DOI: 10.15593/2224-9982/2019.59.03

УДК 621.453

Д.А. Заболотский, В.И. Малинин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТВЕРДОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ТОПЛИВА, ОХЛАЖДЕННЫХ ДО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Посвящена исследованию термодинамических (газовая постоянная) и теплофизических (динамическая вязкость) свойств продуктов сгорания газогенераторного топлива, охлажденных до низких температур с помощью порошкообразного емкостного охладителя. Подающийся из охладителя газ может участвовать в газонасыщении порошковых материалов. Приведены требования для источника газа и самого газа, участвующего в газонасыщении. Представлены и проанализированы существующие методы охлаждения газа низкотемпературных газогенераторов, приведены их достоинства и недостатки. Указывается на необходимость нахождения значений газовой постоянной и динамической вязкости охлажденного газа. Проведены расчеты для равновесного и химически замороженного состава ПС с помощью программного комплекса Astra.4. Приведены характеристики и состав газогенераторного газа исследуемого топлива. Учтена неточность расчета при охлаждении химически замороженного состава, а также процесс конденсации водяного пара, не определяемый в программе Astra.4. Построены зависимости температуры от энтальпии; содержания компонентов (углерода, воды и водяного пара), газовой постоянной, коэффициента динамической вязкости от температуры газа для равновесного и химически замороженного состава продуктов сгорания газогенераторного топлива. Выяснено, что у химически замороженного состава на необходимом температурном отрезке (223–323 К) значение динамической вязкости меньше, чем у воздуха, на ~15 %, а газовой постоянной больше на ~20 %. Получено, что ПС равновесного состава полностью не пригодны для газонасыщения из-за большого содержания *k*-фазы и низкого значения газовой постоянной.

Ключевые слова: твердотопливный газогенератор, продукты сгорания, низкие температуры, коэффициент динамической вязкости, газовая постоянная.

D.A. Zabolotskiy, V.I. Malinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PROPERTIES OF COMBUSTION PRODUCTS OF SOLID GASGENERATOR FUELS, COOLED TO LOW TEMPERATURES

The article is concerned with a research thermodynamic (gas constant) and heatphysical (dynamic viscosity) properties of the combustion products (CP) of gas-generating fuel cooled to the low temperatures by the powdery capacitive cooler. The gas moving from the cooler can participate in gas-saturation of powder materials. Requirements for a source of the gas and the gas participating in gas-saturation are provided. The existing methods of gas cooling for low-temperature gas generators are presented and analyzed, their merits and demerits are given. It is shown necessity of finding a gas constant values and dynamic viscosity of the cooled gas. Calculations for the equilibrium and chemical frozen structure of CP are carried out by means Astra.4 software package. Characteristics and composition of gas-generating gas for the studied fuel are given. The inaccuracy of calculation for cooling of the chemical frozen structure is considered. The condensation process of water vapor which is not defined in the Astra.4 software is also considered. Functions of temperature to enthalpy; maintenance of components (carbon, water and water vapor), gas constant, coefficient of dynamic viscosity to gas temperature are constructed for the equilibrium and chemical frozen structure of CP for gas-generating fuel. It is found out that at the chemical frozen structure, on a necessary temperature range (223 ... 323 K), the value of dynamic viscosity is less than at air for ~15%, and the gas constant is ~20% more. It is also received that CP of equilibrium structure are completely not suitable for gas-saturation because of high content to - a phase and low value of a gas constant.

Keywords: solid propellant gas generator, combustion products, low temperatures, coefficient of dynamic viscosity, gas constant.

Введение

В современных ракетных двигателях в качестве топлива перспективно использовать порошкообразные материалы (ПМ), в частности порошкообразные металлические горючие (ПМГ) [1–6]. ПМ нашли широкое применение в системах спасения и пожаротушения [7–9].

Рис. 1. Конструктивная схема подачи порошковых материалов: 1 – бак; 2 – поршень; 3 – клапан в баке; 4 – привод; 5 – запорно-регулирующий клапан; 6 – датчик давления; 7 – стабилизатор давления; 8 – коллектор

Невозможно вытеснить ПМ из емкости с помощью одного только поршня, так как при давлении на порошок в нем возникают распорные напряжения, препятствующие нормальному процессу подачи. Именно поэтому порошковые материалы необходимо привести в псевдожидкое состояние, для этого их поры заполняют газом с избыточным давлением [10]. Конструктивная схема подачи ПМ приведена на рис. 1 [2].

