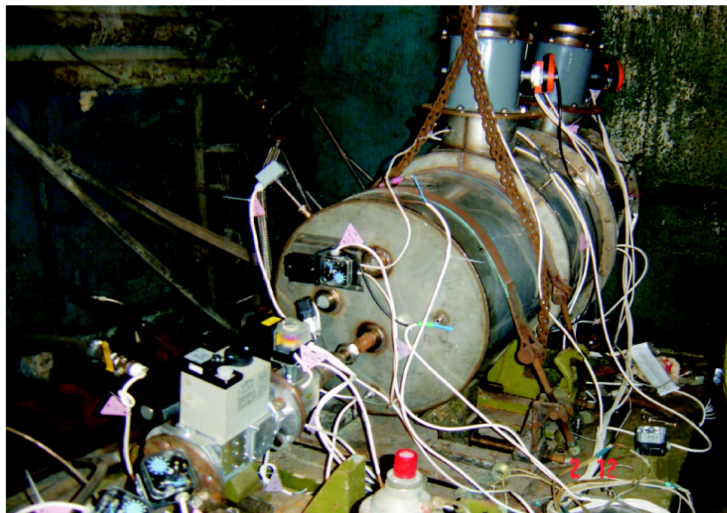


Рис. 5. Теплогазогенератор в процессе испытаний

Основные задачи испытаний:

- проверка надежности выхода на режим и стабильной работы на режиме;
- экспериментальное определение распределения температур в выходном сечении ТГГ и сравнение его с расчетным;
- проверка возможности поддержания заданной температуры на выходе из зоны теплообмена за счет изменения расхода воздуха в эту зону;
- экспериментальное определение равномерности распределения температуры по поперечному сечению на выходе из зоны смешения $T_{\text{вых}}$ и сравнение средней температуры $T_{\text{вых.ср}}$ с термодинамической.

В процессе испытаний измеряли следующие параметры:

- давление перед сужающими устройствами;
- распределение температур рабочего тела по поперечному сечению на выходе;
- температуру подогреваемого воздуха на входе в форсуночную головку;
- перепад давлений на форсуночной головке (с помощью визуального уровнемера).

Характерное изменение давлений перед сужающими устройствами показано на рис. 6.

После каждого эксперимента по полученным значениям расходов подаваемых метана и воздуха в зону горения и зону смешения по методике, изложенной в [1], рассчитывали распределение параметров по объему зоны горения и тепловое состояние конструкции. Полученные результаты анализировали путем сравнения экспериментальных и расчетных данных.

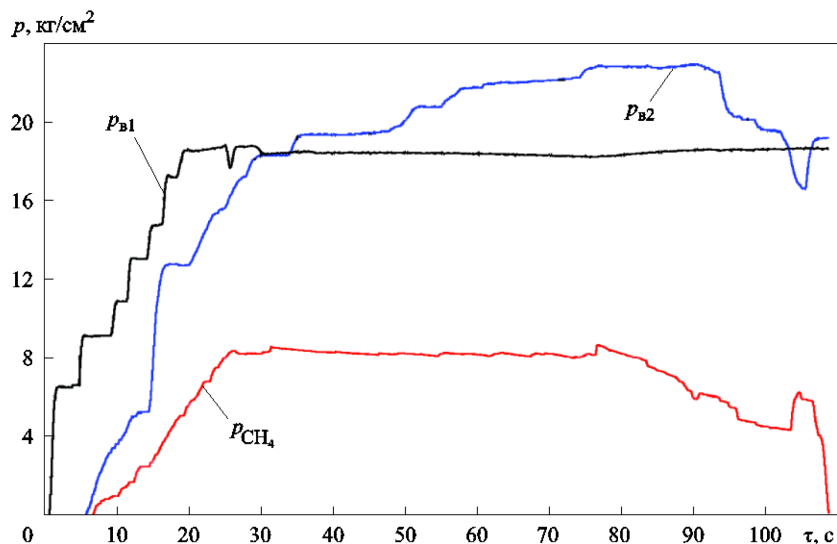


Рис. 6. Изменение давлений воздуха $p_{в1}$, $p_{в2}$ и метана p_{CH_4} перед сужающими устройствами

Основные результаты, полученные при испытаниях ТГГ только с зоной горения для разных значений коэффициента избытка окислителя α , представлены на рис. 7.

