

УДК 621.454.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ПОРИСТОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Е. А. Салганский¹, Н. А. Луценко^{2,3}, Л. С. Яновский^{1,4}

¹Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, sea@icp.ac.ru

²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, 690041 Владивосток

³Дальневосточный федеральный университет, 690922 Владивосток

⁴Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 125993 Москва

Предложена усовершенствованная математическая модель газификации твердого пористого горючего при фильтрации через него горячих газов. На примере полиметилметакрилата исследованы режимы газификации как при постоянном перепаде давления на входе и выходе из газификатора, так и при постоянной скорости газа на его входе. В случае постоянного перепада давления газификация горючего материала происходит дольше и температура газа на выходе увеличивается медленнее, чем в случае постоянной скорости газа на входе при сопоставимых условиях.

Ключевые слова: газификация, твердое горючее, газогенератор, высокоскоростной летательный аппарат, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20220306

ВВЕДЕНИЕ

Изучению работы высокоскоростных летательных аппаратов с внутриатмосферным применением уделяется всё больше внимания [1, 2]. В качестве силовой установки таких летательных аппаратов используется прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД) [3]. Такой двигатель может работать как на газообразном [4], так и на жидком [5] или твердом [6] топливе. Исследование условий устойчивой работы ПВРД проводится на экспериментальных стендах и в установках [7, 8], а также с помощью математического моделирования [9–11].

Для улучшения эффективности работы и управления ПВРД необходимо изучение за-

кономерностей устойчивого горения топлива в камере сгорания [12]. Феноменологическая модель определения эффективности работы и тягово-энергетических характеристик ПВРД на основе экспериментальных данных предложена в работах [13, 14]. По сравнению с низкоскоростным горением топлива непрерывно-детонационное горение повышает эффективность работы, а также предел устойчивости двигателя, что показано в работах [15, 16]. Применение стабилизаторов в виде каверн или уступов в камере сгорания приводит к более устойчивому горению топлива [17]. На пределы устойчивого горения топлива влияют температура и расход продуктов сгорания в стабилизаторе, степень турбулентности газа и др. [18]. В [19] исследовался режим работы бесклапанного двигателя, в котором реализуется объемное горение вместо детонационного. Предложен способ управления тягово-экономическими характеристиками ПВРД при варьировании расхода горючего [20]. В работе [21] изучен пульсирующий режим горения топлива в камере сгорания двигателя. Показано, что в таком режиме может достигаться высокая эффективность горения из-за большого прироста температуры и низких потерь полного давления.

Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-20008 Е. А. Салганский и Н. А. Луценко) и в рамках государственного задания АААА-А19-119100800130-0 (Л. С. Яновский). Вклад авторов: Е. А. Салганский, Н. А. Луценко — «Математическая модель и численный метод», «Результаты расчетов», «Заключение»; Л. С. Яновский — «Введение», «Заключение». Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М. В. Ломоносова.

© Салганский Е. А., Луценко Н. А., Яновский Л. С., 2022.

В высокоскоростных летательных аппаратах при больших скоростях полета заборный воздух, поступая в воздухозаборник, резко тормозится, вследствие чего его температура сильно повышается. Поэтому воздух не может быть использован как охладитель стенок камеры сгорания. Для таких летательных аппаратов охладитель должен быть на борту аппарата. Чтобы не перегружать летательный аппарат специальным охладителем, в таком качестве может быть использовано либо жидкое топливо, либо продукты газификации твердого горючего [22]. Преимуществом жидкого топлива по сравнению с твердым является простота подачи жидкости в систему охлаждения камеры сгорания. При этом жидкое топливо, как правило, характеризуется меньшей объемной теплотой сгорания по сравнению с твердым, что негативно отражается на дальности полета летательного аппарата.

При использовании продуктов газификации твердого горючего в качестве охладителя стенок камеры сгорания двигательную установку необходимо оснастить низкотемпературным газогенератором, состоящим из комбинированного заряда твердого топлива и твердого пористого (гранулированного) горючего [23, 24]. При воспламенении твердого топлива газообразные продукты сгорания протекают через проницаемое твердое горючее и нагревают его, что приводит к его газификации. Часть газогенератора, в которой расположен твердый испаряемый пористый материал, будем называть газификатором. Поскольку газификация является эндотермическим процессом, поток образующихся относительно холодных горючих газов можно использовать для охлаждения конструкций камеры сгорания. Для изучения режимов работы низкотемпературного газогенератора в [25] экспериментально были определены характеристики газификации легкоплавких углеводородных материалов (на примере полиэтилена и полипропилена) в потоке высокотемпературного инертного газа. Показано, что с увеличением температуры инертного газа выход продуктов газификации увеличивается. Минимальное отношение массовых расходов инертного газа и продуктов газификации углеводородных материалов в экспериментах составило 4.5. В работе [26] экспериментально изучены закономерности газификации полипропилена в потоке высокотемпературного инертного газа. Как и в предыдущей рабо-

те, показано, что с увеличением температуры несущего газа увеличивается скорость газификации полимерного материала. В экспериментах максимальный расход продуктов газификации составил 8 г/с.