Используемый газ должен обладать следующими параметрами:

- низкой температурой (<400 К), чтобы не ухудшить свойства ПМ и элементов конструкции системы подачи (уплотнения, пружины и т.д.);
- пониженным содержанием k -фазы (<1 %) для избежания закупоривания клапанов и обеспечения их работоспособности;
- высокой газовой постоянной (>280 Дж/(кг·К)), чтобы затрачивать меньшее количество газа при газонасыщении;
- низким коэффициентом динамической вязкости ($<18 \cdot 10^6$ Па·с) для уменьшения времени газонасыщения.

Наряду с вышеприведенными требованиями источник газа должен иметь высокие эксплуатационные характеристики, низкие габариты и массу.

Ранее в качестве источника газа использовались газобаллонные системы (ГБС), газ в которых удовлетворял заявленным требованиям. Но при этом сами ГБС обладают

высокой массой, большими габаритами и низкой надежностью при длительном хранении (со временем газ из баллонов может вытечь). В настоящее время существуют твердотопливные газогенераторы (ТТГ) [11–13], которые по сравнению с газобаллонными системами обладают высокой надежностью и превосходят их по эксплуатационным характеристикам, а также имеют меньшие габариты и массу. Однако продукты сгорания ТТГ обладают очень высокой температурой, вызывающей трудности их использования для газонасыщения порошкового материала. На данный момент наиболее низкотемпературные газогенераторные топлива обладают температурой больше 1000 К. Температуру продуктов сгорания (ПС) твердотопливного газогенератора можно понизить с помощью следующих методов:

- внедрения в топливо специальных добавок [14], которые понижают температуру до 800 К, что является недостаточным показателем, при этом ухудшаются характеристики топлива и состав газа, изменяется закон горения;
- разработки топлив на основе азидов [15, 16], позволяющие понизить температуру горячих газов до 500–700 К, что тоже не является достаточным значением для использования этого метода. Кроме того, данные топлива имеют недолгий срок хранения (около 2–3 лет) и плохие эксплуатационные характеристики;
- охлаждения в трубчатых и других видах теплообменников [17, 18]. Газ таким способом можно охладить до 300–400 К, однако габаритные размеры и масса такой охлаждающей системы будут неприемлемо велики;
- использования специальных порошкообразных емкостных охладителей, работа которых основана на эффекте волнового теплообмена, возникающего при определенных условиях в процессе фильтрации горячего газа, содержащего пары воды, через порошковый материал. Данный вид охладителя позволяет за короткое время понизить температуру горячего газогене-

раторного газа до стабильных необходимых значений (<400 К), тем самым добиться эффекта «замораживания» химического состава газа, минимизировать содержание k -фазы, сохранить газовую постоянную на достаточно высоком уровне [1, 19, 20]. Конструкция ТТГ с таким охладителем представлена в работе [19].

Расчет газонасыщения порошковых материалов

При расчете газонасыщения порошка возникает необходимость определения значений коэффициентов динамической вязкости и газовой постоянной насыщающего газа [9]. Данные параметры входят в формулы для вычисления времени релаксации процесса газонасыщения – T_p , а также массы газа, заполняющего поры порошкового материала, – m_r :

$$T_p = \frac{\epsilon \mu L^2}{3kP_0},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости газа; L – длина порошкового элемента; ϵ – порозность порошкового элемента; k – коэффициент газопроницаемости; P_0 – давление на входе (3–4 МПа);

$$m_r = \frac{P_0 V_\epsilon}{R_{\text{ПС}} T},$$

где V_ϵ – объем порошкового элемента; T – температура газа; $R_{\text{ПС}}$ – газовая постоянная продуктов сгорания.

В данных формулах все параметры известны, кроме динамической вязкости и газовой постоянной. Для газобаллонных систем их нахождение не вызывает сложности, так как характеристики используемого газа (воздух, азот) могут быть найдены в справочной литературе, например в работе [21]. Для равновесного охлаждения продуктов сгорания ТТГ определение параметров газонасыщения, как и в предыдущем случае, не является сложным, потому что параметры газа можно определить с помощью различных программ расчетов термодинамических параметров, например Astra.4. При глубоком и быстром охлаждении ПС твердотопливных газогенераторов с 1600 до 223–323 К (–50...+50 °С) состав перестает быть равновесным, из-за чего рассчитать параметры газа по законам равновесной термодинамики становится достаточно сложно, так как конечный состав продуктов сгорания становится не известен.