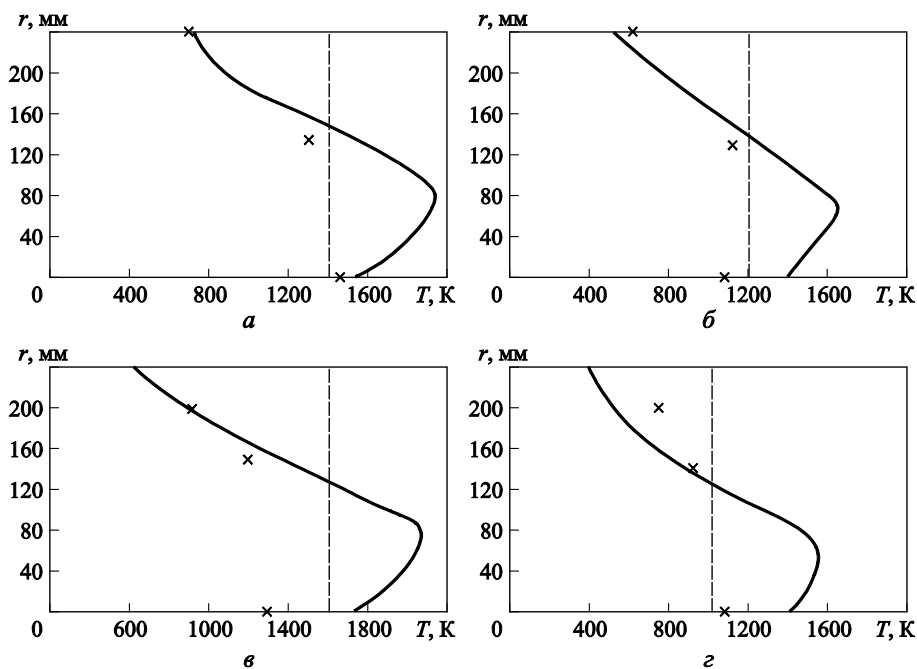


Рис. 7. Расчетное и экспериментальное распределение температуры T по поперечному сечению r на выходе из камеры сгорания ТГГ:
 a — $\alpha = 2,12$; $б$ — $\alpha = 3,0$; $в$ — $\alpha = 2,0$; $г$ — $\alpha = 3,34$; — — — расчет;
 \times — эксперимент; - - - — среднее расчетное значение T

Как следует из приведенных на рис. 7 результатов, имеется удовлетворительная сходимости экспериментальных и расчетных данных по распределению температур рабочего тела по поперечному сечению на выходе из зоны горения и по температуре подогрева воздуха на входе в форсуночную головку, что подтверждает правомерность использования методики [1] на этапе предварительного проектирования ТГГ.

Основные результаты, полученные при испытаниях ТГГ, который оснащен зонами горения и смешения, следующие: давление на входе в зону горения $p_{в1}$ — 1,92 МПа; давление на входе в зону смешения $p_{в2}$ — 1,9 МПа; расход воздуха на входе в зону горения $\dot{m}_{в1}$ — 790 г/с; расход воздуха на входе в зону смешения $\dot{m}_{в2}$ — 25 г/с; коэффициент избытка окислителя в зоне горения α_1 — 1,91, коэффициент избытка окислителя в зоне смешения α_2 — 3,83; перепад давления на воздушных форсунках $\Delta p_{ф.в}$ — 0,043 кг/см²; температуры от стенки до места расположения термопары при разных расстояниях (10, 100, 200 мм): t_{10} — 723 К, t_{100} — 1003 К, t_{200} — 953 К.