Целью настоящей работы является математическое моделирование режимов работы низкотемпературного газификатора комбинированного ПВРД на твердом топливе.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

В работе представлена усовершенствованная математическая модель газификации твердого пористого горючего при фильтрации через него горячих газов. В отличие от ранее разработанной модели [27], в данной работе молярная масса газовой смеси в каждой точке газификатора в каждый момент времени рассчитывается как среднее гармоническое молярных масс компонентов. Следует заметить, что при экзотермических процессах изменение молярных масс горючего газа и его продуктов горения может оказывать сильное влияние на скорость горения и температуру пламени [28, 29].

Исследуемый в данной работе газификатор представляет собой пористый объект, имеющий входное и выходное отверстия, расположенные друг напротив друга, и ограниченный боковыми непроницаемыми стенками. Инертный горячий газ поступает в пористый объект через его вход из камеры высокого давления, проходит через объект и нагревает его. В результате твердый пористый материал превращается в газ, который смешивается с поступающим газом, и образующаяся смесь выходит из пористого объекта в камеру с заданным давлением. Принципиальная схема исследуемого газификатора более подробно описана в [30, 31]. Будем полагать, что скорость реакции газификации описывается уравнением Аррениуса первого порядка, тепловыми потерями через боковые стенки газификатора и диффузией в газе будем пренебрегать. Математическая модель процесса основана на предположении о взаимодействующих взаимопроникающих континуумах [32] и включает в себя следующие уравнения:

сохранения энергии твердой фазы:

$$\begin{aligned} \rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \\ = -\alpha(T_c - T_g) - Q\rho_{c0}W + (1 - a_g)\lambda_c \Delta T_c, \end{aligned}$$

сохранения энергии газа:

$$\begin{aligned} \rho_g c_g \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + (v_g \cdot \nabla) T_g \right) = \\ = \alpha (T_c - T_g) + a_g \lambda_g \Delta T_g, \end{aligned}$$

сохранения импульса газа:

$$\begin{aligned} \rho_g (1 + \chi(1 - a_g)) \left(\frac{\partial v_g}{\partial t} + (v_g \cdot \nabla) v_g \right) = \\ = -a_g \nabla p - a_g^2 \frac{\mu}{k_1} v_g - \rho_{c0} W v_g, \end{aligned}$$

сохранения массы газа и продуктов газификации твердого горючего:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g v_g) = \rho_{c0} W,$$

$$\frac{\partial \rho_{gc}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{gc} v_g) = \rho_{c0} W,$$

молярной массы и состояния совершенного газа:

$$\frac{1}{M} = \frac{\rho_{gc}}{\rho_g} \frac{1}{M_{gc}} + \left(1 - \frac{\rho_{gc}}{\rho_g} \right) \frac{1}{M_{in}}, \quad p = \frac{\rho_g R T_g}{a_g M},$$

плотности твердой фазы и пористости:

$$\rho_c = (1 - \eta) \rho_{c0}, \quad a_g = a_{g0} + (a_{c0} - a_{cEnd}) \eta,$$

кинетики и динамической вязкости:

$$W = (1 - \eta) k \exp \left(-\frac{E}{R T_c} \right), \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = W,$$

$$\mu = c_{s1} \frac{T_g^{1.5}}{c_{s2} + T_g}.$$

Будем использовать следующие граничные условия:

$$p|_{x \in G_1} = p_{in} \text{ или } v_g|_{x \in G_1} = v_{in},$$

$$T_g|_{x \in G_1} = T_{g0}, \quad p|_{x \in G_2} = p_{out}, \quad \frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_{x \in G_2} = 0,$$

$$\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial n} \Big|_{x \in G_1 \cup G_2} = 0, \quad \rho_{gc}|_{x \in G_1} = 0.$$