Методика расчета

Для решения поставленной задачи используется программный комплекс Astra.4, разработанный для моделирования химических и фазовых равновесий. В программе предусмотрена возможность расчета частичной неравновесности продуктов сгорания за счет исключения из числа учитываемых компонентов равновесия любых индивидуальных веществ. Данная функция использовалась для контроля веществ в продуктах сгорания, которые не должны образовываться при химически неравновесном случае, например k -фаза углерода и водяной пар.

Все расчеты проводились для определенного состава топлива с ПС, приведенными в табл. 1, и характеристиками, представленными в табл. 2.

Таблица 1

Состав газообразных продуктов сгорания при давлении 4–10 МПа

Компонент	Объемная (мас.) доля, %	Компонент	Объемная (мас.) доля, %
H ₂	26,5–26,7	CO	45,7–45,8
H ₂ O	12,2–12,3	CO ₂	6,85–6,88
N ₂	8,32–8,33	–	–

Таблица 2

Характеристики топлива

Давление, МПа	Температура, К	Доля k -фазы, %	Газовая постоянная ПС, Дж/(кг·К)	Динамическая вязкость, $10^6 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$
4–10	1608–1616	0,8–1,2	389–390	53,1–53,2

Одной функции исключения вещества из расчета программы для исследования неравновесного состава оказалось недостаточно, потому что углерод, водород и кислород из удаленных веществ образовывали новые соединения. Для решения возникшей проблемы была отредактирована исходная химическая формула топлива путем удаления из нее определенного, рассчитанного количества молекул.

При охлаждении ПС под высоким давлением водяной пар неизбежно начнет конденсироваться по достижении температуры конденсации ($< 600 \text{ К}$), тем самым изменяя характеристики продуктов сгорания. Программа Astra.4 не разделяет агрегатные состояния воды (жидкость, пар), поэтому этот фактор приходится учитывать дополнительно по формулам

$$C^K(\text{H}_2\text{O}) = C^T(\text{H}_2\text{O}) \left(1 - \frac{P^{\text{нас}}(\text{H}_2\text{O})}{P^{\text{тек}}(\text{H}_2\text{O})} \right);$$

$$C^G(\text{H}_2\text{O}) = C^T(\text{H}_2\text{O}) \frac{P^{\text{нас}}(\text{H}_2\text{O})}{P^{\text{тек}}(\text{H}_2\text{O})},$$

где $C^K(\text{H}_2\text{O})$ – массовая доля водяного пара; $C(\text{H}_2\text{O}^T)$ – массовая доля воды из термодинамического расчета; $P^{\text{нас}}(\text{H}_2\text{O})$ – табличное значение парциального давления насыщенного водяного пара; $P^{\text{тек}}(\text{H}_2\text{O})$ – парциальное давление воды, полученное из термодинамического расчета; $C^G(\text{H}_2\text{O})$ – концентрация воды в жидком агрегатном состоянии.

Зная содержание конденсированной воды, можно установить реальное значение газовой постоянной ПС по формуле

$$R_{\text{ПС}} = R_{\text{Г}} (1 - Z - C^K(\text{H}_2\text{O})),$$

где $R_{\text{ПС}}$ – значение газовой постоянной ПС; $R_{\text{Г}}$ – значение газовой постоянной для газовых компонентов; Z – массовая доля конденсированных фаз.

Полученные результаты

Рассчитав равновесный и замороженный состав по методике, представленной выше, построили графические зависимости:

– температуры продуктов сгорания от энтальпии (рис. 2);

Рис. 2. Температура продуктов сгорания от энтальпии состава

– содержания компонентов конденсированной воды $C^K(\text{H}_2\text{O})$ и углерода C , а также водяного пара $C^T(\text{H}_2\text{O})$ в равновесном и «замороженном» составе от температуры (рис. 3);

Рис. 3. Содержание углерода и водяного пара в продуктах сгорания

– динамической вязкости и газовой постоянной ПС от температуры для воздуха, равновесного и неравновесного состава продуктов сгорания (рис. 4 и рис. 5 соответственно).