Заключение. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о достаточно высокой полноте сгорания топлива (средняя температура на выходе из зоны теплообмена незначительно отличается от термодинамической [1]) и о равномерности распределения температуры по поперечному сечению. Сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных показало их удовлетворительную согласованность, что подтвердило правомерность использования созданной расчетной методики на этапе предварительного проектирования для обеспечения высокой полноты сгорания топлива и допустимого теплового состояния конструкции в зоне горения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Трусов Б.Г. *Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. «Астра-4». Версия 1.06, январь 1991 г.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992, 6 с.
- [2] Добровольский М.В. *Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования.* Москва, Машиностроение, 1968, 488 с.
- [3] Кудрявцев В.М., ред. *Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей.* Москва, Высш. шк., 1993, 368 с.
- [4] Буркальцев В.А., Лапицкий В.И., Новиков А.В., Антонов Ю.В., Ягодников Д.А. *Численное моделирование и экспериментальное исследование рабочего процесса в камере РДМТ на компонентах топлива кислород+метан.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 60 с.
- [5] Новиков А.В., Антонов Ю.В., Антонов М.В. Численное исследование рабочего процесса в камере сгорания мобильного теплогенератора. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. «Энергетическое и транспортное машиностроение», с. 249–258.
- [6] Госмен А.Д., Пан В.М., Ранчел А.К., Сполдинг Д.Б., Вольфштейн М. *Численные методы исследования течений вязкой жидкости.* Москва, Мир, 1972, 327 с.

- [7] Хзмалян Д.М. *Теория топочных процессов*. Москва, Энергоатомиздат, 1990, 351 с.
- [8] Антонов Ю.В., Ягодников Д.А. Моделирование внутрикамерных процессов ракетного двигателя на гидрореагирующем топливе с помощью пакетов ANSYS CFX и FLOWVISION. *Сб. материалов XXXIV академических чтений по космонавтике*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, с. 70–71.
- [9] Новиков А.В., Ягодников Д.А., Буркальцев В.А., Лапицкий В.И. Математическая модель и расчет характеристик рабочего процесса в камере сгорания ЖРД малой тяги на компонентах топлива метан–кислород. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, спец. вып. «Теория и практика современного ракетного двигателестроения», с. 8–17.
- [10] Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Коханова С.Я., Коханова Ю.С., Новиков С.Н. Исследование тепловых процессов в газообразном метане для создания перспективных двигателей и энергоустановок наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования. *51 Научные чтения памяти К.Э. Циолковского. Сборник докладов*. Калуга, 2016, с. 9.
- [11] Алтунин В.А., Коханова С.Я., Демиденко В.П., Платонов Е.Н., Абдуллин М.Р., Коханова Ю.С. Особенности тепловых процессов и их контроль в топливно-охлаждающих системах двигателей и энергоустановок летательных аппаратов на жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях. *51 Научные чтения памяти К.Э. Циолковского. Сборник докладов*. Калуга, 2016, с. 10.

Статья поступила в редакцию 18.03.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Новиков А.В., Андреев Е.А. Экспериментальное исследование рабочего процесса в камере сгорания мобильного теплогазогенератора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-10-1923>

Новиков Артур Витальевич — канд. техн. наук, доцент, кафедра «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований течения жидкости и газа в сложных структурных средах. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Андреев Евгений Александрович — канд. техн. наук, доцент, кафедра «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области двухфазных течений в газовом тракте ракетных двигателей и методологии диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Experimental study of the working process in the combustion chamber of a mobile heat and gas generator

© A.V. Novikov, E.A. Andreev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Heat generators producing hot fuel mixture combustion products for further heat treatment of different materials by these products are widely used in various industries. They are used, for example, in the operation of drying plants, disposal of hazardous waste, and production of building materials. Currently, there is a need to create mobile heat and gas generators suitable for transportation and rapid deployment in the field. The purpose of the work carried out in BMSTU was the development of all-metal heat and gas generators for use in drying units. In the course of the development the accumulated experience in working out the combustion chambers of rocket and air-jet engines was realized. Methodology was developed to calculate distribution of key parameters of working process occurring in the combustion chamber of the mobile heat generator on the fuel components of the air–natural gas: optimal scheme of mixing was selected by numerical simulation, the calculated fields of combustion product temperatures and concentrations of fuel components in combustion chamber volume were obtained. To implement practically the working process and to confirm the correctness of the calculations a heat and gas generator was designed and experimentally tested. Comparison of calculated and experimental data showed satisfactory agreement of the results.

