

Научная статья

УДК 537.85

doi: 10.17223/19988621/87/7

Исследование характеристик импульсного МГД-генератора на комбинированном пиротехническом топливе

Владимир Григорьевич Бутов¹, Антон Геннадьевич Афонин²,
Виктор Александрович Солоненко³, Артем Александрович Кулешов⁴,
Алексей Александрович Ящук⁵

1, 2, 3, 4, 5 Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ bvg@niipmm.tsu.ru

² aag@niipmm.tsu.ru

³ vik@niipmm.tsu.ru

⁴ artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

⁵ rainbow@niipmm.tsu.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки и применения физико-математической модели высокого уровня в приближении Эйлера–Лагранжа для расчета многофазного многокомпонентного вязкого течения продуктов сгорания пиротехнического топлива в газодинамическом тракте импульсного МГД-генератора.

Приведены результаты численного исследования течения в газодинамическом тракте и характеристик импульсного МГД-генератора на продуктах сгорания пиротехнического топлива электрической мощностью до 20 МВт.

Установлены пространственная структура, свойства и особенности многофазного многокомпонентного течения. Впервые обнаружено возникновение вторичного течения в канале импульсного МГД-генератора и учтены фазовые превращения полидисперсных конденсированных частиц в газодинамическом тракте.

Ключевые слова: МГД-генератор, пиротехническое топливо, моделирование, приближение Эйлера-Лагранжа, многофазное многокомпонентное течение, конденсированные частицы

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Бутов В.Г., Афонин А.Г., Солоненко В.А., Кулешов А.А., Ящук А.А. Исследование характеристик импульсного МГД-генератора на комбинированном пиротехническом топливе // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 87. С. 73–87. doi: 10.17223/19988621/87/7

A study of characteristics of a pulsed MHD generator running on a combined pyrotechnic fuel

Vladimir G. Butov¹, Anton G. Afonin², Viktor A. Solonenko³,
Artyom A. Kuleshov⁴, Aleksey A. Yashchuk⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ bvg@niipmm.tsu.ru

² aag@niipmm.tsu.ru

³ vik@niipmm.tsu.ru

⁴ artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

⁵ rainbow@niipmm.tsu.ru

Abstract. In this paper, the design of a magnetohydrodynamic (MHD) generator is numerically simulated and analyzed. The regime and overall parameters of the accelerating nozzle and MHD channel of the pulsed MHD generator with a two-chamber plasma generator, operating on pyrotechnic fuel combustion products with afterburning in atmospheric oxygen, are numerically calculated. A mixture of Mg powders (fuel) and KNO₃ saltpeter is chosen as the pyrotechnic fuel. This mixture serves as both an oxidizing agent and a source of an easily ionizing additive. The condensed fraction includes MgO particles that can be solid or liquid depending on the ambient conditions. Relying on the previously calculated parameters of the constructed plasma generator, the developed mathematical model allows the numerical investigation of all the processes occurring in the gas-dynamic duct of the MHD generator. The parameters of a two-phase flow in the MHD channel and its general characteristics can be determined for the given characteristics of the nozzle.

Keywords: MHD generator, pyrotechnic fuel, modeling, Euler–Lagrange model, multi-phase multicomponent flow, condensed particles

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority 2030).

For citation: Butov V.G., Afonin A.G., Solonenko V.A., Kuleshov A.A., Yashchuk A.A. (2024) A study of characteristics of a pulsed MHD generator running on a combined pyrotechnic fuel. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 87. pp. 73–87. doi: 10.17223/19988621/87/7

Введение

В работе [1] определен облик и рассчитаны режимно-габаритные параметры двухкамерного генератора плазмы, состоящего из газогенератора и камеры дожигания для импульсного МГД-генератора (МГДГ), работающего на плазме продуктов сгорания пиротехнического топлива (ПТ) рецептуры $0.64 \cdot \text{Mg} + 0.35 \cdot \text{KNO}_3 + 0.01 \cdot \text{добавки}$ [2, 3]. В настоящей работе значения температуры, давления, концентрации газовых компонент из [1] использованы как начальные условия на входе для моделирования течения уже непосредственно в тракте импульсного МГДГ.