Рис. 4. Зависимость динамической вязкости от температуры

Рис. 5. Зависимость газовой постоянной от температуры

Из графиков, приведенных на рис. 2–5, следует, что при медленном (равновесном) охлаждении ПС на необходимом температурном интервале (223–323 К) состоят из ~30 % водяного конденсата и ~20 % сажи. При этом динамическая вязкость будет меньше, чем у воздуха, на

~40 % и меньше время газонасыщения ПМ. Однако значение газовой постоянной оказалось меньше, чем у воздуха, на ~45 %. Продукты сгорания с такими характеристиками абсолютно не пригодны для газонасыщения порошковых материалов ввиду следующих причин:

- конденсированные вещества снижают эффективность ТТГГ и могут привести к потере работоспособности различных элементов конструкции системы подачи (клапаны, уплотнения и т.д.);

- осаждение сажи в порошке может привести к росту аэродинамического сопротивления вдоль охладителя;

- низкое значение газовой постоянной приводит к необходимости увеличения массы газа, а значит, и топлива газогенератора.

В ПС замороженного состава, как приведено в работе [19], полностью отсутствует углеродная сажа и при этом присутствует ~10 % воды. Динамическая вязкость оказалась больше, чем при равновесном составе, но при этом меньше, чем у воздуха, на ~15 %. Газовая постоянная продуктов сгорания больше, чем у воздуха, на ~20 %. При газонасыщении ПМ такими ПС не возникает проблем с конденсированными веществами, как в случае с равновесным составом. Очевидно, что данный метод охлаждения продуктов сгорания является перспективным ввиду следующих причин:

- на выходе из охладителя получается холодный газ с высокой чистотой;

- низкое значение динамической вязкости позволяет уменьшить время газонасыщения порошкового материала;

- высокая газовая постоянная продуктов сгорания приводит к уменьшению массы газа, необходимого для газонасыщения ПМ, а значит, и всего ГГ в целом.

Выводы

1. Значение динамической вязкости для неравновесного охлаждения ПС ТТГГ в интервале значений температуры 223–323 К меньше динамической вязкости воздуха на ~15 %, что приводит к уменьшению общего времени газонасыщения.

2. Значение газовой постоянной для неравновесного охлаждения ПС ТТГГ в интервале значений температуры 223–323 К практически неизменно и больше газовой постоянной воздуха на 20 %, что приводит к уменьшению необходимой массы топлива и газогенератора в целом.

3. При неравновесном охлаждении на выходе из охладителя получается холодный газ с высокой чистотой.

4. Продукты сгорания ТТГГ, образующиеся при равновесном охлаждении, не пригодны для газонасыщения порошкового материала из-за большого содержания конденсированной воды (~30 %) и углерода (~20 %), а также из-за неприемлемо низкого значения газовой постоянной по сравнению с воздухом (меньше на ~45 %).

Библиографический список

1. Заболотский Д.А., Малинин В.И. Расчет теплофизических и термодинамических свойств продуктов сгорания твердотопливного газогенератора при низких значениях температуры // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф., 15–17 нояб. 2018 г., Пермь. – Пермь, 2018. – С. 109–112.

2. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих / УрО РАН. – Екатеринбург; Пермь, 2006. – 262 с.

3. Сжигание мелкодисперсного порошка алюминия в потоке воздуха / А.Г. Егоров, К.В. Мигалин, В.Я. Ниязов [и др.] // Химическая физика. – 1990. – Т. 9, № 12. – С. 1633–1635.

4. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. Воспламенение и горение аэрозвеси алюминия в реакторе высокотемпературного синтеза порошкообразного оксида алюминия // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 5. – С. 41–51.

5. Ягодников Д.А. Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 444 с.
6. Андриевский Р.А. Порошковое материаловедение. – М.: Металлургия, 1991. – 207 с.
7. Адамян В.Л., Кондратенко Н.В. Порошковое огнетушение и огнетушащие порошки // Глобальный научный потенциал. – 2015. – № 10. – С. 93–94.
8. Дмитриев О.В., Попов В.И. Огнетушащие порошки // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: материалы конф., 20–21 сент. 2017 г., г. Иваново. – Иваново, 2017. – С. 219–223.
9. Огнетушащие порошки двойного применения / В.И. Попов [и др.]. // Пожарная и аварийная безопасность: материалы конф., 20–21 нояб. 2014 г., г. Иваново. – Иваново, 2014. – С. 95–97.
10. Обросов А.А., Земерев Е.С., Малинин В.И. Динамика газонасыщения порошка алюминия в системе подачи установки синтеза наноксидов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2013. – № 3. – С. 25–28.
11. Серебренников С.Ю. Аварийные системы с газогенераторами и двигателями на твердом топливе (теория и эксперимент) / УрО РАН. – Екатеринбург, 2002. – 266 с.
12. Ваулин С.Д., Валеева О.В., Феофилактов В.И. Низкотемпературные твердотопливные газогенераторы: методы расчета рабочих процессов, экспериментальные исследования. – Миасс, 1997. – 268 с.
13. Кириллов В.В. Моделирование режимов работы низкотемпературного газогенератора // Вестник ЮУГТУ. Машиностроение. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 5–17.
14. Шабунин А.И., Сарабьев В.И., Емельянов В.Н. Исследование пиротехнических систем для твердотопливных низкотемпературных газогенераторов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2004. – С. 130–137.
15. Ваулин С.Д., Малышева Я.Н. Исследование внутрикамерных процессов при горении твердого топлива на основе азидов / Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем: 4-я междунар. шк.-сем., 27 июня–3 июля. 2004 г., г. Санкт-Петербург. – СПб., 2004. – Т. I. – С. 62–68.
16. Малышева Я.Н. Математическое моделирование в низкотемпературном твердотопливном газогенераторе с составом на основе азидов / Тр. междунар. форума по проблемам науки, техники и образования, 2–6 дек. 2002 г., г. Москва / под ред. В.П. Савиных, В.В. Вишневецкого; Академия наук о Земле. – М., 2002. – С. 110.
17. Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах / А.С. Сукомел [и др.]. – М.: Энергия, 1979. – 216 с.
18. Дрейцер Г.А., Кузьминов В.А. Расчет разогрева и охлаждения трубопроводов. – М.: Машиностроение, 1977. – 155 с.
19. Коломин А.Е. Теоретическое обоснование создания газогенераторов на твердом топливе с порошкообразными емкостными охладителями: дис. ... канд. техн. наук / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – 130 с.
20. Охлаждение продуктов сгорания газогенераторных топлив в порошкообразных емкостных охладителях / В.И. Малинин, Е.И. Коломин, С.Ю. Серебренников, И.С. Антипин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2002. – № 13. – С. 72–76.
21. Hayhes W.M. CRC Handbook of Chemistry and Physics. – 95ed. – Hoboken: CRC Press, 2014.

References

1. Zabolotskiy D.A., Malinin V.I. Raschet teplofizicheskikh i termodinamicheskikh svoystv produktov sgoraniya tverdotoplivnogo gazogeneratora pri nizkikh znacheniyakh temperatury [Calculation of the thermophysical and thermodynamic properties of the combustion products of a solid fuel gas generator at low temperatures]. Materials of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference "Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii", November 15-17, 2018. Perm, 2018, pp. 109-112.
2. Malinin V.I. Vnutrikamernye protsessy v ustanovkakh na poroshkoobraznykh metallicheskih goryuchikh [Intra-chamber processes in installations on powdered metallic fuels]. Ekaterinburg-Perm: Ural branch of RAS, 2006, 262 p.
3. Egorov A.G., Migalin K.V., Niyazov V.Ya. Szhiganie melkodispersnogo poroshka alyuminiya v potoke vozdukha [Burning finely divided aluminum powder in an air stream]. Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics, 1990, vol. 9, no. 12, pp. 1633-1635.