Здесь ρ — эффективная или приведенная плотность (произведение истинной плотности на

объемную долю), c — теплоемкость, T — температура, t — время, α — коэффициент межфазного теплообмена, Q — тепловой эффект реакции, W — скорость химической реакции, a — объемная доля, λ — теплопроводность, Δ — оператор Лапласа, v_g — скорость газа, ∇ — оператор набла, χ — коэффициент межфазного взаимодействия движущихся сред, p — давление, μ — динамическая вязкость газа, k_1 — коэффициент проницаемости, M — молярная масса газа, R — универсальная газовая постоянная, η — степень превращения твердого горючего, k — предэкспоненциальный множитель, E — энергия активации, c_{s1} и c_{s2} — константы в формуле Сазерленда, G_1 и G_2 — соответственно входная и выходная границы газификатора, n — нормаль к поверхности G_1 или G_2 ; индексы: 0 — начальное значение, c — конденсированная фаза, g — газовая фаза, End — конечное значение, gc — продукты газификации твердого горючего, in — значение на входе в газификатор, out — значение на выходе из газификатора.

Заметим, что в пустых областях газификатора, в которых произошло полное разложение твердого пористого горючего, используется та же самая модель, но пористость полагается пренебрежимо малой, а проницаемость — очень большой. Предложенная модель очень близка к используемой в [27, 30, 31], но позволяет точно описывать изменение молярной массы газа, которое вызвано появлением газобразных продуктов разложения при газификации твердого горючего. Молярная масса газовой смеси в каждой точке газификатора в каждый момент времени рассчитывается как среднее гармоническое молярных масс компонентов, что точно удовлетворяет закону Дальтона. В ранее использовавшейся модели молярная масса газа принималась постоянной осредненной величиной:

$$M = 0.2 M_{gc} + 0.8 M_{in}.$$

Численный метод, используемый в настоящей работе для расчета процесса газификации твердого пористого горючего, основан на комбинации неявной и явных конечно-разностных схем и аналогичен методу, используемому в [27, 30, 31]. Все уравнения в частных производных, за исключением уравнения неразрывности газа, преобразуются в явные конечно-разностные схемы. Уравнение неразрывности газа преобразуется в неявное конечно-разностное уравне-

ние, из которого методом прогонки определяется давление с учетом уравнения состояния совершенного газа. Разработанный численный метод позволяет рассчитывать процесс как при постоянном перепаде давления газа на входе и выходе из газификатора, так и при постоянной скорости газа на его входе.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

С использованием предложенной численной модели проведено исследование газификации пористого горючего при фильтрации через него высокотемпературного инертного газа. Рассматривался газификатор длиной 0,5 м. Начальная проницаемость горючего $5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$. Начальная температура горючего 300 К, его начальная пористость 0,3. В газификатор подавался инертный газ с температурой 1500 К. В случае постоянного перепада давления в газификаторе фиксировали давление на входе 20,001 атм и на выходе из газификатора 20 атм. В случае постоянной скорости газа на входе в газификатор фиксировали ее значение 1,9 м/с, так как при данной скорости параметры процесса в начальный период времени близки к параметрам процесса при указанном выше перепаде давления. Характеристики инертного газа принимались как у азота, для горючего — как у полиметилметакрилата (ПММА). Скорость газификации горючего брали из работы [33].

На рис. 1 представлена зависимость температуры газа на выходе из газификатора T_g^{out} и скорости газа на входе в газификатор v_g^0 от времени при постоянном перепаде давления в газификаторе и постоянной скорости газа на входе. Значение перепада давления задавалось таким образом, чтобы в начальный момент времени скорость газа на входе в газификатор совпадала в обоих случаях (линии 3 и 4 практически совпадают первые 10 с). Вследствие этого в начальный момент времени температуры газа на выходе из газификатора также практически совпадают в обоих случаях (линии 1 и 2 практически совпадают первые 10 с). Однако далее температура газа на выходе растет быстрее в случае постоянной скорости газа на входе. При постоянной скорости газа на входе поток газа в газификатор постоянен и не меняется со временем, а при постоянном значении перепада давления в газификаторе поток газа на входе в газификатор может меняться. Из-за притока продуктов газификации горючего увеличивает-

