ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022 Математика и механика № 78
Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics

Научная статья
УДК 531.352
doi: 10.17223/19988621/78/5

Исследование процессов в генераторе плазмы импульсного МГД-генератора на комбинированном пиротехническом топливе

Антон Геннадьевич Афонин[1], Владимир Григорьевич Бутов[2], Виктор Александрович Солоненко[3], Алексей Александрович Ящук[4], Андрей Андреевич Якушев[5]

[1, 2, 3, 4] Томский государственный университет, Томск, Россия
[5] АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Московская область, Россия
[1] aag@niipmm.tsu.ru
[2] bvg@niipmm.tsu.ru
[3] vik@niipmm.tsu.ru
[4] rainbow@niipmm.tsu.ru

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования процессов в двухкамерном генераторе плазмы импульсного МГД-генератора. Генератор плазмы МГДГ состоит из газогенератора и камеры дожигания, куда подаются газогенераторный газ и сжатый воздух, в кислороде которого происходит дожигание Mg с образованием жидких частиц MgO.

Построенная математическая модель позволяет исследовать процессы в камере дожигания и получить необходимые данные для дальнейшего определения формы разгонного сопла и параметров МГД-канала.

Ключевые слова: МГД-генератор, генератор плазмы, комбинированное топливо, камера дожигания, многокомпонентное течение, течение с частицами, математическое моделирование, параметрический анализ

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

Для цитирования: Афонин А.Г., Бутов В.Г., Солоненко В.А., Ящук А.А., Якушев А.А. Исследование процессов в генераторе плазмы импульсного МГД-генератора на комбинированном пиротехническом топливе // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 78. С. 60–73. doi: 10.17223/19988621/78/5

© А.Г. Афонин, В.Г. Бутов, В.А. Солоненко и др., 2022

Original article

A Study of processes in a plasma generator of the pulsed MHD generator running on a combined pyrotechnic fuel

Anton G. Afonin[1], Vladimir G. Butov[2], Victor A. Solonenko[3], Aleksey A. Yashchuk[4], Andrey A. Yakushev[5]

[1, 2, 3, 4] Tomsk State University, Tomsk, Russian
[5] Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Russian Federation
[1] aag@niipmm.tsu.ru
[2] bvg@niipmm.tsu.ru
[3] vik@niipmm.tsu.ru
[4] rainbow@niipmm.tsu.ru

Abstract. This paper presents the results of numerical simulation of the processes in a two-chamber plasma generator of the pulsed MHD generator running on combustion products of a combined pyrotechnic fuel with afterburning in air oxygen. A mixture of Mg powder (a fuel) and KNO_3 powder (an oxidizer and a source of the easily ionized additive) is chosen as a pyrotechnic fuel. The considered plasma generator includes a gas generator and an afterburner. Multicomponent combustion products of the selected pyrotechnic fuel contain solid particles of MgO and gaseous Mg. Within the afterburner, the unburnt Mg is burned up in the presence of air oxygen, forming MgO liquid particles. The proposed mathematical model allows one to numerically investigate all the processes occurring in a plasma generator of an MHD generator with an afterburner and to obtain the required data for determining the shape of the accelerating nozzle and the relevant parameters for calculations in the MHD channel.
Keywords: pulsed MHD generator, plasma generator, combined fuel, afterburner, multicomponent flow, multiphase flow, mathematical modeling, parametric analysis

Acknowledgments: This work was supported by the Tomsk State University Competitiveness Improvement Program.

For citation: Afonin, A.G., Butov, V.G., Solonenko, V.A., Yashchuk, A.A., Yakushev, A.A. (2022) A study of processes in a plasma generator of the pulsed MHD generator running on a combined pyrotechnic fuel. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 78. pp. 60–73. doi: 10.17223/19988621/78/5

Введение

В работе [1] показана возможность использования для импульсных МГД-генераторов экологически безопасных плазмообразующих топлив на основе горючего из металлов Mg, Al и их смесей. Эти топлива, называемые пиротехническими, применяются в виде прессованных составов (блоков), содержащих твердый окислитель, например селитру KNO_3, являющуюся, кроме этого, источником легкоионизируемой присадки. Такие составы способны к самостоятельному горению, а для непрореагировавшего металла можно организовать дожигание его

в воздухе в двухкамерном генераторе плазмы (ГП), состоящем из газогенератора (ГГ) и камеры дожигания (КД). Топливо, предполагающее дожигание, называется комбинированным топливом (КТ) [1, 2].

В данной работе для проектирования двухкамерного генератора плазмы выбрано КТ рецептуры ($0.64 \cdot Mg + 0.35 \cdot KNO_3$) + 1% добавки + воздух. Добавки содержат $0.6\% \cdot KF$ и 0.4% индустриального масла с формулой $C_{71.9008}H_{195.8845}O_{1.225}$ и энтальпией образования $\Delta H = 51.045$ кДж/кг. Продукты сгорания выбранного КТ содержат свободный Mg только в газовой фазе, а конденсированная фаза представлена только твердыми частицами MgO.