4. Malinin V.I., Kolomin E.I., Antipin I.S. Vosplamnenie i gorenie aehrovzvesi alyuminiya v reaktore vysokotemperaturnogo sinteza poroshkoobraznogo oksida alyuminiya [Ignition and combustion of aluminum air suspension in a reactor for high-temperature synthesis of powdered aluminum oxide]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 5, pp. 41-51.
5. Yagodnikov, D.A. Gorenje poroshkoobraznykh metallov v gazodispersnykh sredakh. [Combustion of powdered metals in gas dispersed media]. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman, 2018, 444 p.
6. Andrievskiy R.A. Poroshkovoe materialovedenie [Powder Materials Science]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 207 p.
7. Adamyan V.L., Kondratenko N.V. Poroshkovoe ognetusenie i ognetushashchie poroshki [Powder Extinguishing and Extinguishing Powders]. *Globalnyy nauchnyy potentsial*, 2015, no. 10, pp. 93-94.
8. Dmitriev O.V., Popov V.I. Ognetusashchie poroshki [Fire extinguishing powders]. *Materialy konf. Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tekhnologii*. Ivanovo. 2017. S. 219-223.
9. Popov V.I. i dr. Ognetusashchie poroshki dvoynogo primeneniya. Conference proceedings "Pozhar-naya i avariynaya bezopasnost", Ivanovo, 2014, pp. 95-97.
10. Obrosof, A. A., Zemerev E.S., Malinin V.I. Dinamika gazonasyshcheniya poroshka alyuminiya v sisteme podachi ustanovki sinteza nanooksida [The dynamics of gas saturation of aluminum powder in the feed system of a nano oxide synthesis unit]. *Bulletin of Kalashnikov ISTU*, 2013, no. 3, pp. 25-28.
11. Serebrennikov S.Yu. Avariynye sistemy s gazogeneratorami i dvigatelyami na tverdom toplive (teoriya i ehksperiment) [Alarm systems with gas generators and solid fuel engines (theory and experiment)]. Ekaterinburg: Ural branch of RAS, 2002, 266 p.
12. Valeeva O.V. Nizkotemperaturnye tverdotoplivnye gazogeneratory: metody rascheta rabochikh protsessov, ehksperimentalnye issledovaniya [Low-temperature solid fuel gas generators: methods for calculating work processes, experimental studies]. Miass, 1997.
13. Kirillov V.V. Modelirovanie rezhimov raboty nizkotemperaturnogo gazogeneratara [Modeling the low-temperature gas generator]. *Bulletin of the SUSU, Series "Mechanical engineering industry"*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 5-17.
14. Shabunin A.I., Sarab'ev V.I., Emelyanov V.N. Issledovanie pirotekhnicheskikh sistem dlya tverdotoplivnykh nizkotemperaturnykh gazogeneratorov [Study of pyrotechnic systems for solid fuel low-temperature gas generators]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*, Moscow, 2004.
15. Vaulin S.D., Malysheva Ya.N. Issledovanie vnutrikamernykh protsessov pri gorenii tverdogo topliva na osnove azida natriya [The study of intracamerall processes during the combustion of solid fuel based on sodium azide]. Fourth International School-Seminar "Vnutrikamernye protsessy, gorenje i gazovaya dinamika dispersnykh sistem". Sankt-Peterburg, 2004, vol. I, pp. 62-68.
16. Malysheva Ya.N. Matematicheskoe modelirovanie v nizkotemperaturnom tverdotoplivnom gazogeneratora s sostavom na osnove azida natriya [Mathematical modeling in a low-temperature solid fuel gas generator with a composition based on sodium azide]. *Proceedings of the International Forum on Science, Technology and Education*. Edited by V.P. Savinykh, V.V. Vishnevsky. Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2002, P. 110.
17. Sukomel A.S. Teploobmen i trenie pri turbulentnom techenii gaza v korotkikh kanalakh [Heat transfer and friction during turbulent gas flow in short channels]. Moscow: Ehnergiya, 1979, 216 p.
18. Dreytser G.A., Kuzminov V.A. Raschet razogreva i okhlazhdeniya truboprovodov [Calculation of heating and cooling pipelines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1977, 155 p.
19. Kolomin A.E. Teoreticheskoe obosnovanie sozdaniya gazogeneratorov na tverdom toplive s poroshkoobraznymi emkostnymi okhladitelyami [Theoretical rationale for the creation of solid fuel gas generators with powdered capacitive coolers]. PhD thesis. Perm state technical university. Perm, 2006, 130 p.
20. Malinin V.I., Kolomin E.I., Serebrennikov S.YU., Antipin I.S. Okhlazhdenie produktov sgoraniya gazogeneratornykh topliv v poroshkoobraznykh emkostnykh okhladitelyakh [Cooling of combustion products of gas-generating fuels in powdered capacitive coolers]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2002, no. 13, pp. 72-76.
21. Haynes W.M. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 95ed. Hoboken: CRC Press, 2014.

Об авторах

Заболотский Даниил Александрович (Пермь, Россия) – студент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: daniil.zabolotsky@mail.ru).

Малинин Владимир Игнатьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: malininvi@mail.ru).

About the authors

Daniel A. Zabolotsky (Perm, Russian Federation) – Student of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: daniil.zabolotsky@mail.ru).

Vladimir I. Malinin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: malininvi@mail.ru).

Получено 13.11.2019