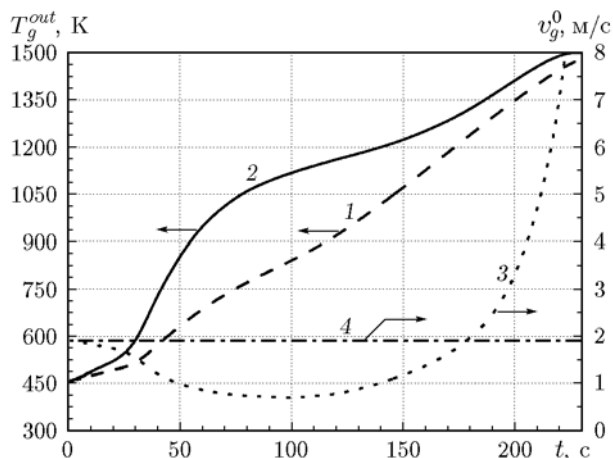


Рис. 1. Зависимость температуры газа на выходе из газификатора и скорости газа на входе в газификатор от времени при постоянном перепаде давления в газификаторе (1 — температура, 3 — скорость) и при постоянной скорости газа на входе (2 — температура, 4 — скорость)

ся сопротивление газовому потоку. Возросшее сопротивление движению газа при постоянном перепаде давления приводит к снижению скорости газа на входе в газификатор (линия 3), что, в свою очередь, уменьшает приток тепловой энергии для прогрева и газификации горючего. Поэтому газификация горючего материала происходит дольше и температура газа на выходе увеличивается медленнее. Время достижения температуры газа на выходе 1100 К равняется 153 с в случае постоянного перепада давления в газификаторе и 92 с в случае постоянной скорости газа на входе. Процесс газификации горючего увеличивает его пористость. Это приводит к снижению сопротивления газовому потоку, что при постоянном перепаде давления вызывает рост скорости, поэтому по истечении 100 с начинается рост скорости газа на входе в газификатор.

На рис. 2 представлено распределение плотности (линии 1 и 1') и скорости газа (линии 2 и 2') по длине газификатора при постоянной средней (1, 2) и изменяющейся (1', 2') молярной массе газа. Расчет проведен для постоянного перепада давления в газификаторе. Распределения соответствуют моменту времени 100 с. Из рисунка видно, что осреднение молярной массы газа приводит к заметному искажению результата расчета плотности газа. Особенно это заметно в начале газификатора,

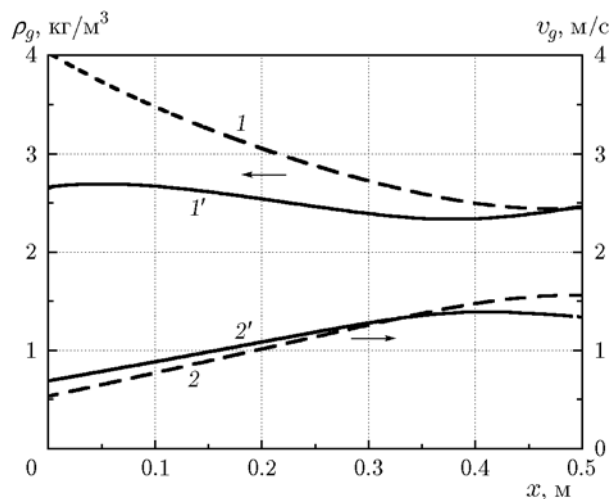


Рис. 2. Распределение плотности (линии 1 и 1') и скорости газа (линии 2 и 2') по длине газификатора при постоянной средней молярной массе газа (1, 2) и при ее изменении (1', 2')

где газ практически не содержит продуктов газификации горючего материала. Линейная скорость газа имеет меньшие отличия в разных случаях. Таким образом, учет изменения молярной массы газа слабо влияет на скорость газа.

На рис. 3 представлена зависимость температуры газа на выходе из газификатора от времени при постоянной средней (1) и изменяющейся (2) молярной массе газа. Расчет проведен для постоянного перепада давления в га-

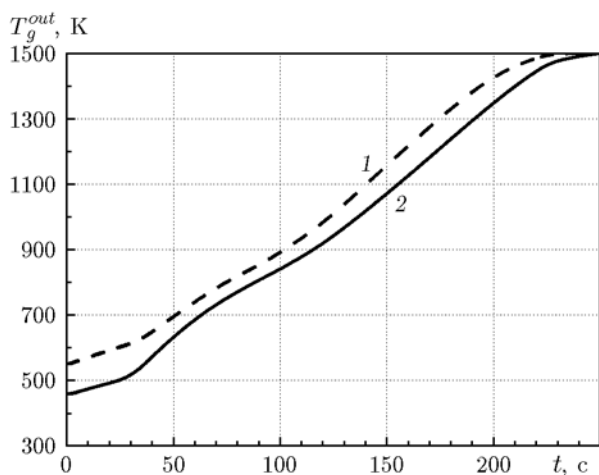


Рис. 3. Зависимость температуры газа на выходе из газификатора от времени при постоянной средней молярной массе газа (1) и при ее изменении (2)

зификаторе. Из рисунка видно, что качественное поведение кривых не изменилось. Время достижения температуры газа на выходе 1100 K равняется 138 с в случае постоянной средней и 153 с в случае изменяющейся молярной массы газа. Таким образом, учет изменения молярной массы газа позволяет примерно на 10 % увеличить точность расчета времени работы газификатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием усовершенствованной математической модели на примере полиметилметакрилата исследованы режимы газификации при постоянном перепаде давления на входе и выходе из газификатора, а также при постоянной скорости газа на его входе. Показано, что если в обоих указанных случаях в начальный момент времени выбраны сопоставимые условия процесса и параметры практически совпадают, то с течением времени отличия параметров существенно увеличиваются. В случае постоянного перепада давления скорость газа на входе в газификатор сначала падает, затем растет, при этом газификация горючего материала происходит дольше и температура газа на выходе растет медленнее, чем в случае постоянной скорости газа на входе. Также показано, что точный расчет молярной массы газа отражается на распределении плотности газа по длине газификатора, но слабо влияет на интегральные характеристики процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврашков В. Н., Метелкина Е. С., Мещеряков Д. В. Исследование высокоскоростных ПВРД // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 36–44.
2. Селезнев Р. К. На пути к гиперзвуку. Краткий исторический обзор // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. — 2014. — Т. 15, № 3. — <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/228>.
3. Белобровина М. В., Сенюшкин Н. С. Особенности применения прямоточных ВРД // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2013. — Т. 1, № 9. — С. 47–48.
4. Зангиев А. Э., Иванов В. С., Фролов С. М. Тяговые характеристики воздушно-реактивного импульсного детонационного двигателя в условиях сверхзвукового полета на разных высотах // Хим. физика. — 2013. — Т. 32, № 5. — С. 62–76.

5. Карасев В. Н., Картовицкий Л. Л., Левин В. М. Вопросы организации рабочего процесса в камере сгорания ПВРД // Вест. Моск. авиационного ин-та. — 2009. — Т. 16, № 5. — С. 10.
6. Аверьков И. С., Разносчиков В. В., Яновский Л. С. Параметрический анализ влияния свойств топлива на летно-технические характеристики летательного аппарата с прямоточным воздушно-реактивным двигателем // Изв. Рос. академии ракетных и артиллерийских наук. — 2018. — Т. 104, № 4. — С. 117–125.
7. Фролов С. М., Звегинцев В. И., Иванов В. С. и др. Макет-демонстратор непрерывно-детонационного прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Результаты испытаний в аэродинамической трубе // Докл. АН. — 2017. — Т. 474, № 1. — С. 51–55.
8. Внучков Д. А., Звегинцев В. И., Наливайченко Д. Г. и др. Испытания ПВРД твердого топлива с измерением тяговых характеристик в аэродинамических установках // Теплофизика и аэромеханика. — 2018. — Т. 25, № 4. — С. 629–635.
9. Сахин В. В., Герлиман Е. М., Брыков Н. А. Исследование параметров цикла ПВРД // Системный анализ и аналитика. — 2018. — Т. 6, № 1. — С. 41–45.
10. Губайдуллина Р. Р., Сенюшкин Н. С. Подход к термогазодинамическому моделированию гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. — 2018. — Т. 1. — С. 94–97.
11. Белобровина М. В., Сенюшкин Н. С. Расчет термогазодинамических параметров ПВРД // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2014. — Т. 1, № 10. — С. 40–41.
12. Бирюков В. И., Иванов В. Н., Царапкин Р. А. Метод прогнозирования запаса устойчивости по отношению к акустическим колебаниям в камерах ракетных двигателей по шумам горения // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 1. — С. 80–89. — DOI: 10.15372/FGV20210109.
13. Картовицкий Л. Л., Левин В. М., Яковлев А. А. Концепция повышения эффективности рабочего процесса ПВРД // Изв. вузов. Авиаци. техника. — 2015. — № 4. — С. 67–72.
14. Александров В. Ю., Арефьев К. Ю., Прохоров А. Н. и др. Методика экспериментальных исследований эффективности рабочего процесса в высокоскоростных ПВРД газогенераторной схемы на твердых топливах // Изв. вузов. Машиностроение. — 2016. — Т. 671, № 2. — С. 65–75.
15. Егорян А. Д., Крайко А. Н. Сравнение воздушно-реактивных двигателей с медленным и детонационным горением // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. — 2020. — № 2. — С. 123–137.
16. Фролов С. М., Иванов В. С. Прорыв в теории прямоточных двигателей // Хим. физика. — 2021. — Т. 40, № 4. — С. 68–75.
17. Рашковский С. А., Милехин Ю. М., Федорычев А. В. и др. Механизм стабилизации горения в канале заряда твердого топлива в прямоточном воздушно-реактивном двигателе // Докл. РАН. Химия, науки о материалах. — 2020. — Т. 490, № 1. — С. 51–56.
18. Левин В. М., Карасев В. Н., Картовицкий Л. Л., Крымов Е. А., Скачков О. А. Нестационарность процесса в модели ПВРД // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 68–75.
19. Туник Ю. В. Актуальные схемы сверхзвуковых ПВРД с нестационарным детонационным горением // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. — 2020. — Т. 21, № 1. — С. 1–12.
20. Кытманов И. В., Никитина И. Е. Регулирование ПВРД ТТ изменением расхода газогенератора // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. — 2015. — Т. 6, № 1. — С. 106–131.
21. Третьяков П. К. Организация пульсирующего режима горения в высокоскоростных ПВРД // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 6. — С. 21–27.
22. Суржигов С. Т. Моделирование радиационно-конвективного нагрева модельных камер ПВРД на водородном и углеводородном топливе // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. — 2014. — Т. 15, № 3. — С. 2.
23. Богомолов Я. Э., Малинин В. И. Определение срывных характеристик в форкамере комбинированного ПВРД на порошкообразном алюминиевом горючем // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. — 2019. — Т. 2. — С. 35–38.
24. Shiplyuk A. N., Zvegintsev V. I., Frolov S. M., et al. Gasification of low-melting hydrocarbon material in the airflow heated by hydrogen combustion // Int. J. Hydrogen Energy. — 2020. — V. 45, N 15. — P. 9098–9112. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.099.
25. Звегинцев В. И., Федорычев А. В., Жестерев Д. В. и др. Газификация легкоплавких углеводородных материалов в высокотемпературном газовом потоке // Горение и взрыв. — 2019. — Т. 12, № 3. — С. 108–116.
26. Shiplyuk A. N., Zvegintsev V. I., Frolov S. M., et al. Gasification of low-melting fuel in a high-temperature flow of inert gas // J. Propul. Power. — 2021. — V. 37, N 1. — P. 20. — DOI: 10.2514/1.B37780.
27. Salgansky E. A., Lutsenko N. A. Effect of solid fuel characteristics on operating conditions of low-temperature gas generator for high-speed flying vehicle // Aerospace Sci. Technol. — 2021. — N 109. — 106420. — DOI: 10.1016/j.ast.2020.106420.

28. **Сабденов К. О.** Влияние изменения молярной массы на температуру пламени и скорость горения // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 1. — С. 51–57. — DOI: 10.15372/FGV20210105.
29. **Fierro M., Requena P., Salgansky E., Torres M.** Experimental investigation of reverse flow porous medium reactor with premixed and non-premixed flames // Chem. Eng. J. — 2021. — N 425. — 130178. — DOI: 10.1016/j.cej.2021.130178.
30. **Левин В. А., Луценко Н. А., Салганский Е. А. и др.** Модель газификации твердого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора летательного аппарата // Докл. АН. — 2018. — Т. 482, № 2. — С. 150–154.
31. **Salgansky E. A., Lutsenko N. A., Levin V. A., et. al.** Modeling of solid fuel gasification in combined charge of low-temperature gas generator for high-speed ramjet engine // Aerospace Sci. Technol. — 2019. — V. 84. — P. 31–36. — DOI: 10.1016/j.ast.2018.10.029.
32. **Нигматулин Р. И.** Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978.
33. **Pizzo Y., Lallemand C., Kacem A., et al.** Steady and transient pyrolysis of thick clear PMMA slabs // Combust. Flame. — 2015. — V. 162, N 1. — P. 226–236. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.07.004.

Поступила в редакцию 25.11.2021.

После доработки 15.12.2021.

Принята к публикации 12.01.2022.