Данный состав, как показано экспериментально в [1, 2], является лучшим из трех рассмотренных составов по устойчивости процесса горения КТ, истечению продуктов сгорания из газогенератора и по минимальному времени пребывания продуктов сгорания в камере дожигания до полного сгорания свободного Mg даже при коэффициенте избытка воздуха < 1.

Конструкция генератора плазмы

При определении облика конструкции ГП и его параметров использовались данные по конструктивной схеме двухкамерного ГП модельного МГД-генератора Памир-0-КТ [1, 2], которые по подобию переносились на проектируемый ГП. Рассматриваемый ГП состоит из газогенератора, узла подачи газогенераторного газа и сжатого воздуха в камеру дожигания и самой камеры дожигания (рис. 1). В газогенераторе используется гильзованный заряд КТ указанного выше состава с плотностью ≈ 1 700 кг/м^3. Авторы [1, 2] экспериментально определили, что скорость горения этого КТ составляет 50 мм/с при давлении 5 МПа, что можно использовать для оценки времени горения заряда КТ в проектируемом ГП.

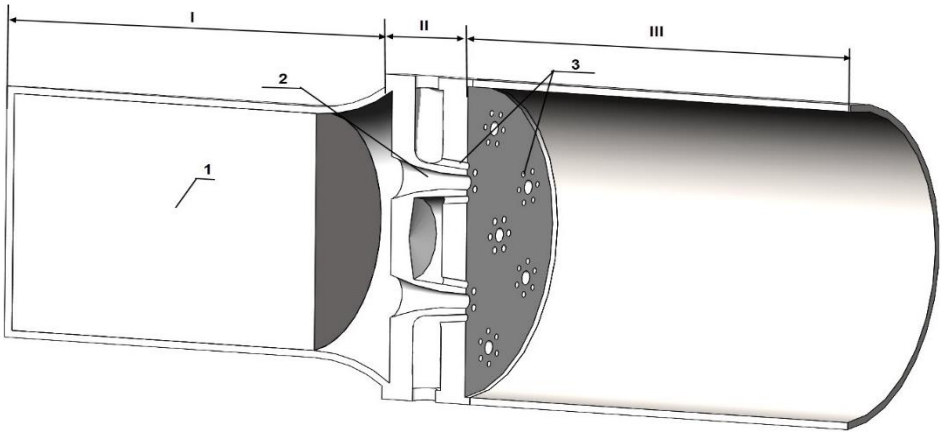

Рис. 1. Конструктивная схема генератора плазмы: *I* – газогенератор; *II* – узел подачи в КД газогенераторного газа и сжатого воздуха; *III* – камера дожигания; *1* – заряд КТ; *2* – сопла подачи продуктов сгорания КТ; *3* – сопла подачи сжатого воздуха

Fig. 1. Structural design of a plasma generator: *I* – gas generator; *II* – unit for gas and air supply to the afterburner; *III* –afterburner; (*1*) combined fuel charge; (*2*) injectors of combined fuel combustion products; and (*3*) compressed air injectors

Узел подачи в камеру дожигания газогенераторного газа (оставшийся газообразный Mg, твердые частицы MgO и другие компоненты), а также сжатого воздуха должен обеспечивать однородность поля скоростей и концентраций в камере дожигания при ее минимальной длине. Сам узел подачи представляет собой плоскую головку (по аналогии с ЖРД) с сотовым расположением сопел для истечения продуктов сгорания КТ и сжатого воздуха (окислителя): двенадцать сопел для подачи газогенераторного газа, вокруг каждого из них расположены шесть сопел для подачи сжатого воздуха (см. рис. 1). Размеры сопел и другие конструктивные размеры ГП были определены расчетным путем для заданных основных параметров МГД-канала.

Расчет параметров газогенератора и камеры дожигания

Значения параметров генератора плазмы определяются по выходным характеристикам МГД-канала, облик и параметры которого, в свою очередь, определяются по параметрам на выходе камеры дожигания. Таким образом, расчет ГП проводится следующим образом.

1. Для рассматриваемого состава КТ проводится расчет основных характеристик МГД-канала в соответствии с методикой [3, 4]. Задается осредненное по площади сечения на входе в МГД-канал число Маха M_1. Для предварительно выбранных давления и температуры продуктов сгорания КТ на выходе КД и числа M_1 проводится расчет термодинамических и газодинамических параметров на входе в МГД-канал с использованием пакета прикладных программ «Плазма» [5]. После задания значений двух опорных параметров (например, электрической мощности МГД-генератора и полной силы тока) определяются габаритные характеристики МГД-канала и магнитной системы, а также определяется массовый расход продуктов сгорания $\dot{m}$ на его входе.

2. Подбираются давление и температура в газогенераторе для осуществления послойного горения и образования газогенераторного газа с расходом, согласованным со значением полного расхода $\dot{m}$ в МГД-генераторе и расходом воздуха, поступающего в камеру дожигания, величина которого определяется заданием коэффициента избытка окислителя α.

3. После выбора конструктивных параметров ГП, разгонного сопла и МГД-канала возможно проведение расчетов характеристик с использованием полных моделей процессов в МГД-генераторе.