Keywords: *heat and gas generator, drying units, air, methane, combustion chamber*

REFERENCES

- [1] Trusov B.G. *Modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnovesiy prib vysokikh temperaturakh. "Astra-4". Versiya 1.06, yanvar 1991g.* [Modeling chemical and phase equilibria at high temperatures. "Astra-4". Version 1.06, January 1991]. Moscow, BMSTU Publ., 1992.
- [2] Dobrovolsky M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli. Osnovy proektirovaniya* [Liquid-propellant rocket engines. Principles of design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 398 p.
- [3] Kudryavtsev V.M., ed. *Osnovy proektirovaniya i rascheta zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Fundamentals of the design and calculation of liquid rocket engines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1993, 383 p.
- [4] Burkaltsev V.A., Lapitsky V.I., Novikov A.V., Antonov Yu.V., Yagodnikov D.A. *Chislennoe modelirovanie i eksperimentalnoe issledovanie rabochego protsessa v kamere RDMT na komponentakh topliva kislorod + metan* [Numerical modeling and experimental study of the working process in the thruster chamber on oxygen+methane fuel components]. Moscow, BMSTU Publ., 2008, 60 p.
- [5] Novikov A.V., Antonov Yu.V., Antonov M.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2011, spetsialnyy vypusk "Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie" [Special issue "Power and transport engineering"], pp. 249–258.

- [6] Gosman A.D., Pan V.M., Ranchel A.C., Spalding D.B., Wolfshtein M. *Chislennyye metody issledovaniya techeniy vyazkoy zhidkosti* [Numerical Methods of Studying Viscous Fluid Flows]. Moscow, Mir Publ., 1972, 320 p. (In Russ.)
- [7] Khzmalyan D.M. *Teoriya topochnykh protsessov* [Theory of burning processes]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 352 p.
- [8] Antonov Yu.V., Yagodnikov D.A. Modeling of in-chamber processes of a rocket engine on hydroreacting fuel with ANSYS CFX and FLOWVISION packages. *Trudy XXXIV akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydaushchikhsya uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva. Moskva, 26–29 yanvarya 2010 g.* [Proceedings of the XXXIV academic readings on cosmonautics dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other prominent domestic scientists-pioneers of space exploration. Moscow, January 26–29, 2010]. Moscow, BMSTU Publ., 2010, pp. 70–71.
- [9] Novikov A.V., Yagodnikov D.A., Burkaltsev V.A., Lapitsky V.I. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2004, spetsialnyy vypusk “Teoriya i praktika sovremennogo raketnogo dvigatelestroeniya” [Special issue “Theory and Practice of Modern Rocket Engine Engineering”], pp. 8–17.
- [10] Altunin K.V., Abdullin M.R., Kohanova S.Ya., Kohanova Yu.S., Novikov S.N. Issledovanie teplovykh protsessov v gazoobraznom metane dlya sozdaniya perspektivnykh dvigateley i energoustanovok nazemnogo, vozdušnogo aerokosmicheskogo i kosmicheskogo bazirovaniya [Investigation of thermal processes in gaseous methane for creation of perspective ground-, air-, aerospace- and space-based engines and power plants]. *Sbornik dokladov. 51 Nauchnye chteniya pamyari K.E. Tsiolkovskogo* [Proceedings of the 51st scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky]. Kaluga, 2016, p. 9.
- [11] Altunin V.A., Kohanova S.Ya., Demidenko V.P., Platonov E.N., Abdullin M.R., Kohanova Yu.S. Osobennosti teplovykh protsessov i ikh control v toplivno-okhlazhdaushchikh sistemakh dvigateley i energoustanovok letatelnykh apparatov na zhidkikh i gazoobraznykh goruchikh i okhladitelykh. [Features of thermal processes and their control in fuel-cooling systems of aircraft engines and power plants on liquid and gaseous hydrocarbon fuels and coolers]. *Sbornik dokladov. 51 Nauchnye chteniya pamyari K.E. Tsiolkovskogo* [Proceedings of the 51st scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky]. Kaluga, 2016, p. 10.

Novikov A.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 research publications in the field of experimental and theoretical studies of fluid and gas flow in complex structural media. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Andreev E.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 research publications in the field of two phase flows in the gas path of rocket engines and methodology of working process diagnostics in rocket and jet engines. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru