

УДК 629.735.33.016

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СУСПЕНЗИОННОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ БОРА В ПРЯМОТОЧНОМ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Y.-L. Xiao, Zh.-X. Xia, L.-Y. Huang, L.-K. Ma, D.-L. Yang

Национальный университет технологии защиты, 410073 Чанша, Китай, huangliya05@nudt.edu.cn

Предложена модель воспламенения и горения агломерата бора, учитывающая изменение параметров отдельных частиц бора в агломератах, а также тепло- и массообмена между агломератами и окружающей средой. Спроектирован и проведен эксперимент в струйной камере сгорания с использованием топливной суспензии на основе бора с целью проверки конфигурации струи и верификации модели горения частиц бора. Разработана математическая модель многофазного реагирующего потока суспензионного топлива на основе бора в камере сгорания прямооточного воздушно-реактивного двигателя. Капли керосина и частицы бора вводились дискретно в поле потока горелки, и их траектории отслеживались с использованием модели дискретной фазы. Подробно проанализировано влияние размера агломератов, расхода воздуха, начального диаметра частиц бора и содержания частиц бора на эффективность сгорания топливной суспензии. Показано, что эффективность сгорания уменьшается с увеличением размера агломератов, начального диаметра частиц бора и их содержания и увеличивается с ростом расхода воздуха из обводного канала. Если диаметр агломерата превышает 100 мкм или расход воздуха из обводного канала составляет менее 50 г/с, полное сгорание частиц бора невозможно.

Ключевые слова: суспензия, прямооточный воздушно-реактивный двигатель, бор, агломераты.

DOI 10.15372/FGV20190314

ВВЕДЕНИЕ

Требования высокой плотности энергии и повышенной безопасности топлива привели к расширению исследований гелевых топлив [1, 2], которые при удовлетворении этим условиям имеют перспективу использования как в ракетных, так и в прямооточных воздушно-реактивных двигателях (ПВРД). Гелевые топлива представляют собой жидкие топлива и окислители, чьи реологические свойства изменены добавлением гелеобразующих агентов, поэтому они ведут себя как неньютоновские жидкости. Для улучшения теоретической производительности могут добавляться энергетические твердые частицы, такие как алюминий, бор, магний и т. д. [3]. Для воздушно-реактивных двигателей бор является одним из наиболее перспективных веществ в качестве присадок с наилучшими теоретическими характеристиками. По сравнению с углеводоро-

дами его теплота сгорания выше на 40 % на единицу массы и на 200 % на единицу объема [4]. Воздушно-реактивный двигатель на борсодержащем гелеобразном ракетном топливе, обладающий преимуществами как прямооточного двигателя, так и гелеобразного ракетного топлива, является одним из типов идеальных силовых установок для ракет и авиации [5–7].

В [8] изучалось воспламенение и горение борсодержащих капель керосина. Результаты показали, что горение суспензии проходит в два этапа: сначала горит жидкий компонент, оставляя позади агломерат бора, затем воспламеняется и горит агломерат. В экспериментальных исследованиях [9, 10] горения топлив с органическими гелеобразователями установлено, что капля геля такого топлива характеризуется слоем гелеобразователя, сформированным на поверхности капли из-за разделения фаз, что приводит к появлению пузырьков и струй.

В работе [11] показано, что небольшие частицы бора агломерируются раньше, чем попадают во вторую камеру сгорания канального ракетного двигателя. В прямооточном

© Xiao Yunlei, Xia Zhixun, Huang Liya, Ma Likun, Yang Dali, 2019.

College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, 410073 Changsha, People's Republic of China.

воздушно-реактивном ракетном двигателе, работающем на топливе с высоким содержанием порошка металла [12], в турбулентном потоке при взаимодействии частиц бора между собой могут формироваться локальные области течения с высокой плотностью частиц и даже агломераты, вовлеченные в многофазную реакцию.

В экспериментальном исследовании горения частиц бора [13] обнаружено, что одиночные частицы бора легко агрегируют и образуют более крупные агломераты. В [14] показано, что агломерат бора может воспламениться при 800 К. В [15] установлено, что процесс горения агломерата бора состоит из четырех этапов. В [16] при изучении механизма воспламенения агломератов бора размером $2 \div 3$ мм показано, что воспламенение протекает в два этапа.

Хотя у ПВРД с борсодержащим гелевым топливом имеется множество преимуществ, существуют и определенные практические сложности, связанные с особенностями распыления и сгорания топлива. По характеристикам распыления и горения борсодержащее гелевое топливо отличается от обычного — возникает проблема сгорания агломератов бора. Присутствие агломератов изменяет динамические отношения между различными фазами, это касается теплообмена, массообмена и процессов химического взаимодействия между фазами и самими частицами, что отличается от горения одиночной частицы бора. Поэтому необходимо изучить особенности воспламенения и горения агломератов бора в камере сгорания. Так как задача о стадийном горении капель геля достаточно сложна, для упрощения расчетов предполагается, что по свойствам и энергетическим особенностям склеивающий агент подобен керосину. Упростим задачу, рассматривая гелевое топливо как суспензию, состоящую из бора и керосина.

Аналогично предыдущим исследованиям, предложена модель воспламенения и горения агломерата частиц бора, которая может использоваться для расчета двухфазного потока в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя с суспензионным топливом на основе частиц бора. Проведена проверка результатов расчетов по этой модели сравнением со стационарным решением задачи термохимического равновесия. Детально анализируется влияние размера агломерата, расхода потока воздуха из обводного канала, начального диаметра и содержания частиц бора на эффективность сгорания топливной суспензии.

1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В настоящее время нет исследований, определяющих конкретные условия микровзрыва капель топлива. Механизмы микровзрыва капель суспензии и капель водосодержащих топлив имеют определенное сходство. В [17] разработана единая модель микровзрыва эмульгированных капель нефти и воды. Результаты показывают, что микровзрыва не происходит, если капля слишком мала для образования достаточно толстой масляной мембраны. Общий диаметр капли должен быть, по меньшей мере, вдвое больше, чем у диспергированных капель. В дизельном двигателе это возможно при достаточно мелком распылении. Из литературы известно, что диаметр капель, используемых в экспериментах по изучению микровзрыва, обычно превышает 200 мкм.

Испытания распыления топливной суспензии с бором показали, что диаметр капель суспензии после распыления меньше 200 мкм. Горение такой капли иллюстрирует рис. 1. Начальный диаметр капли составлял приблизи-

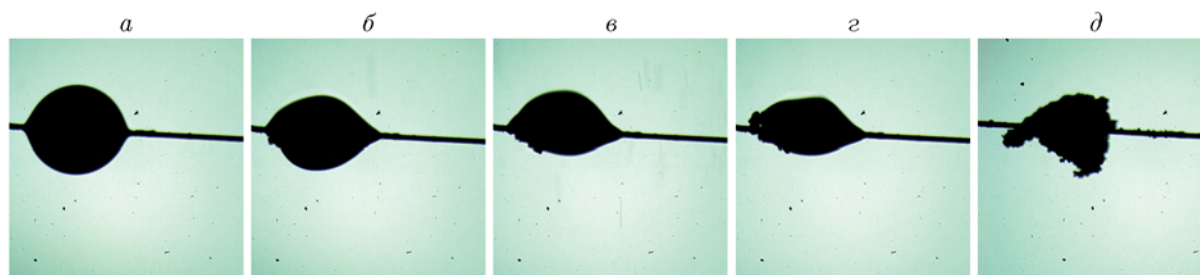


Рис. 1. Горение капли топливной суспензии

тельно 140 мкм, диаметр вольфрамовой проволоки, на которую подвешивалась капля, — 10 мкм. На рис. 1, d показан агломерат частиц бора, оставшихся после сгорания жидкого компонента. Вследствие этого явлением микровзрыва в расчетах пренебрегается. Вначале горит жидкий компонент, оставляя позади агломерат бора, затем воспламеняется и горит агломерат. Такой же результат получен в [8, 15].

1.1. Модель воспламенения агломерата бора

После испарения жидкого топлива из сферических частиц бора формируется агломерат радиусом r_a (рис. 2). Имеется n сферических частиц бора одного диаметра и равной температуры, при этом поверхность частиц бора покрыта пленкой оксида бора. Агломераты пористые, так что реагенты и продукты реакции газовой фазы могут проникать внутрь кластеров через пустоты. Для одиночных частиц бора рассматривается реакция бора с кислородом или водяным паром на поверхности частиц, и эта реакция соответствует модели сжимаемого ядра. Диаметр агломерата измеряется в специальном эксперименте. Количество частиц в агломерате может быть определено по массовой доле частиц бора и диаметру агломерата.

Чтобы сделать модель применимой для численного моделирования камеры сгорания двигателя суспензионного топлива, описание процесса горения агломерата бора упрощается за счет следующих предположений:

- 1) поскольку теплопроводность материала намного выше, чем газа, перепад температур вдоль радиуса агломерата отсутствует;
- 2) с учетом пористости агломератов предпола-

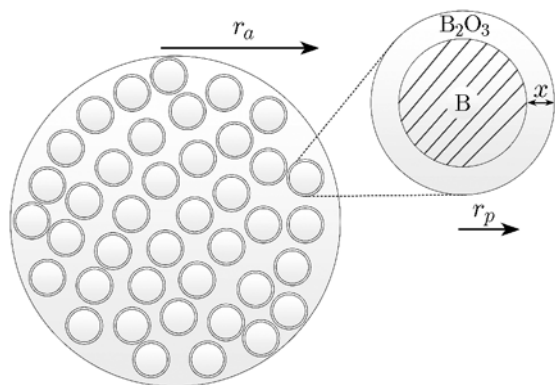


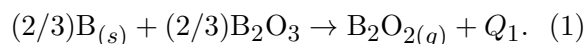
Рис. 2. Схема агломерата бора

гается, что внутренняя диффузия не ограничивает процесс;

3) концентрация окислителя на поверхности агломерата постоянна и равна концентрации окислителя в среде, т. е. внешняя диффузия не ограничивает процесс;

4) толщина оксидного слоя много меньше радиуса частицы, пренебрегается любое изменение радиуса частиц и агломерата в период воспламенения.

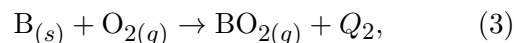
Воспламенение бора представляет собой процесс удаления оксидного слоя. В основном рассматриваются расход (изменение массы) оксидного слоя и реакция частиц с водяным паром и кислородом. Расход оксидного слоя определяется главным образом процессом испарения твердой фазы B_2O_3 . В [18] процесс испарения жидкого слоя оксида бора на стадии воспламенения частиц бора записан в виде



Для теплоты испарения $B_2O_{2(g)}$ получено значение $Q_1 = 72\,400$ кал/моль. Молярная удельная на площадь поверхности частицы скорость испарения $B_2O_{2(g)}$ с поверхности считается равной скорости диффузии $B_2O_{2(g)}$ от поверхности частицы до окружающего газа [19]. В предположении $p_{B_2O_2, \infty} = 0$ молярная скорость испарения на единицу площади поверхности может быть выражена как

$$R_1 = \frac{\alpha_1 \nu_1 p_{B_2O_2}^0}{1 + (\alpha_1 \nu_1) / [D_{B_2O_2, g} \text{Nu} / (2R_u T_p r_p)]}. \quad (2)$$

Здесь α_1 — коэффициент испарения полимера BO_n , ν_1 — коэффициент соударения Герца — Кнудсена для $B_2O_{2(g)}$, $p_{B_2O_2}^0$ — равновесное давление в $B_2O_{2(g)}$, $D_{B_2O_2, g}$ — коэффициент диффузии $B_2O_{2(g)}$ в газовой смеси, Nu — число Нуссельта, R_u — универсальная газовая постоянная, T_p — температура частиц, r_p — радиус частицы. В камере сгорания прямоточного двигателя на топливной суспензии взаимодействие кислорода и воды с бором оказывает большое влияние на воспламенение частиц бора. Реакция частиц бора с кислородом моделируется в виде прямой реакции

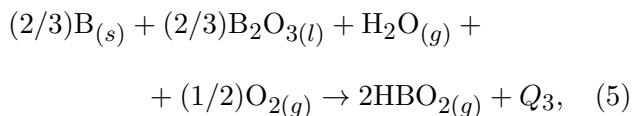


где $Q_2 = -68\,000$ кал/моль. Согласно [20] скорость этой реакции

$$R_2 = \frac{X_{\text{BO}}^0}{1/(\alpha_2 \nu_2 p_{\text{O}_2}) + x/(D_{\text{BO}} n_1)}. \quad (4)$$

Здесь X_{BO}^0 — равновесная молярная доля BO_n на поверхности $\text{B}_{(s)}-\text{B}_2\text{O}_3(l)$, $\alpha_2 = 0.035$, $\nu_2 = 7.84T_p^{-0.5}$ [моль/(см² · атм)], p_{O_2} — парциальное давление кислорода в окружающей газовой смеси, x — толщина оксида, $D_{\text{BO}} = 5.11 \cdot 10^{-5} \exp(-7500/T_p)$ [см²/с], $n_1 \approx 0.0266$ моль/см³.

Реакция частиц бора с парами воды также моделируется как прямая реакция



где $Q_3 = -10500$ кал/моль. Согласно [20] скорость этой реакции

$$R_3 = \frac{X_{\text{BO}}^0}{1/(\alpha_3 \nu_3 p_{\text{H}_2\text{O}}) + x/(D_{\text{BO}} n_1)}. \quad (6)$$

Здесь $\alpha_3 = 0.40 \exp(-5500/T)$, $\nu_3 = 10.54T_p^{-0.5}$ [моль/(см² · атм)], $p_{\text{H}_2\text{O}}$ — парциальное давление паров воды в окружающей газовой смеси.

Исходя из этого механизма уравнение баланса массы для отдельной частицы бора и слоя оксида бора в агломерате имеет вид

$$\frac{dr_p}{dt} = -\left(\frac{2}{3}R_1 + R_2 + \frac{2}{3}R_3\right)\frac{M_{\text{B}}}{\rho_{\text{B}}}, \quad (7)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\left(\frac{2}{3}R_1 + \frac{2}{3}R_3\right)\frac{M_{\text{B}_2\text{O}_3}}{\rho_{\text{B}_2\text{O}_3}}, \quad (8)$$

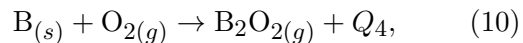
где M — молекулярная масса, ρ — плотность. Уравнение энергетического баланса для агломерата можно представить в виде

$$\begin{aligned} n \left[\frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_{\text{B}} c_{p,\text{B}} + 4 \pi r_p^2 h \rho_{\text{B}_2\text{O}_3} c_{p,\text{B}_2\text{O}_3} \right] \frac{dT_p}{dt} = \\ = 4 \pi r_a^2 [\sigma \varepsilon \alpha_R (T_{\text{rad}}^4 - T_p^4) + h(T_{\infty} - T_p)] + \\ + n 4 \pi r_p^2 [-(R_1 Q_1 + R_2 Q_2 + R_3 Q_3)], \quad (9) \end{aligned}$$

где c_p — теплоемкость при постоянном давлении, h — коэффициент конвективного теплообмена, σ — постоянная Стефана — Больцмана, $\varepsilon = 0.84$ — измеренная излучательная способность частиц бора на первой стадии горения.

1.2. Модель горения агломерата бора

Горение агломерата частиц бора намного более простой процесс, чем воспламенение. На этапе горения глобальной является реакция



где $Q_4 = 102$ ккал/моль. Считается, что скорость реакции контролируется как диффузией кислорода, так и химической кинетикой. Чтобы найти выражение для диффузии кислорода, рассмотрим закон его сохранения

$$\dot{m} \frac{dY_{\text{O}_2}}{dr} - \frac{d}{dr} \left(4 \pi r^2 \rho D_{\text{O}_2, \text{mix}} \frac{dY_{\text{O}_2}}{dr} \right) = 0 \quad (11)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \rho_w v_w Y_{\text{O}_2, w} - \rho_w D_{\text{O}_2, \text{mix}} \frac{dY_{\text{O}_2}}{dr} \Big|_w = \\ = -\dot{w}_{\text{O}_2, w} M_{\text{O}_2}, \quad (12) \end{aligned}$$

$$\frac{\dot{m}}{4 \pi r_w^2} = \dot{w}_{\text{B}} M_{\text{B}}, \quad (13)$$

где v — скорость, \dot{m} — массовый расход, \dot{w} — молярная скорость образования; индекс w относится к параметрам на поверхности. Интегрирование уравнения (11) с учетом того факта, что массовая концентрация O_2 на поверхности пористого агломерата бора ($Y_{\text{O}_2, w}$) при горении в воздухе или в реальной газовой смеси всегда меньше, чем на бесконечном расстоянии от частицы ($Y_{\text{O}_2, \infty}$), позволяет пренебречь $Y_{\text{O}_2, w}$ и получить следующее выражение для массового расхода:

$$\begin{aligned} \dot{m}_R = -4 \pi r_a^2 \rho_w v_w = \\ = -4 \pi r_a \rho D_{\text{O}_2} \ln(\beta Y_{\text{O}_2, \infty} + 1) \quad (14) \end{aligned}$$

(β — массовый стехиометрический коэффициент).

Изменение массы агломерата определяется как суммарное изменение масс частиц бора внутри агломерата, а изменение массы одиночной частицы бора равно

$$\begin{aligned} 4 \pi r_p^2 \rho_{\text{B}} \frac{dr_p}{dt} = \\ = -\frac{1}{n} 4 \pi r_a \rho D_{\text{O}_2} \ln(\beta Y_{\text{O}_2, \infty} + 1). \quad (15) \end{aligned}$$

Уравнение энергетического баланса для агломерата может быть представлено в виде

$$n \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho_{V, B(l)} \frac{dT_p}{dt} = n 4 \pi r_p^2 Q'_{V, O_2} \dot{\omega}_{O_2, w} + 4 \pi r_a^2 [h(T_\infty - T_p) + \sigma \varepsilon (T_\infty^4 - T_p^4)]. \quad (16)$$

В процессе горения размер частиц бора становится меньше. Если $r_p \rightarrow 0$, то $\frac{dr_p}{dt} \rightarrow \infty$ и происходит переход от диффузионного к лимитируемому кинетикой режиму горения. В данном исследовании для поверхностных реакций $O_2(g)$ с бором принимается механизм реакции, заданный в [21, 22]. Экспериментальная скорость преобразована в следующий вид:

$$\dot{m} = 4 \pi r_p^2 M_{V, B} k p X_{O_2, \infty}, \quad (17)$$

где p — полное давление смеси газа, $X_{O_2, \infty}$ — молярная доля кислородного компонента в окружающей среде, k измерено в экспериментах:

$$k = \begin{cases} 0.0625 \pm 0.0125, & T_p > 2400 \text{ К}, \\ (31.5/\sqrt{T_p}) \exp(-5630/T_p), & 1750 < T_p \leq 2400 \text{ К}, \\ (1.57 \cdot 10^8/\sqrt{T_p}) \exp(-32500/T_p), & 1600 < T_p \leq 1750 \text{ К}. \end{cases} \quad (18)$$

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПВРД

Чтобы доказать, что схема ПВРД на суспензионном топливе на основе бора реалистична и частицы бора могут сгорать, проведен эксперимент. Общий вид используемой в данном исследовании модельной установки с подключенными трубопроводами показан на рис. 3. Экспериментальная система включает в себя систему подачи суспензионного топлива, воздушнонагреватель, датчик усилия и испытательную камеру сгорания. Для получения высокотемпературного газа в нагревателе используются этанол, кислород и воздух, что позволяет имитировать параметры торможения при определенном состоянии полета. Параметры задаются следующими: полная температура 625 К, давление торможения 0.97 МПа, условия полета соответствуют полету на высоте 10 км с числом Маха 3.

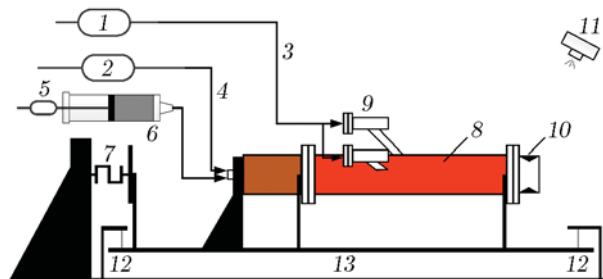


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

1 — воздушнонагреватель, 2 — баллон с воздухом, 3, 4 — трубопроводы для потоков воздуха 1 и 2, 5 — двигатель, 6 — система выдавливания топлива, 7 — датчик силы, 8 — камера сгорания, 9 — воздухозаборник, 10 — сопло, 11 — видеокамера, 12 — подвеска, 13 — испытательный стенд

Эффективность сгорания в камере определяется как соотношение экспериментальной (c_{exp}^*) и теоретической (c_{th}^*) характерных скоростей выхлопа:

$$\eta_{c^*} = c_{exp}^*/c_{th}^*. \quad (19)$$

Здесь c_{th}^* определяется термическими и химическими условиями в камере сгорания, а c_{exp}^* — по формуле

$$c_{exp}^* = \frac{p_0 A_t}{\dot{m}_0}, \quad (20)$$

где p_0 — измеренное давление в конце камеры, A_t — критическое сечение сопла, \dot{m}_0 — полная массовая скорость потока в камере сгорания,

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air1} + \dot{m}_{air2}, \quad (21)$$

\dot{m}_{fuel} , \dot{m}_{air1} , \dot{m}_{air2} — массовая скорость потоков соответственно суспензионного топлива, воздуха 1 и воздуха 2.

На рис. 4 показаны пламя и струя в ПВРД суспензионного топлива на основе бора. Для более четкой картины струи использовался фильтр с длиной волны излучения 546 нм. Изменения во времени давления в газогенераторе и камере сгорания представлены на рис. 5. Использовались следующие значения экспериментальных параметров: $\dot{m}_{fuel} = 9.3$ г/с, $\dot{m}_{air1} = 11$ г/с, $c_{th}^* = 1082$ м/с, $\dot{m}_{air2} = 253$ г/с, $A_t = 430$ мм², $c_{exp}^* = 1079$ м/с. Среднее давление на участке устойчивого горения в камере составляло 0.686 МПа. Эффективность сгорания топлива в камере сгорания около 99.7 %. Таким образом, эксперимент показал, что в камере сгорания может поддерживаться горение частиц бора.

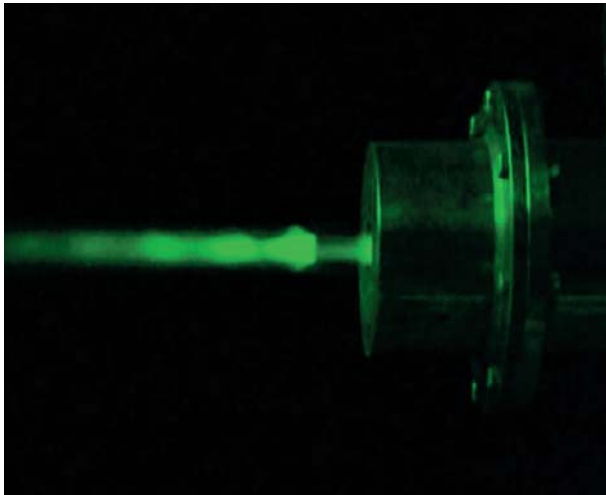


Рис. 4. Изображение испытания с горением

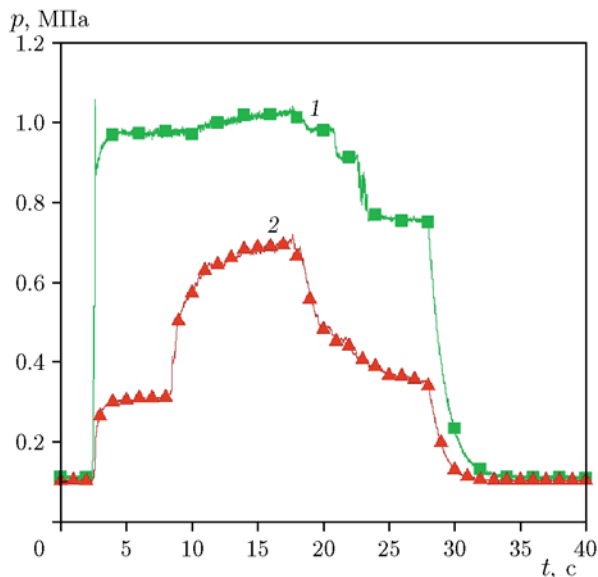


Рис. 5. Зависимости давления от времени в газогенераторе (1) и камере сгорания (2)

2.1. Численное моделирование

Все расчеты в рамках численного моделирования проводились с использованием коммерческого программного обеспечения FLUENT для последующей обработки. Процесс турбулентного горения в камере сгорания суспензионного топлива на основе бора довольно сложен и трудно моделируется. Он включает в себя описание турбулентного течения и горения газовой фазы, движение и горение частиц и т. д. В рамках подходов вычислительной гидродинамики (CFD) горение частиц опи-

сывается путем численного решения осредненных по времени уравнений сохранения газа и фазы частиц. Основная идея заключается в использовании источниковых членов, разделяющих газовую фазу и фазу частиц. Газовая фаза рассматривается в рамках эйлерова подхода и моделируется на основе решения стационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса. Фаза частиц описывается лагранжевым методом, а движение частиц отслеживается моделью дискретной фазы. Их обмен импульсом, массой и энергией с газовой фазой осуществляется методом двухступенчатого сцепления.

Было смоделировано и рассчитано трехмерное поле течения в камере сгорания ПВРД. Как показано на рис. 6, устройство состоит из стабилизатора пламени, камеры сгорания, двух обводных воздухозаборников и сопла. Воздух подается в две зоны камеры сгорания. Один путь подачи воздуха в камеру сгорания — от головной части двигателя. Основная часть воздуха обходит основную камеру сгорания и подается в заднюю камеру. Количество расчетных узлов в области составляет около 700 000.

Для проверки независимости результатов от сетки было выбрано распределение температуры на центральной линии за стабилизатором пламени (l — расстояние от входа в камеру сгорания). За стабилизатором пламени находится основная зона смешения и реакции, и изменения температуры достаточно для проверки влияния сеточного разрешения. Влияние трех наборов сеток на распределение температуры показано на рис. 7: грубая сетка — около 500 000 ячеек, средняя — около 700 000, мелкая — около 800 000 ячеек. Видны различия между решениями на грубой и средней сетках, однако решения на средней и мелкой сетках совпадают, что указывает на то, что дальнейшее измельчение сетки не имеет большого значения.

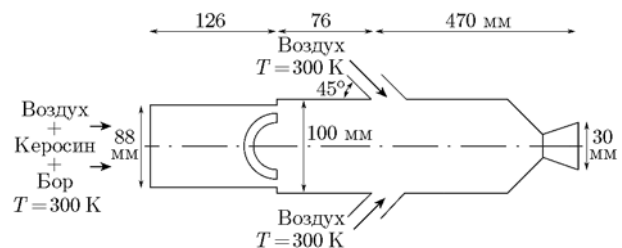


Рис. 6. Схема моделируемой камеры сгорания ПВРД, работающего на воздушно-керосиновой смеси с добавлением бора

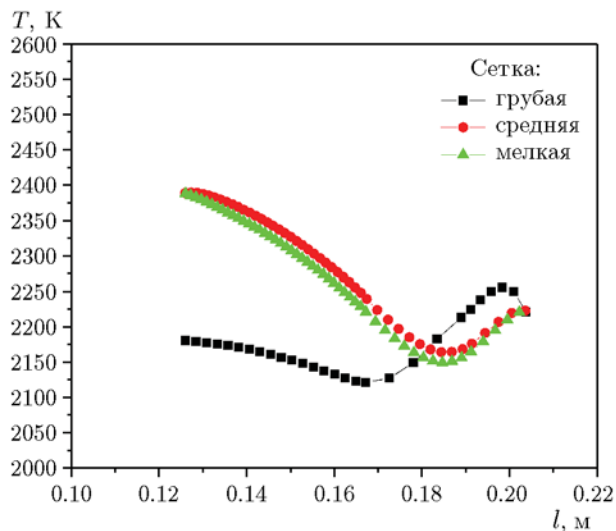
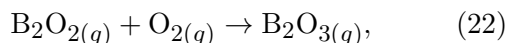


Рис. 7. Распределения температуры вдоль средней линии, рассчитанные при разных разрешениях

В камере сгорания для газовой фазы рассматриваются две одноступенчатые реакции:



Для моделирования газового горения использовались модель диссипации вихря и условие стационарности.

2.2. Движение частиц

Отдельные частицы бора впрыскивались дискретно в поле течения горелки, в то же время вокруг каждой частицы бора предполагалась виртуальная агломерация частиц бора, а параметры агломерата использовались для расчета характеристик воспламенения и горения частиц бора и их движения в потоке. В модели дискретной фазы бор рассматривается как точечная частица без учета объема, а обмен импульсами, массой и энергией происходит между полями течения частиц и газа. Процесс обмена импульсами в основном зависит от модели движения частиц. Для обмена массой и энергией используется модель воспламенения и горения агломерата бора, представленная в § 1. Эти модели содержат такие параметры, как диаметр и число частиц в агломерате, отражающие влияние агломерата на весь процесс горения.

Уравнение движения частиц в камере сгорания может быть определено следующим образом:

$$m_a \frac{dv_a}{dt} = F_a, \quad (24)$$

где m_a , v_a — масса и скорость агрегата, F_a — силы, действующие на агрегат. В данном исследовании рассматриваются только сила сопротивления и сила тяжести, поэтому вышеприведенное уравнение можно переписать в виде

$$\frac{dv_a}{dt} = F_D(v_g - v_a) + \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_a} g. \quad (25)$$

Здесь F_D — сила сопротивления,

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_a d_a^2} \frac{C_D \text{Re}_a}{24}; \quad (26)$$

μ — динамическая вязкость; d_a — диаметр агломерата; Re_a — относительное число Рейнольдса агломерата,

$$\text{Re}_a = \frac{\rho d_a |v_g - v_a|}{\mu}; \quad (27)$$

C_D — коэффициент сопротивления в заданном интервале чисел Рейнольдса Re_a агломерата, определяемый из стандартного уравнения Морси и Александра [23]

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}_a} + \frac{a_3}{\text{Re}_a^2}, \quad (28)$$

где a_1 , a_2 , a_3 — константы, значения которых можно найти в [23].

2.3. Численное решение

За исключением указанных случаев, начальный диаметр одиночных частиц бора в агломерате принимался равным 3 мкм, толщина начального оксидного слоя на поверхности частиц бора 0.1 мкм, массовый расход воздуха во входном сечении верхней части двигателя составлял 38 г/с, расход байпасного воздушного потока 80 г/с, расход топливной суспензии 5 г/с. Массовая доля частиц бора в топливе составляет 10 %, массовая доля керосина — 90 %, начальный диаметр капель керосина 30 мкм.

Численный расчет поля течения представляет определенные сложности, и за один шаг

моделирования невозможно добиться сходимости. Поэтому расчет проводится в два шага, и решение первого шага служит начальным условием для следующего шага. На первом шаге рассчитывается холодное поле течения, включая определение массы, импульса, энергии и решение уравнения турбулентности. На втором шаге вводятся капли и выполняется расчет для них. Наконец, поле течения определяется итеративно до тех пор, пока не будет достигнута сходимость до заданной точности.

2.4. Анализ поля течения и верификация

На рис. 8 показано поле температуры. Как видно из рисунка, максимальная температура камеры сгорания в двигателе 2507 К, область высоких температур сконцентрирована позади стабилизатора пламени и около воздухозаборника. Из анализа поля течения можно заметить, что имеется зона рециркуляции с задней стороны стабилизатора пламени и у входа воздухозаборника. Из распределения содержания CO₂ (рис. 9) можно сделать вывод, что зона рециркуляции — основная область формирования H₂O и CO₂ и сгорание керосина происходит главным образом в этой области. На рис. 10 представлено распределение концентра-

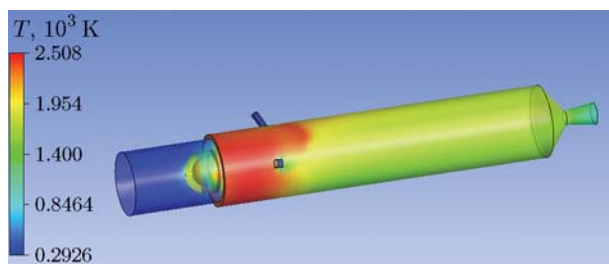


Рис. 8. Поле температуры на стенке камеры сгорания

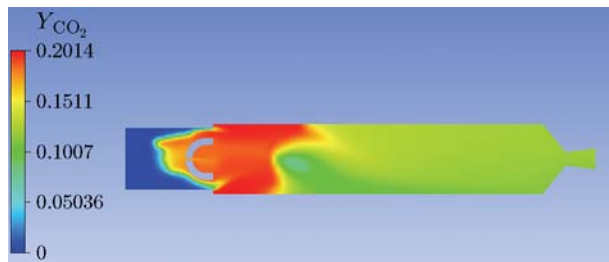


Рис. 9. Распределение массовой доли CO₂ в центральном сечении камеры сгорания

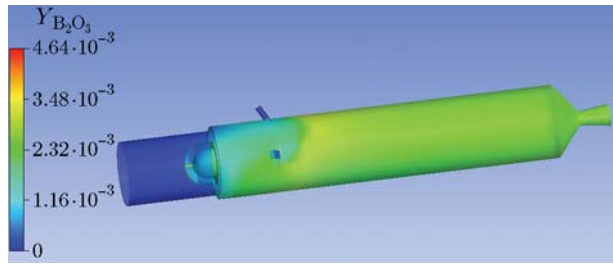


Рис. 10. Распределение массовой доли B₂O₃ на стенке камеры сгорания

Сравнение параметров на выходе с расчетом по СЕА

Источник	CO ₂	H ₂ O	O ₂	T, К
	Массовая доля			
Настоящая работа	0.1167	0.04579	0.097	1 222
СЕА	0.1126	0.04692	0.090	1 266

ции B₂O₃ в камере сгорания. Видно, что формирование B₂O₃ в основном происходит позади воздухозаборника. Горение частиц бора требует обогащения кислородом, поэтому основная область сгорания бора сконцентрирована позади воздухозаборника. Сравнение нашего решения для поля течения с решением СЕА (см. таблицу) показало хорошее их согласование. После того как воздух из байпасного канала добавляется в камеру сгорания, температура на выходе из сопла становится 1 222 К, что несколько ниже значения 1 266 К, определенного по термодинамическим расчетам. Согласно результатам термодинамических расчетов, на выходе весь B₂O₃ находится в жидком состоянии. Из-за сложности процесса конденсации B₂O₃ модель конденсации не была включена в численное моделирование. Это может быть одной из причин более низких значений температуры в численных расчетах.

Результаты численного моделирования показывают, что керосин можно сжечь полностью вблизи стабилизатора пламени. Эффективность горения в данном двигателе в основном зависит от эффективности сгорания частиц бора. Эффективность сгорания частиц в камере определяется как

$$f = 1 - M_{p,t}/M_{p,0}, \tag{29}$$

где $M_{p,t}$ — масса бора, $M_{p,0}$ — масса бора на входе.

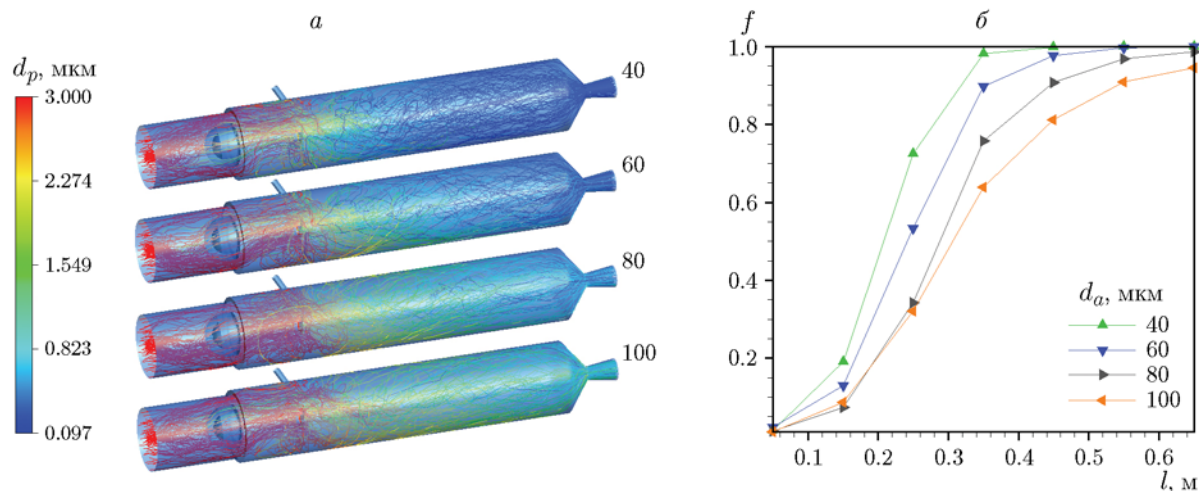


Рис. 11. Сравнение эффективности сгорания частиц бора при различных размерах агломератов

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

3.1. Влияние размера агломерата частиц бора на эффективность сгорания частиц

Для изучения влияния размера агломерата бора на эффективность сгорания частиц бора в двигателе были проведены расчеты при четырех диаметрах агломератов — 40, 60, 80 и 100 мкм. Рис. 11, *а* иллюстрирует изменение диаметра одиночной частицы бора внутри двигателя при разных условиях, а рис. 11, *б* — изменение эффективности сгорания частиц бора по длине камеры сгорания. Результаты показывают, что время горения частиц бора увеличивается с ростом диаметра агломерата и в то же время основная зона горения движется вверх по потоку. Когда диаметр агломерата увеличивается до 100 мкм, полного сгорания частиц бора в этой конфигурации двигателя не достигается. Согласно модели воспламенения и горения из § 1, с увеличением диаметра агломерата ускоряется накопление тепла агломерата, уменьшается температура воспламенения частиц бора и сокращается время задержки воспламенения. С другой стороны, с увеличением диаметра агломерата ограничивается скорость горения частиц бора, так что время их горения возрастает. Большая доля частиц бора расходует на стадии горения, поэтому эффективность горения в двигателе уменьшается с увеличением диаметра агломератов частиц бора.

3.2. Влияние массового расхода воздуха из обводного канала на эффективность сгорания

На рис. 12 показано изменение диаметра частиц бора в зависимости от массового расхода воздуха, поступающего в двигатель через обводной канал. Массовый расход воздуха из обводного канала составлял 40, 60, 80 и 100 г/с. Из рисунка видно, что по мере роста расхода воздушного потока основная зона горения частиц бора движется вниз по потоку, а эффективность сгорания двигателя повышается. По мере увеличения потока воздуха концентрация кислорода в камере сгорания двигателя увеличивается. С возрастанием концентрации кислорода сокращаются период задержки воспламенения частиц бора и время их горения. Поэтому эффективность горения в двигателе увеличивается с ростом расхода воздуха. При уменьшении расхода воздуха до 40 г/с в таком двигателе невозможно достичь полного сгорания частиц бора.

3.3. Влияние размера частиц бора на эффективность сгорания

Влияние начального диаметра частиц бора d_B^0 на поле течения исследовалось на примере агломерата диаметром 40 мкм. Поле потока было рассчитано при $d_B^0 = 3, 5, 7$ мкм. На рис. 13 показано, как изменяются в этих случаях диаметр частиц бора и эффективность их сгорания. Как и ожидалось, более высокая эффективность сгорания достигается при меньших начальных размерах частиц. Увеличение

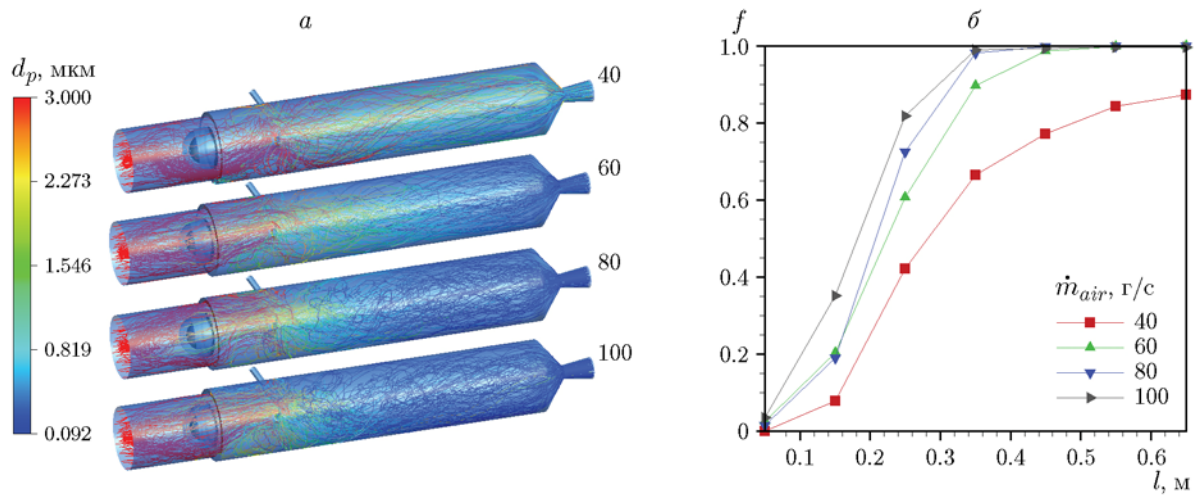


Рис. 12. Сравнение эффективности сгорания частиц бора при различных расходах воздуха

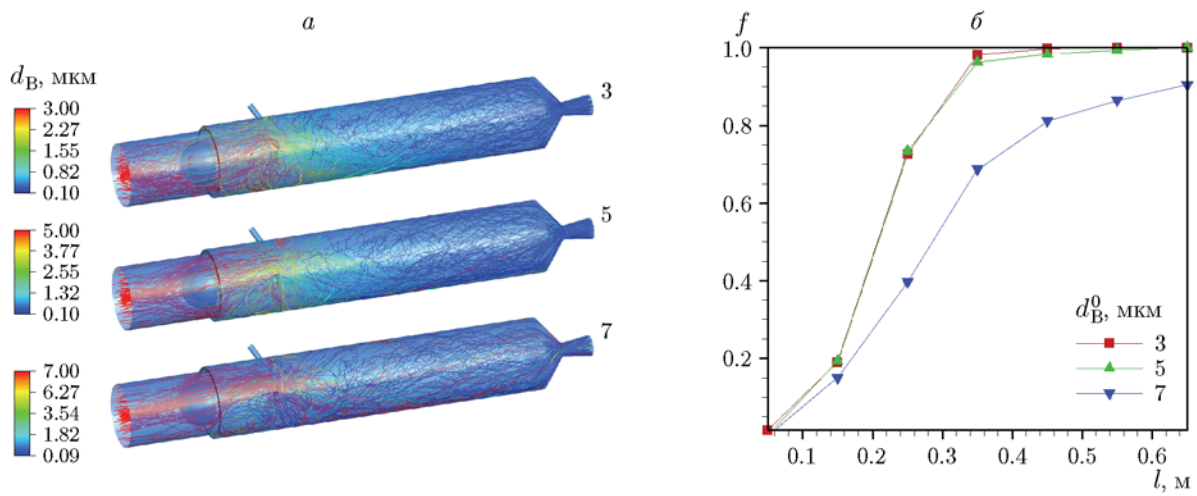


Рис. 13. Сравнение эффективности сгорания частиц бора различного размера

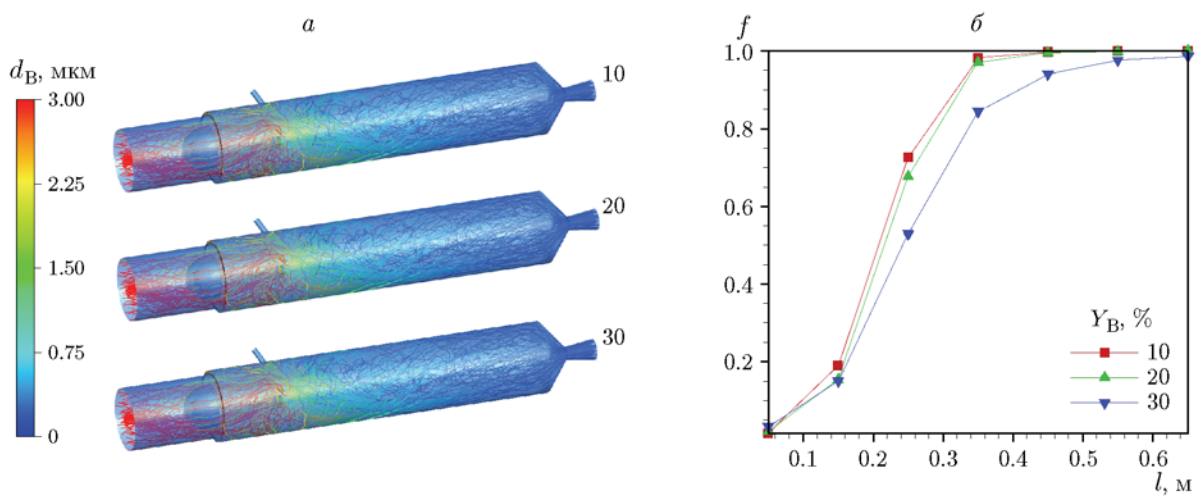


Рис. 14. Сравнение эффективности сгорания частиц бора при различном их содержании

диаметра частиц увеличивает время их горения. Результаты расчетов показывают, что в условиях, принятых в этой работе, частицы начального диаметра 5 мкм и менее сгорают хорошо, а частицы диаметром 7 мкм не достигают полного сгорания.

3.4. Влияние содержания частиц бора на эффективность сгорания

Чтобы изучить влияние содержания частиц бора на эффективность их сгорания, были выполнены сравнительные расчеты при различных массовых долях частиц бора — 10, 20 и 30 %. Как видно из рис. 14, эффективность сгорания частиц бора уменьшается с увеличением их содержания. С ростом содержания частиц увеличивается время горения отдельной частицы.

ВЫВОДЫ

Процесс сжигания капель топлива на основе бора регистрировался высокоскоростной цифровой видеокамерой. Предложена модель воспламенения и горения частиц бора. На основе модели разработан численный метод расчета поля течения в ПВРД, работающего на топливной суспензии с частицами бора. Изучены процессы горения и течения внутри двигателя. Проведен эксперимент со струйной камерой сгорания с использованием суспензионного топлива на основе бора с целью отработки конфигурации струи и верификации сгорания частиц бора.

Экспериментально показано, что в процессе сжигания капель суспензии образуются агломераты частиц бора. Установлено также, что в камере может поддерживаться сгорание частиц бора. Численные результаты показывают, что керосин в двигателе с борсодержащим керосиновым топливом может полностью сгорать в передней части камеры сгорания. Ключом к повышению эффективности сгорания топлива в двигателе является организация процесса горения частиц бора. Эффективность сгорания в двигателе уменьшается с увеличением диаметра агломератов, начального диаметра частиц бора и их содержания, а с увеличением массового расхода воздуха из байпасного канала она повышается. Если диаметр агломератов превышает 100 мкм или массовый расход воздуха составляет менее 50 г/с, сгорание

частиц бора в условиях, принятых в расчетах, не является полным.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 51406231). Авторы выражают благодарность рецензентам за их критические и конструктивные рекомендации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Natan B., Rahimi S.** The status of gel propellants in Year 2000 // *Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul.* — 2002. — V. 5. — P. 1–6.
2. **Guan H., Li G., Zhang N.** Experimental investigation of atomization characteristics of swirling spray by ADN gelled propellant // *Acta Astronaut.* — 2018. — V. 144. — P. 119–125.
3. **Haddad A., Natan B., Arieli R.** The performance of a boron loaded gel fuel ramjet // *Prog. Propul. Phys.* — 2011. — V. 2. — P. 549–568.
4. **Gany A.** Combustion of boron-containing fuels in solid fuel ramjets // *Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul.* — 1991. — V. 2. — P. 91–112.
5. **Gany A.** Thermodynamic limitation on boron energy realization in ramjet propulsion // *Acta Astronaut.* — 2014. — V. 98, N 1. — P. 128–132.
6. **Fry R. S.** A century of ramjet propulsion technology evolution // *J. Propul. Power.* — 2004. — V. 20, N 1. — P. 27–58.
7. **Hewitt P. W.** Status of ramjet programs in the United States // *Proc. of the 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf.* — 2008. — P. 1–10.
8. **Antaki P., Williams F. A.** Observations on the combustion of boron slurry droplets in air // *Combust. Flame.* — 1987. — V. 67, N 1. — P. 1–8.
9. **Nachmoni G., Natan B.** Combustion characteristics of gel fuels // *Combust. Sci. Technol.* — 2000. — V. 156, N 1. — P. 139–157.
10. **Solomon Y., Natan B.** Experimental investigation of the combustion of organic-gellant-based gel fuel droplets // *Combust. Sci. Technol.* — 2006. — V. 178, N 6. — P. 1185–1199.
11. **King M. K.** A review of studies of boron ignition and combustion phenomena at Atlantic Research Corporation over the past decade // *Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul.* — 1991. — V. 2. — P. 1–81.
12. **Kazaoka Y., Takahashi K., Tanabe M., et al.** Combustion characteristics of boron particles in the secondary combustor of ducted rockets // *Proc. of the 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf.* — 2001. — P. 1–6.
13. **Гуревич М. А., Кирьянов И. М., Озеров Е. С.** Горение одиночных частиц бора // *Физика горения и взрыва.* — 1969. — Т. 5, № 2. — С. 217–222.
14. **Шевчук В. Г., Золотко А. Н., Полищук Д. И.** Воспламенение конгломератов частиц бора // *Физика горения и взрыва.* — 1975. — Т. 11, № 2. — С. 218–223.

15. **Holl J. T., Turns S. R., Solomon A. S. P., Faeth G. M.** Ignition and combustion of boron slurry agglomerates // *Combust. Sci. Technol.* — 1986. — V. 45, N 3-4. — P. 147–166.
16. **Mi X., Goroshin S., Higgins A. J., Stowe R., Ringuette S.** Dual-stage ignition of boron particle agglomerates // *Combust. Flame.* — 2013. — V. 160, N 11. — P. 2608–2618.
17. **Fu W. B., Hou L. Y., Wang L. P., Ma F. H.** A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water // *Fuel Proces. Technol.* — 2002. — V. 79. — P. 107–119.
18. **Scheer M. D.** The molecular weight and vapor pressure of gaseous boron suboxide // *J. Phys. Chem.* — 2002. — V. 62, N 4. — P. 490–493.
19. **King M. K.** Boron particle ignition in hot gas streams // *Combust. Sci. Technol.* — 1974. — V. 8, N 5. — P. 255–273.
20. **Li S. C., Williams F. A.** Ignition and combustion of boron in wet and dry atmosphere // *Symp. (Int.) on Combustion.* — 1991. — V. 23, N 1. — P. 1147–1154.
21. **Mohan G., Williams F. A.** Ignition and combustion of boron in O₂/inert atmospheres // *AIAA J.* — 1972. — V. 10, N 3. — P. 776–783.
22. **Ulas A., Kuo K. K., Gotzmer C.** Ignition and combustion of boron particles in fluorine-containing environments // *Combust. Flame.* — 2001. — V. 127. — P. 1935–1957.
23. **Morsi S. A., Alexander A. J.** An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // *J. Fluid Mech.* — 1972. — V. 55. — P. 193–208.

Поступила в редакцию 14.08.2018.

После доработки 19.10.2018.

Принята к публикации 28.11.2018.