В камере дожигания рассматривается многокомпонентное двухфазное турбулентное течение газа и полидисперсных твердых и жидких частиц MgO. Параметрические расчеты проведены с использованием конечно-объемной модели в программном комплексе ANSYS CFX. Предлагаемая модель течения позволяет проводить комплексные расчеты течения двухфазной многокомпонентной смеси в полной постановке с учетом пространственного турбулентного характера течения, протекания равновесных химических реакций между компонентами газовой смеси, процесса перехода частиц MgO из твёрдого в жидкое состояние, тепловых процессов в камере дожигания.

Термодинамические параметры газогенераторного газа на входе КД определялись в приближении термодинамического равновесия с помощью программы «Плазма» [5]. Сравнение полученных результатов с аналогичными расчетами в программах «Терра» [6, 7] и CEA [8, 9] показало удовлетворительное совпадение. В отличие от программ «Терра» и CEA, «Плазма» позволяет рассчитать электро-

проводность и подвижность электронов продуктов сгорания плазменных топлив, причем точность расчетов подтверждена экспериментальными испытаниями на созданных к настоящему времени импульсных МГД-генераторах.

На входе в КД (см. рис. 1, *II*) задавались расходы газовой смеси определенного состава с частицами, поступающей из сопел *2* (с температурой 2 176 К), и воздуха (с температурой 300 К), подаваемого через сопла *3* (см. рис. 1). Массовые доли основных компонентов газогенераторного газа, поступающего из ГГ в камеру дожигания, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состав основных компонентов газогенераторного газа

Вещества	MgO(тв)	Mg(г)	K	N_2	KCN	K_2	Mg_2	Mg_3N_2	KF	MgF
Массовые доли	0.419	0.378	0.122	0.044	0.017	0.005	0.005	0.004	0.003	0.002

Температура на внутренней стенке цилиндрической камеры дожигания, покрытой кварцевой керамикой, принималась равной 1 600ºС.

В модели для совместного описания течения газовой смеси с частицами выбран дискретно-траекторный подход Эйлера–Лагранжа [10–15], в котором для частиц дисперсной фазы используется подход Лагранжа, а для газовой фазы – подход Эйлера.

Для описания турбулентного течения газовой фазы используются эйлеровы переменные, $i = 1, 2, 3$. Течение в данной точке пространства во времени характеризуется вектором скорости $\mathbf{U}$ с компонентами u_i, а также термодинамическими параметрами: давлением p, плотностью газовой смеси ρ, температурой T.

Полидисперсный ансамбль твердых или жидких частиц дисперсной фазы характеризуется скоростями $\mathbf{V_j}$ с компонентами v_{ij}, температурой T_j, распределенной плотностью $\rho_{sj} = n_{sj}(\mathbf{x}, t) \cdot m_j$, массой m_j и концентрацией n_{sj} частиц j-й фракции, $j = 1, \ldots, N$.

Двухфазное течение газа с частицами в камере дожигания описывается на основе законов сохранения массы, импульса, энергии и числа атомов. Уравнение неразрывности для осредненных по времени величин (здесь и далее подразумевается, что по повторяющимся индексам проводится суммирование):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_k\right) = Q, \tag{1}$$

где Q – общая массовая скорость расходования и появления газовых компонент в процессе химических превращений.

Уравнения сохранения импульса:

$$\frac{\partial\left(\rho u_i\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_i u_k\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^{N} C_{Rj}\rho_{sj}\left(v_{ij} - u_i\right) + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k}, \tag{2}$$

где C_{Rj} – коэффициент силового взаимодействия между газовой фазой и частицами.

Тензор вязких напряжений без учёта влияния градиентов давления имеет вид:

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu\,\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k},$$

где μ – динамическая вязкость, δ_{ij} – символ Кронекера.

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial\left(\rho h_0 - p\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_k h_0\right) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(u_i \tau_{ik}\right) + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_k}\right) + \sum_{j=1}^{N} C_{Lj} \rho_j (T_j - T)\,, \qquad (3)$$

где $h_0 = h + 0.5\,\mathbf{U}^2$ – полная энтальпия смеси, λ – коэффициент теплопроводности газовой смеси, C_{Li} – коэффициент теплового взаимодействия между газовой фазой и частицами.

Уравнения движения и энергии для частиц *j*-й фракции, записанные вдоль траектории частиц, имеют вид:

$$m_j \frac{dv_{ij}}{dt} = C_{Rj} \rho_{sj} \left(v_{ij} - u_i\right)^2,\ m_j c_s \frac{dT_j}{dt} = C_{Lj}\left(T_j - T\right) + l_m \frac{dm_j}{dt} + \varepsilon \pi d_j^2 \left(\pi I - \sigma n^2 T_j^4\right), \qquad (4)$$

где c_s – теплоемкость, l_m – удельная теплота образования частиц.

Коэффициенты, C_{Rj} и C_{Lj}, имеющие вид $C_{Rj} = 0.5 C_d A_{pj}$ и $C_{Lj} = \pi d_j \lambda \mathrm{Nu}$, определяются из решений модельных задач или из результатов экспериментов на специально созданных стендах [10, 12–15]. C_d – коэффициент сопротивления частицы, d_j и A_{pj} – диаметр и площадь поперечного сечения частиц *j*-й фракции соответственно, Nu – число Нуссельта, ε – коэффициент черноты частиц, I – интенсивность излучения, σ – постоянная Стефана–Больцмана, n – показатель преломления среды (в расчетах брался равным 1).

Уравнение неразрывности для частиц *j*-й фракции имеет вид [10, 12–15]:

$$\frac{\partial \rho_{sj}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho_{sj} v_{jk}\right) = \sum_{l=1}^{N} J_{lj}\,, \qquad (5)$$

где J_{lj} – интенсивность обмена массой между *l*-й и *j*-й фракциями за счет столкновений частиц.

Энтальпия h газовой смеси выражается через удельные энтальпии компонентов h_k, $k = 1, 2, \ldots, K$, зависящие от температуры, следующим образом:

$$h = \sum_{k=1}^{K} Y_k h_k(T)\,,\ h_k(T) = h_k^0 + \int_0^T c_{pk}(T) dT\,,$$

где Y_k – массовая доля; c_{pk} – удельная теплоемкость; h_k^0 – стандартная теплота образования *k*-го компонента смеси.

Уравнение состояния смеси газов:

$$p = \rho R T \sum_{k=1}^{K} \frac{Y_k}{M_k}\,, \qquad (6)$$

где M_k – молярная масса *k*-той компоненты смеси, R – универсальная газовая постоянная.

Для описания турбулентного течения использована хорошо известная SST-модель Ментера [16, 17].

Уравнения сохранения массы компонентов газовой смеси имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho Y_k\right) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i Y_k - \rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right) = \omega_k\,. \qquad (7)$$

где D – коэффициент диффузии; ω_k – массовая скорость образования (расходования) в ходе химической реакции. Диффузионный поток компонентов смеси опи-

сывается законом Фика. Считая, что коэффициент диффузии D одинаков для всех компонентов смеси (бинарная модель), закон Фика имеет вид:

$$\rho_k \eta_{ki} = -\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_i}, \quad (8)$$

где η_{ki} – скорость диффузии k-го компонента смеси в направлении оси координат i.

В камере дожигания протекает химическая реакция сгорания магния в кислороде воздуха ($0.21O_2 + 0.79N_2$):

$$2Mg + O_2 + 3.76 \cdot N_2 \rightarrow 2MgO + 3.76 \cdot N_2. \quad (9)$$

Для моделирования химической реакции (9) в КД использовался подход, основанный на EDM-методе [18]. Допустимость такого подхода объясняется следующими факторами: высокой реакционной способностью магния в реакции с кислородом, высокой температурой процесса горения в КД (от 2 100 К на входе до 3 700 К на выходе), небольшой скоростью потока в КД (< 100 м/с), пренебрежимо малой по сравнению со скоростью горения газообразного магния. При расчете считалось, что порция магния и воздуха (в стехиометрическом отношении) мгновенно превращается в парообразный оксид магния, который в зависимости от параметров газовой смеси в окрестности появляющихся частиц заменялся либо жидкими, либо твердыми частицами.

В [1, 2] в ГП модельного МГД-генератора Памир-0-КТ экспериментально определено распределение массовых долей частиц MgO по размерам, которое имеет одномодальный вид (рис. 2). Масса порции оксида магния, появившаяся в результате реакции (9), делится на добавки к массам фракций так, чтобы их массовые доли были такими же, как и в распределении на рис. 2. Справедливость такого допущения опирается на сотовое расположение подачи газогенераторного газа и воздуха в камеру дожигания, т.е., можно считать, приближенно выполняется правило аддитивности, и проектируемая камера дожигания есть сумма камер дожигания МГД-генератора Памир-0-КТ. Поэтому распределение мольных долей, представленных на рис. 2, задавалось в процессе расчетов.

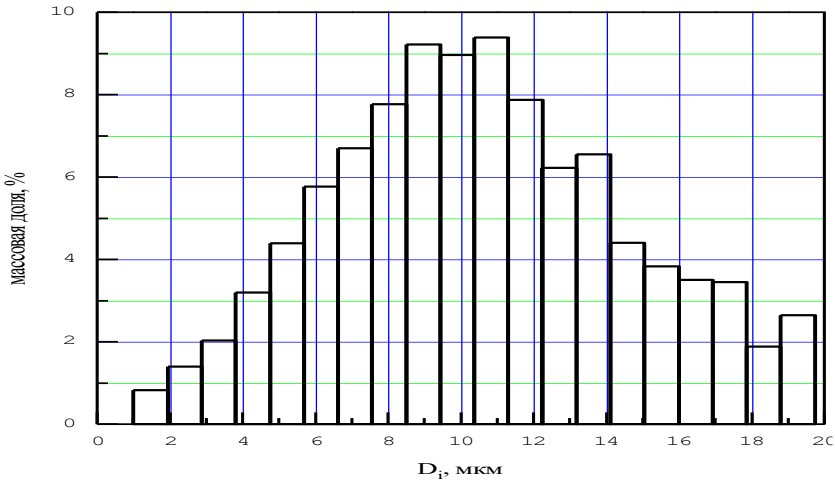

Рис. 2. Распределение массовых долей частиц MgO по диаметру [1, 2]
Fig. 2. Diameter distribution of mass fractions of MgO particles [1, 2]

Для расчета сгорания в КД поступающего из газогенератора газообразного Mg необходимо определить потребное количество воздуха. Согласно таб. 1 в КД на 1 кг газогенераторного газа поступает m_{Mg} = 0.378 кг газообразного Mg. Для его сгорания по реакции (9) требуется 0.126 кг O_2. По определению коэффициент избытка окислителя (воздуха) [19]

$$\alpha = \frac{\dot{m}_f}{\nu_o \dot{m}_o}, \tag{10}$$

где $\dot{m}_f, \dot{m}_o$ – массовые расходы газогенераторного газа и окислителя соответственно. Стехиометрический коэффициент ν_o в нашем случае определяется количеством окислителя, необходимого при стехиометрическом сжигании газообразного Mg в 1 кг газогенераторного газа. Таким образом, для реакции (9) имеем

$$\nu_o = \frac{\mu_{O_2}}{2 \cdot \mu_{Mg}} \cdot \frac{m_{Mg}}{0.21}, \tag{11}$$

где μ_{O_2} и μ_{Mg} – молярные массы кислорода и магния, 0.21 – массовая доля кислорода в воздухе. Общий расход продуктов сгорания комбинированного топлива из ГП $\dot{m} = \dot{m}_f + \dot{m}_o$ определяется для заданной мощности МГД генератора. После задания величины коэффициента избытка окислителя α из (10) и (11) и $\dot{m}$ определяются расходы $\dot{m}_f$ и $\dot{m}_o$, диаметр и длина КД, диаметры сопел для газогенераторного газа и воздуха.

Особенностью течения в КД является смешение поступающих в нее (см. рис. 1) воздуха и газогенераторного газа и протекание реакции (9) с образованием твердых или жидких частиц в зависимости от условий. Твердые частицы MgO, втекающие в КД из ГГ, за счет поступления теплоты от реакции (9) могут расплавляться и покидать КД в жидком состоянии. Для учета всех этих эффектов в расчетах использовалась зависимость теплоемкости частиц от температуры, учитывающая фазовый переход [20].

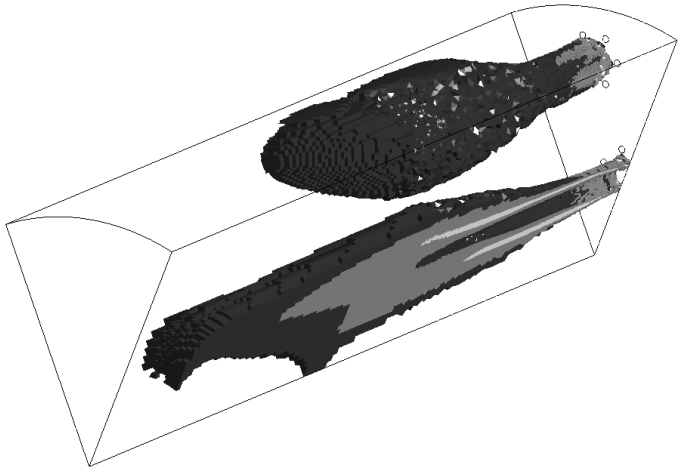

Рис. 3. Области с различной удельной скоростью химической реакции (9)
Fig. 3. Zones with different specific rates of chemical reaction (9)

На рис. 3 показаны области, где происходит реакция (9), и, соответственно, зоны, где появляются частицы MgO. Различным цветом показаны зоны с разной удельной скоростью химической реакции: темным – до 100 кг/м^3/с, серым – до 1000 кг/м^3/с, светлым – до 10000 кг/м^3/с.

Таблица 2

Характеристики МГД-канала с электрической мощностью 17 МВт

M_1	γ	P_0, МПа	T_0, К	μ_{e1}, Тл$^{-1}$	σ_{01}, См/м	K_y	B, Тл	L_k, м	a_1, м	h_1, м	a_2, h_2, м	ν_o	$\dot{m}$, кг/с	$\dot{m}_o$, кг/с	$\dot{m}_f$, кг/с
2.7	1.064	7.0	3 700	0.17	67.74	0.75	2.1	2.28	0.166	0.21	0.263	1.07	27.58	13.3	14.28

В табл. 2 представлены характеристики МГД-канала с электрической мощностью 17 МВт на продуктах сгорания КТ, построенного по методике [3]. Здесь γ – показатель адиабаты, P_0, T_0 – давление и температура на выходе КД, μ_{e1}, σ_{01} – подвижность электронов и электропроводность продуктов сгорания на входе в МГД-канал, K_y – коэффициент нагрузки МГД-канала, B – магнитная индукция, L_k – длина МГД-канала, a_1, h_1 – расстояние между плоскими изоляторными и электродными стенками на входе МГД-канала; a_2, h_2 – то же на выходе МГД-канала. В табл. 2 приведены значения $\dot{m}$, $\dot{m}_f$ и $\dot{m}_o$, рассчитанные по формулам (10) и (11) для α = 1.

Результаты расчетов

Результаты расчетов процессов в камере дожигания показаны на рис. 4–8. Область течения визуализируется в сегменте 1/12 объема камеры.

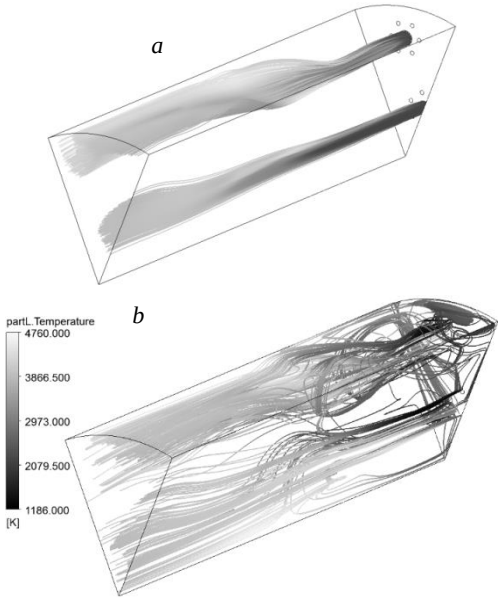

Рис. 4. Траектории движения частиц и их температура: (*a*) – частицы диаметром ≥ 10 мкм, поступающие из ГГ, (*b*) –частицы диаметром < 10 мкм, появляющиеся в КД

Fig. 4. Trajectories and temperature: (*a*) particles with a diameter ≥ 10 μm leaving the gas generator, (*b*) particles with a diameter < 10 μm occurring in the afterburner

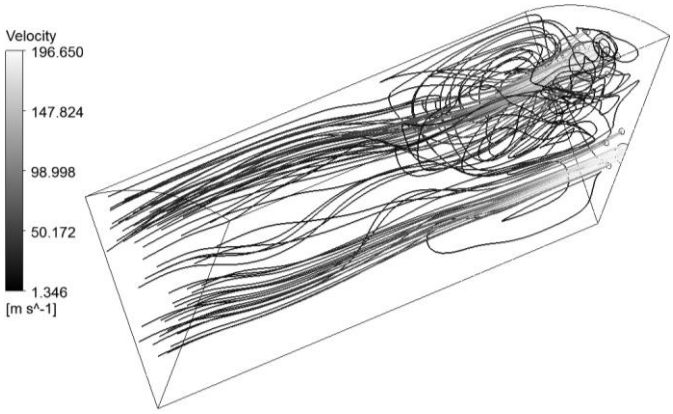

Рис. 5. Линии тока газа и его скорость
Fig. 5. Streamlines and velocity of the gas

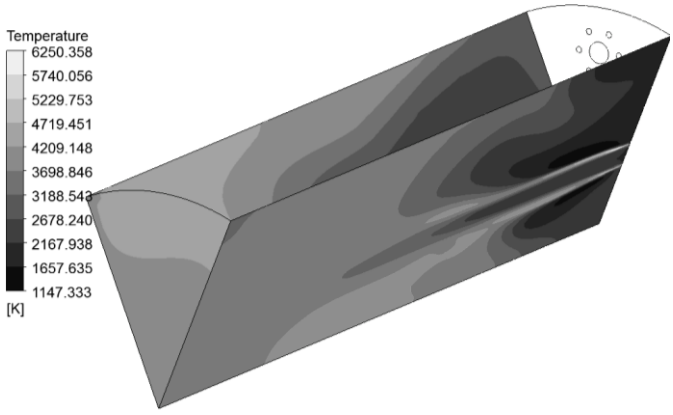

Рис. 6. Распределение температуры газа в плоскостях симметрии КД
Fig. 6. Gas temperature distribution along the afterburner symmetry planes

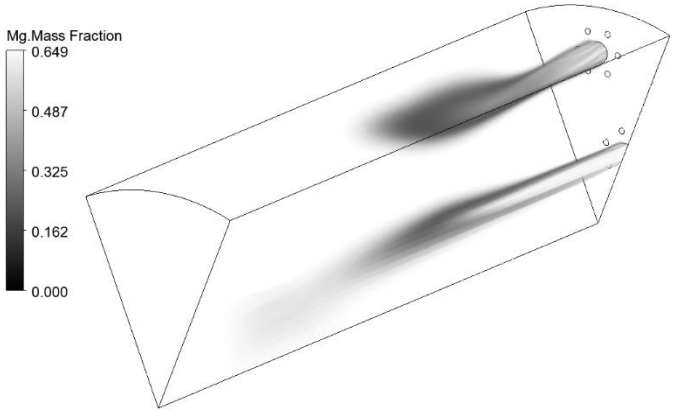

Рис. 7. Массовая доля газообразного Mg в КД
Fig. 7. Mass fraction of gaseous Mg in the afterburner

Рис. 8. Область присутствия газообразного Mg
Fig. 8. Area with gaseous Mg

На рис. 8 темным цветом показана область, где массовая доля газообразного Mg меньше 0.1%, что говорит о законченности реакции (9) в КД заданной длины.

Выводы

Построена физико-математическая модель процессов в двухкамерном генераторе плазмы импульсного МГД-генератора, работающего на продуктах сгорания комбинированного топлива на основе Mg и окислителя KNO_3 с дожиганием свободного магния в кислороде воздуха. В камере дожигания для описания течения газовой смеси с частицами выбран дискретно-траекторный подход Эйлера–Лагранжа, в котором для частиц используется подход Лагранжа, а для газовой фазы – подход Эйлера. Анализ процессов в камере дожигания проводится на основе законов сохранения массы, импульса, энергии и числа атомов. Для описания турбулентного течения используется известная SST-модель Ментера.

На основе построенной физико-математической модели разработана методика расчета габаритных и режимных параметров двухкамерного генератора плазмы, работающего на продуктах сгорания комбинированного топлива. Реализованная физико-математической модель позволяет проводить:

– комплексные расчеты течения двухфазной многокомпонентной смеси с учетом пространственного турбулентного характера протекания равновесных химических реакций между компонентами газовой смеси и реакции сгорания газообразного Mg в кислороде воздуха;

– расчеты процесса перехода частиц MgO из твердого в жидкое состояние и тепловых процессов в камере дожигания.

Параметрические расчеты генератора плазмы импульсного МГД-генератора с электрической мощностью 17 МВт проводились с использованием конечно-объемной модели в программном комплексе ANSYS CFX и с использованием экспериментальных данных, полученных при испытаниях МГД-генератора Памир-0-КТ.

Список источников

1. *Дегтев Ю.Г., Догадаев Р.В., Клычков В.И. и др.* Исследование свойств плазмы продуктов сгорания пиротехнических (металлических) горючих в воздухе // Доклады РАН. 1995. Т. 340, № 6. С. 768–771.
2. *Дегтев Ю.Г., Догадаев Р.В., Иваненко А.А. и др.* Экспериментальные и численные исследования плазмы продуктов сгорания пиротехнического горючего в воздухе // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 4. С. 494–502. doi: 10.1007/s10740-006-0061-8

3. *Афонин А.Г., Бутов В.Г., Панченко В.П. и др*. Импульсный магнитогидродинамический генератор большой мощности на твердом (пороховом) топливе нового поколения // Прикладная механика и техническая физика. 2018. № 6. С. 75–87. doi: 10.15372/PMTF20180608
4. *Велихов Е.П., Афонин А.Г., Бутов В.Г. и др*. Импульсный МГД-генератор нового поколения // Доклады РАН. 2019. Т. 486, № 2. С. 178–183. doi: 10.31857/S0869-56524862178-183
5. *Чернов Ю.Г., Сахаров Б.Б., Веретенов В.Ю.* Пакет прикладных программ «Плазма» : препринт № 3522. М. : ИАЭ, 1981.
6. *Трусов Б.Г.* Программная система «Терра» для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических процессах // Труды III международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново, 2002. С. 217–220.
7. *Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г.* Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М. : Металлургия, 1994. 352 с.
8. *Gordon S., McBride B.J.* Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications. I. Analysis. NASA Reference Publication 1311. 1994.
9. *Gordon S., McBride B.J.* Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications. II. Users manual and program description. NASA Reference Publication 1311. 1996.
10. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М. : Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
11. Турбулентные течения реагирующих газов : пер. с англ. / под ред. П. Либби, Ф. Вильямса. М. : Мир, 1983. 328 с.
12. *Стернин Л.Е.* Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М. : Машиностроение, 1974. 212 с.
13. *Стернин Л.Е., Маслов Б.Н., Шрайбер А.А., Подвысоцкий А.М.* Двухфазные моно и полидисперсные течения газа с частицами. М. : Машиностроение, 1980. 172 с.
14. *Стернин Л.Е., Шрайбер А.А.* Многофазные течения газа с частицами. М. : Машиностроение, 1994. 320 с.
15. *Волков К.Н., Емельянов В.Н.* Течения газа с частицами. М. : Физматлит, 2008. 600 с.
16. *Menter F.R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA-Journal. 1994. V. 32, No. 8. P. 1598–1605. doI: 10.2514/3.12149
17. *Vieser W., Esch T., Menter F.* Heat transfer predictions using advanced two-equation turbulence models // CFX Validation Report 10/0602. AEA Technology, 2002. P. 1–69.
18. *Vasquez E.R., Eldredge T.* Process modeling for hydrocarbon fuel conversion // Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing Science and Technology. 2011. P. 509–545. (Woodhead Publishing Series in Energy). doi: 10.1533/9780857093783.5.509
19. *Щетинков Е.С.* Физика горения газов. М. : Наука, 1965. 740 с.
20. *Burcat A., Ruscic B.* Third millennium ideal gas and condensed phase thermochemical database for combustion (with update from active thermochemical tables). Technical Report ANL-05/20. Argonne : Argonne National Lab, 2005. doi: 10.2172/925269

References

1. Degtev Yu.G., Dogadaev R.V., Klychkov V.I., Panchenko V.P., Yakushev A.A. (1995) Issledovanie svoystv plazmy produktov sgoraniya pirotekhnicheskikh (metallicheskikh) goryuchikh v vozdukhe [Investigation of plasma properties in combustion products of pyrotechnic (metal) fuels in the air]. *Doklady RAN*. 340(6). pp. 768–771.
2. Degtev Yu.G., Dogadaev R.V., Ivanenko A.A., Panchenko V.P., Yakushev A.A. (2006) Experimental and numerical investigations of plasma of products of combustion of pyrotechnic fuel in air. *High Temperature*. 44(4). pp. 487–496. doi: 10.1007/s10740-006-0061-8.
3. Afonin A.G., Butov V.G., Panchenko V.P., Sinyaev S.V., Solonenko V., Shvetsov G.A., Yakushev A.A. (2018) Powerful pulsed magnetohydrodynamic generator fueled by a solid

(powder) propellant of a new generation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 59(6). pp. 1024–1035. doi: 10.1134/S0021894418060081.
4. Velikhov E.P., Afonin A.G., Butov V.G., Sinyaev S.V., Solonenko V.A., Panchenko V.P., Yakushev A.A., Shvetsov G.A. (2019) A new generation pulsed MHD generator. *Doklady Physics*. 64(5). pp. 238–243. doi: 10.1134/S1028335819050082.
5. Chernov Yu.G., Sakharov B.B., Veretenov V.Yu. (1981) *Paket prikladnykh programm «Plazma»* ["Plasma" application package]. Preprint № 3522. Moscow: IAE.
6. Trusov B.G. (2002) Programmnaya sistema «Terra» dlya modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnovesiy v plazmokhimicheskikh protsessakh ["Terra" software system for modeling phase and chemical equilibria in plasma-chemical processes]. *Proceedings of the 3d International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry. Ivanovo.* pp. 217–220.
7. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. (1994) *Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems]. Moscow: Metallurgiya.
8. Gordon S., McBride B.J. (1994) *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. I. Analysis*. NASA Reference Publication 1311.
9. Gordon S., McBride B.J. (1996) *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. II. Users Manual and Program Description*. NASA Reference Publication 1311.
10. Nigmatulin R.I. (1987) *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka.
11. Libby P.A., Williams F.A. (1980) *Turbulent Reacting Flows*. New York: Topics in Applied Physics.
12. Sternin L. E. (1974) *Osnovy gazodinamiki dvukhfaznykh techeniy v soplakh* [Fundamentals of gas dynamics in two-phase nozzle flows]. Moscow: Mashinostroenie.
13. Sternin L.E., Maslov B.P., Shrayber A.A., Podvysotskiy A.M. (1980) *Dvukhfaznye mono i polidispersnye techeniya gaza s chastitsami* [Two-phase mono- and polydispersed flows of gas with particles]. Moscow: Mashinostroenie.
14. Sternin L.E., Shrayber A.A. (1994) *Mnogofaznye techeniya gaza s chastitsami* [Multiphase flows of gas with particles]. Moscow: Mashinostroenie.
15. Volkov K.N., Emel'yanov V.N. (2008) *Techeniya gaza s chastitsami* [Flows of gas with particles]. Moscow: Fizmatlit.
16. Menter F.R. (1994) Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA-Journal*. 32(8). pp. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149.
17. Vieser W., Esch T., Menter F. (2002) *Heat Transfer Predictions Using Advanced Two-Equation Turbulence Models.* CFX Validation Report 10/0602. AEA Technology. pp. 1–69.
18. Vasquez E.R., Eldredge T. (2011). Process modeling for hydrocarbon fuel conversion. *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing Science and Technology*. pp. 509–545. doi: 10.1533/9780857093783.5.509.
19. Shchetinkov E.S. (1965) *Fizika goreniya gazov* [Gas combustion physics]. Moscow: Nauka.
20. Burcat A., Ruscic B. (2005) *Third Millennium Ideal Gas and Condensed Phase Thermochemical Database for Combustion (with Update from Active Thermochemical Tables)*. Technical Report ANL-05/20. Argonne: Argonne National Lab. doi: 10.2172/925269.

***Сведения об авторах*:**

Афонин Антон Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптимизации Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: aag@niipmm.tsu.ru

Бутов Владимир Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математической физики Научно-исследовательского института при-

кладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: bvg@niipmm.tsu.ru

Солоненко Виктор Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией оптимизации Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск, Россия. E-mail: vik@niipmm.tsu.ru

Ящук Алексей Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптимизации Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: rainbow@niipmm.tsu.ru

Якушев Андрей Андреевич – старший научный сотрудник АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Московская область, Россия.

***Information about the authors*:**

Afonin Anton G. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: aag@niipmm.tsu.ru

Butov Vladimir G. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: bvg@niipmm.tsu.ru

Solonenko Victor A. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: vik@niipmm.tsu.ru

Yashchuk Aleksey A. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: rainbow@niipmm.tsu.ru

Yakushev Andrey A. (Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию 14.03.2022; принята к публикации 12.07.2022

The article was submitted 14.03.2022; accepted for publication 12.07.2022