Цель данной работы – разработка физико-математической модели высокого (3D) уровня для расчета многофазного многокомпонентного течения продуктов сгорания комбинированного топлива, определение с ее помощью путем численного исследования структуры и особенностей течения в газодинамическом тракте и уточнение характеристик импульсного МГД-генератора. Конденсированная фаза представлена частицами MgO, которые на входе являются жидкими, но при движении по тракту могут кристаллизоваться, а при возможности и снова расплавляться в зависимости от значения окружающей температуры.

Термодинамические расчеты показали, что в газодинамическом тракте МГДГ можно считать постоянным компонентный состав газовой смеси (представлен в таблице). Массовая доля частиц MgO в общем расходе равна 0.46.

Состав газовой смеси

Компоненты газовой смеси	Массовая доля
K	0.089
KCN	0.013
O ₂	0.015
N ₂	0.883

В данной статье разработанная методика расчета характеристик генератора плазмы [1] дополняется моделями и алгоритмами расчета двухфазного течения в газодинамическом тракте импульсного МГДГ, работающего на продуктах сгорания, комбинированного ПТ.

Газодинамический тракт МГДГ состоит из разгонного сопла и МГД-канала. Разгонное сопло начинается сразу после цилиндрической камеры дожигания и в конечном итоге переходит в прямоугольный линейный канал МГДГ. Общий вид расчетной области показан на рис. 1.

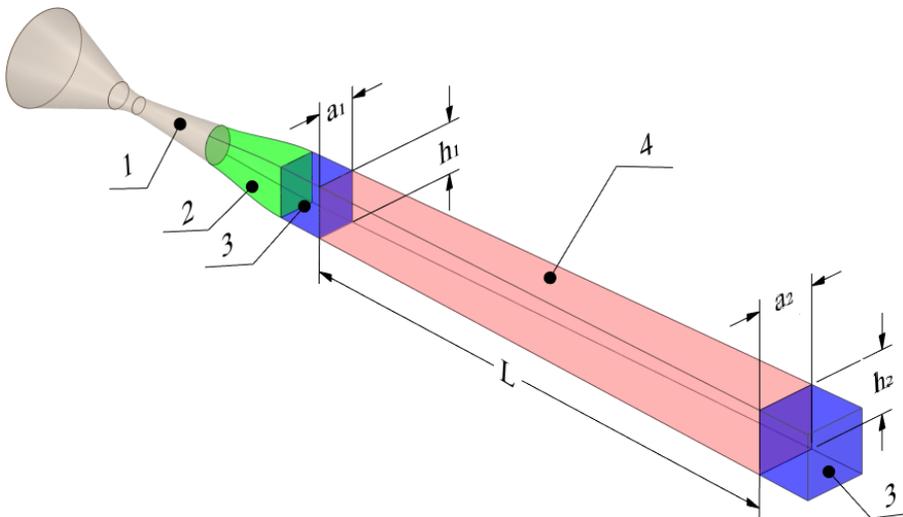


Рис. 1. Газодинамический тракт МГДГ

Fig. 1. Gas-dynamic duct of a magnetohydrodynamic generator (MHDG)

На рис. 1 указаны: участок 1 – сужающаяся (дозвуковая) часть сопла, которая начинается с сечения выхода из цилиндрической камеры дожигания, переходящая в область горловины с минимальным сечением и далее расширяющаяся в сверхзвуковую часть сопла до заданного кругового сечения; участок 2 – переходная область, начинающаяся с выбранного кругового сечения, с которым гладко сопрягается и простирается до входа в линейный МГД-канал прямоугольного сечения, где гладко сопрягается с участком прямоугольного сечения 3. Участок 4 – МГД-канал. Геометрические параметры МГД-канала: $h_1 = 0.22$ м, $h_2 = 0.2805$ м, $a_1 = 0.1681$ м, $a_2 = 0.2805$ м, $L = 2.28$ м. Максимальное значение индукции B_z магнитного поля составляет 2.2 Тл. Число Маха на входе в МГД-канал, полученное на основе одномерной теории в приближении модели «псевдогаза», оценивается в величину, равную 2.6.

Постановка задачи движения многофазной смеси с учетом взаимодействия с внешним электромагнитным полем

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

В модели для совместного описания течения газовой смеси с частицами выбран дискретно-траекторный подход Эйлера–Лагранжа [4–9], в котором для частиц дисперсной фазы используется подход Лагранжа, а для газовой фазы – подход Эйлера.

Полидисперсный ансамбль твердых или жидких частиц конденсированной 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, $j = 1, \dots, N$.

Двухфазное течение газа с частицами в газодинамическом тракте МГДГ 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):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0. \quad (1)$$

Уравнения сохранения импульса:

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

где C_{Rj} – коэффициент силового взаимодействия между газовой фазой и частицами. Последнее слагаемое в (2) – компоненты вектора электромагнитной силы $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$, приложенной к единице объема; \mathbf{j} , \mathbf{B} – векторы плотности тока и магнитной индукции, e_{ijk} – символ Леви–Чивиты. В расчетах МГДГ считалось, что $B_1 = B_2 = 0$, $B_3 = B_z$, где B_z – компонента индукции магнитного поля по направлению к изоляционным стенкам; тогда ненулевыми будут только компоненты с символами Леви–Чивиты $e_{123} = 1$ и $e_{213} = -1$.

Тензор вязких напряжений без учета 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_i – символ Кронекера.

Уравнение сохранения энергии:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho h_0 - p)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k h_0) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_k} (u_i \tau_{ik}) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\lambda_g \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) + \sum_{j=1}^N C_{Lj} \rho_j (T_j - T) + j_i E_i \end{aligned} \quad (3)$$

где $h_0 = h + 0.5 U^2$ – полная энтальпия смеси, λ_g – коэффициент теплопроводности газовой смеси, C_{Lj} – коэффициент теплового взаимодействия между газовой фазой и частицами. Последнее слагаемое в (3) – плотность электрической мощности $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E} = j_i E_i$, где $\mathbf{E} = (E_1, E_2, E_3)$ – вектор напряженности электрического поля.

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

$$\begin{aligned} m_j \frac{dv_{ij}}{dt} &= C_{Rj} \rho_{sj} (v_{ij} - u_i), \\ m_j c_s \frac{dT_j}{dt} &= C_{Lj} (T_j - T) + l_m \frac{dm_j}{dt} + \varepsilon \pi d_j^2 (\pi I - \sigma_B n^2 T_j^4), \end{aligned} \quad (4)$$

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 $C_{Lj} = \pi d_j \lambda \text{Nu}$, 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_B – постоянная Стефана–Больцмана, n – показатель преломления среды (в расчетах брался равным 1).

Уравнение неразрывности для частиц j -й фракции имеет вид [6–9]:

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

где J_{lj} – интенсивность обмена массой между l -й и j -й фракциями за счет столкновений частиц. В расчетах считалось, что правая часть в (5) равна 0. Энтальпия h газовой смеси выражается через удельные энтальпии компонентов h_k , $k = 1, 2, \dots, K$, зависящие от температуры, следующим образом:

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

где Y_k – массовая доля; c_{pk} – удельная теплоёмкость; h_k^0 – стандартная теплота образования k -й компоненты смеси. Уравнение состояния смеси газов:

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

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

Для описания турбулентных характеристик течения использована хорошо известная SST-модель Ментера [10, 11].

Граничные условия для газодинамических параметров задаются следующим образом. На входе в сужающуюся часть сопла заданы значения температуры $T = 3\ 600$ К и полного давления $P = 70$ атм. Минимальное сечение сопла и другие геометрические характеристики разгонного сопла определяют расход газовой смеси и частиц как величину $Q_m = 27.85$ кг/с, при этом фиксированная массовая доля частиц имеет значение 0.46.

На всех твердых поверхностях принимается $\mathbf{U} = 0$ м/с. Для температуры T газовой фазы считается, что стенки сопла, переходной области и МГД-канала облицованы керамикой на основе MgO. Данная керамика имеет довольно низкую теплопроводность около 10 Вт/мК, а ее температура плавления составляет 3 105 К, поэтому граничное условие для T назначалось исходя из значения температуры газа в окрестности твердой стенки: если температура газа выше температуры плавления 3 105 К, то на стенке реализуется условие первого рода для температуры $T_w = 3\ 105$ К, если же температура газа ниже температуры плавления, то на стенке ставится условие теплоизоляции. По факту расчетов получилось, что на всех твердых поверхностях реализуется температура 3 105 К, так как за счет условия прилипания температура восстанавливается до температур, превышающих температуру плавления.

На выходе из канала считается, что поток сверхзвуковой и реализуются т.н. мягкие граничные условия.

Электромагнитные величины вектора плотности тока, напряженности электрического поля, магнитной индукции \mathbf{j} , \mathbf{E} , \mathbf{B} , входящие в уравнения (2) и (3), определяются из уравнений Максвелла и обобщенного закона Ома для изотропно проводящей среды. Далее используются стандартные обозначения: для координат $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$ и компонент скорости $u = u_1$, $v = u_2$, $w = u_3$. Ось x направлена вдоль канала, y – вертикально вверх от катода к аноду, ось z дополняет систему координат до правой. С учетом ряда обстоятельств в рассматриваемом МГДГ возможно упрощение полной системы уравнений Максвелла [12, 13], приводящее к следующей системе:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \mathbf{j} + \frac{\beta}{|\mathbf{B}|} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}), \quad (6)$$

где σ – удельная электропроводность среды, β – параметр Холла.

Характерное время установления электродинамических величин на несколько порядков меньше времени установления газодинамических параметров, поэтому задачи определения электрических полей и токов и газодинамических параметров можно решать попеременно до их согласования. Определение электрических полей и токов на основе уравнений (6) осуществлялось следующим образом. Кроме описанных допущений в (2) для компонент индукции магнитного поля, для напряженности электрического поля считается, что $E_z = 0$. Тогда из уравнения $\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0$ следует, что

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

Отсюда, вводя электрический потенциал φ такой, что $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$, из уравнения неразрывности электрического тока и обобщенного закона Ома (первое и третье уравнения в (6)) получим уравнение для потенциала φ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial (\lambda \beta)}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial (\lambda \beta)}{\partial x} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} [\lambda B_z (v + \beta u)] + \frac{\partial}{\partial y} [\lambda B_z (\beta v - u)], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\lambda = \sigma / (1 + \beta^2)$. Для параметра Холла β , удельной электропроводности σ и подвижности электронов μ_e используются зависимости Саха [13, 14]:

$$\beta = \mu_e |\mathbf{B}|, \quad \mu_e = \mu_e \frac{p_*}{p} \sqrt{\frac{T}{T_*}}, \quad \sigma = \sigma_* \sqrt{\frac{p_*}{p}} \left(\frac{T}{T_*} \right)^{\frac{3}{4}} \exp \left[\frac{I_e}{2} \left(\frac{1}{T_*} - \frac{1}{T} \right) \right]. \quad (9)$$

Здесь I_e – потенциал ионизации, соответствующий калийной присадке. Значок «*» в (9) приписан опорным значениям электропроводности σ , подвижности электронов μ_e для соответствующих им давлению p_* и температуре T_* . Опорные значения в данной работе были взяты из термодинамических расчетов по программе «Плазма» [15].

В уравнении для потенциала (8) из-за возможности допущения, что $B_1 = B_2 = 0$, $E_z = 0$, нет частных производных по координате z , но все входящие в это уравнение функции зависят от x , y и z . Расчет электродинамических параметров проводился в области, отмеченной серым цветом на рис. 2, что соответствует участкам 3 и 4 на рис. 1.

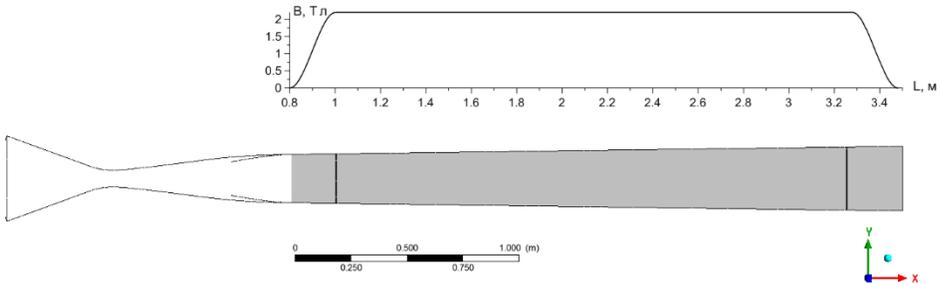


Рис. 2. Газодинамический тракт МГДГ и канал МГДГ (выделен серым цветом) с распределением напряженности магнитного поля B_z

Fig. 2. A gas-dynamic duct and a channel (shaded gray) of the MHDG with the distribution of magnetic field strength B_z

Модель электродинамики использовалась в квазитрехмерной постановке, что, в отличие от предыдущих работ, основанных на двумерной модели течения газа и электродинамики, позволило учесть неоднородность потока в направлении оси z , связанную с формированием пограничных слоев на изоляторных стенках, неоднородность распределения частиц в расчетной области и др. Для этого при решении уравнения потенциала (8) после разбиения оси z проводились верти-

кальные сечения со сгущением к изоляционным стенкам. Также на рис. 2 представлено распределение напряженности магнитного поля B_z по длине канала. Вертикальными линиями отмечены начало (расстояние 1 м от минимального сечения) и конец (3.28 м) электродной зоны МГДГ.

В качестве граничных условий на электродной части твердых стенок ставится распределение потенциала вида:

$$\varphi_a = \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad \varphi_c = -\frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (10)$$

где $\Delta\varphi$ – заданная разность потенциалов на электродах, индексы a и c соответствуют аноду и катоду.

На непроводящих участках стенок ставилось условие непротекания для нормальной компоненты электрического тока $j_n = 0$.

Из уравнения (8) с учетом граничных условий определяется распределение потенциала φ . Затем по (6) вычисляются значения $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ и плотности электрической мощности $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$, т.е. определяются правые части уравнений (2) и (3). Далее проводится расчет уравнений газовой динамики на некотором количестве временных шагов, а затем по измененному полю газодинамических параметров опять пересчитываются электромагнитные параметры и, соответственно, правые части уравнений (2) и (3), и так далее до достижения сходимости полей газодинамических и электромагнитных параметров.

Результаты моделирования

В качестве результатов расчетов демонстрируются распределение газодинамических параметров по газодинамическому тракту МГДГ и общие графики мощности и нагрузочной характеристики в зависимости от разности потенциалов на электродных стенках.

На рис. 3 представлены нагрузочная (черным цветом, шкала слева) и вольт-амперная (синим цветом, шкала справа) характеристики в зависимости от разности потенциалов $\Delta\varphi$ на аноде и катоде. Полученная максимальная мощность 17.4 МВт с током 34.8 кА соответствует разности потенциалов $\Delta\varphi = 500$ В.

На рис. 4, 5 представлены распределения газодинамических параметров для случая получения максимальной мощности $\Delta\varphi = 500$ В. На этих рисунках в вертикальной плоскости симметрии показаны распределения давления и числа Маха соответственно. Хорошо заметен так называемый перекосяк давления [13] по длине канала, явно проявляющийся внутри электродной зоны (между вертикальными черными линиями на рис. 4, 5).

На рис. 6, 7 показаны траектории частиц с указанием доли жидкой фазы. Видно, что на входе частицы полностью жидкие, а по мере движения по газодинамическому тракту они, попадая в область более низких температур, частично кристаллизуются. Особенно это заметно в областях вблизи твердых стенок. Из этого же рисунка можно сделать вывод, что в пограничном слое в непосредственной близости от твердых поверхностей траектории движения частиц исключают их выпадение на стенку даже в области тракта непосредственно за переходной областью (2 на рис. 1).

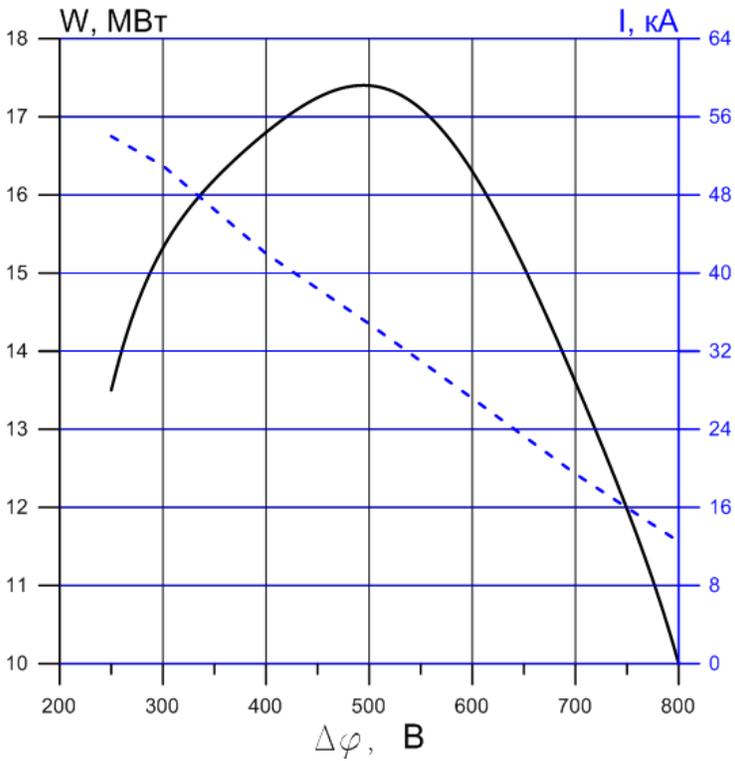


Рис. 3. Вольтамперная и нагрузочная характеристики МГДГ
Fig. 3. Current-voltage and load characteristics of the MHDG

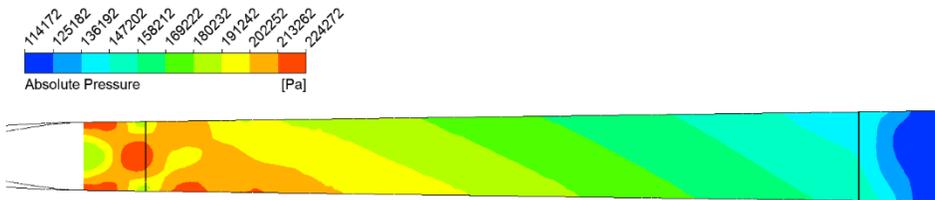


Рис. 4. Распределение давления в плоскости xy
Fig. 4. Pressure distribution on xy -plane

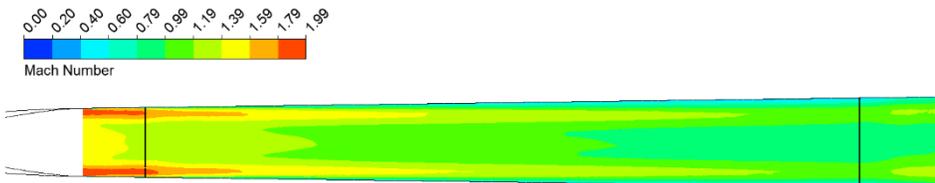


Рис. 5. Распределение числа Маха в плоскости xy
Fig. 5. Mach number distribution on xy -plane

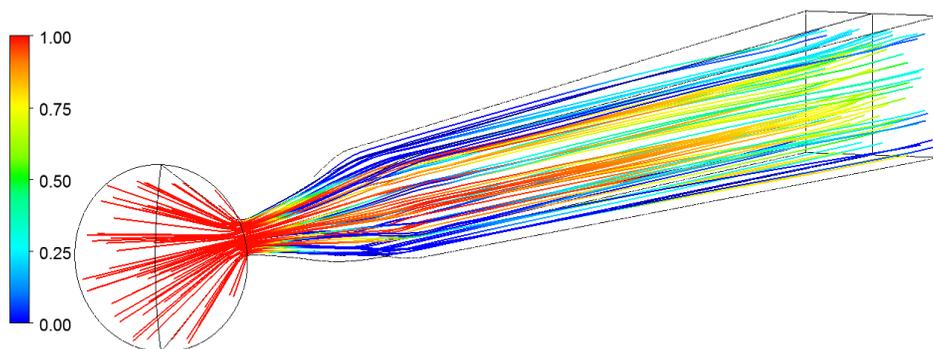


Рис. 6. Траектории конденсированных частиц диаметром не более 5 мкм с указанием доли жидкой фазы

Fig. 6. Trajectories of condensed particles (the diameter is less than or equal to 5 μm) with indicated liquid phase fractions

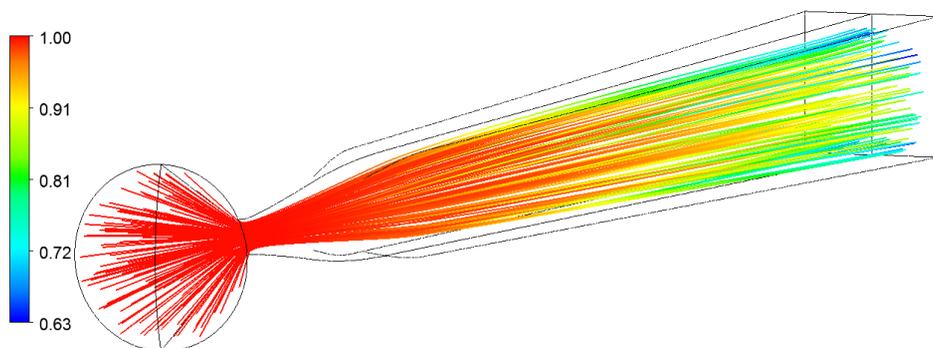


Рис. 7. Траектории конденсированных частиц диаметром 15 мкм и более с указанием доли жидкой фазы

Fig. 7. Trajectories of condensed particles (the diameter is greater than or equal to 15 μm) with indicated liquid phase fractions

Для оценки достоверности получаемых результатов проведено исследование, включающее в себя сравнение с результатами одномерного расчета, основанного на приближении модели псевдогаза. Также проводилось сравнение полученных результатов с результатами ранее проведенных расчетов в двумерных и трехмерных постановках [16, 17]. Например, одномерная модель, основанная на приближении псевдогаза [6, 7], при таком же расходе ($Q_m = 27.85 \text{ kg/s}$) дает значение мощности 18.5 МВт при разности потенциалов на электродах $\Delta\varphi = 620 \text{ В}$. Качественное согласование можно считать удовлетворительным, а количественную разницу значений можно объяснить значительными различиями в математической постановке.

При анализе результатов был обнаружен эффект развития вторичного течения в канале МГДГ. На рис. 8, 9 показаны его схемы в виде характерных значений относительных скоростей v/u и w/u соответственно в плоскости $y-z$, перпендикулярной оси канала МГДГ.

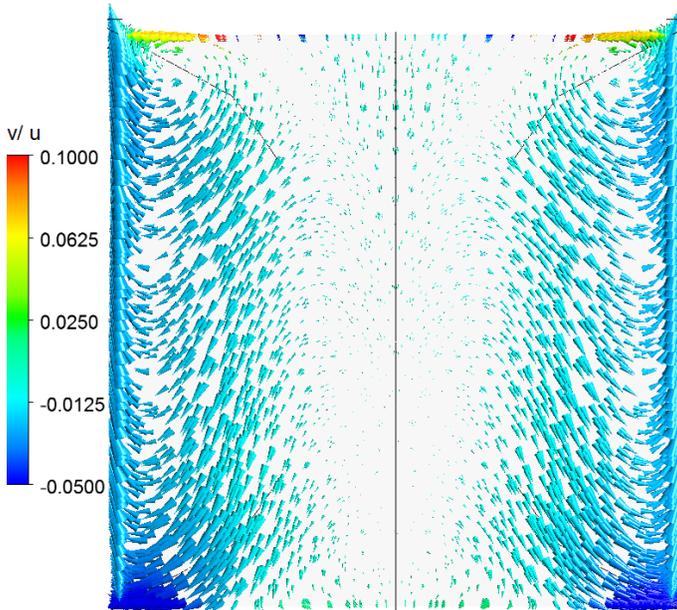


Рис. 8. Схема развития вторичного течения в канале МГДГ с указанием относительных значений скоростей v/u
Fig. 8. Pattern of the secondary flow development in the MHDG channel with indicated relative velocities v/u

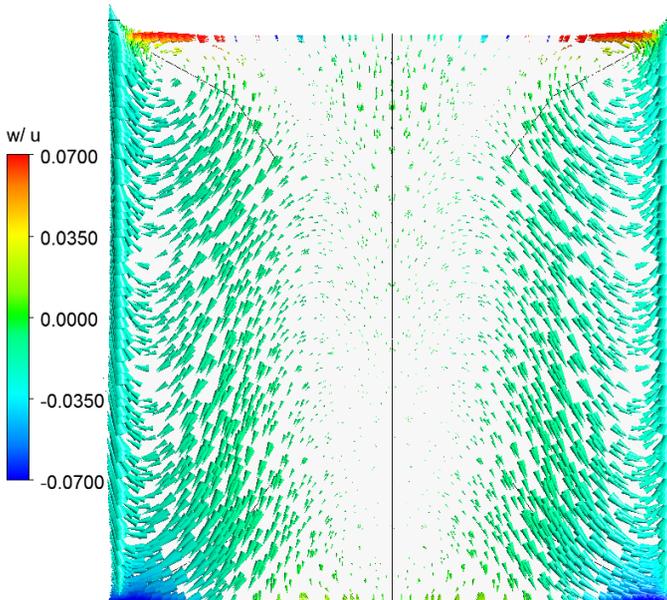


Рис. 9. Схема развития вторичного течения в канале МГДГ с указанием относительных значений скоростей w/u
Fig. 9. Pattern of the secondary flow development in the MHDG channel with indicated relative velocities w/u

Ранее появление вторичного течения было численно обнаружено в «длинных» каналах энергетических стационарных МГД-генераторов [16]. Возможным объяснением подобного явления в характере течения могут быть эффекты, связанные с неоднородностью электрического поля и газодинамических параметров потока по сечению канала и, в частности, с большим давлением на нижней электродной стенке (катоде) из-за перекоса давления.

Выводы

Основные научные результаты проведенного исследования заключаются в следующем.

Разработаны и апробированы физико-математическая модель высокого (3D) уровня в приближении Эйлера–Лагранжа и алгоритм расчета многофазного многокомпонентного вязкого течения продуктов сгорания комбинированного пиротехнического топлива в газодинамическом тракте импульсного МГД-генератора. Полученные результаты в целом совпадают с результатами, полученными ранее и описывающими течение однородной среды в канале МГДГ при помощи модели псевдогаза с постоянными R и γ и изотермическими граничными условиями на твердых стенках. В модели корректно учитываются многофазность рабочего тела, зависимость теплофизических свойств каждого компонента смеси от температуры, плавление и кристаллизация частиц, ограничения температуры на твердых поверхностях газодинамического тракта.

Впервые количественно установлены следующие особенности течения в импульсных МГД-генераторах:

- возможность изменения фазового состояния полидисперсных частиц из жидкого в твердое и обратно в зависимости от температурных условий течения;
- траектории и доли частиц твердой и жидкой фаз в газодинамическом тракте;
- возникновение и развитие вторичного течения в МГД-канале.

Численно показано, что корректный учет процессов в импульсном МГД-генераторе на комбинированном топливе приводит к заметному (5–10%) уменьшению его интегральных характеристик относительно значений, рассчитанных по моделям более низкого уровня.

Список источников

1. Афонин А.Г., Бутов В.Г., Солоненко В.А., Яцук 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
2. 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.
3. 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.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М. : Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
5. Турбулентные течения реагирующих газов / пер. с англ. / под ред. П. Либби, Ф. Вильямса. М. : Мир, 1983. 328 с.

6. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М. : Машиностроение, 1974. 212 с.
7. 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.
8. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М. : Машиностроение, 1994. 320 с.
9. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения газа с частицами. М. : Физматлит, 2008. 600 с.
10. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA-Journal. 1994. V. 32, № 8. P. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149
11. 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.
12. Ватажин А.Б., Любимов Г.А., Регирер С.А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М. : Наука, 1970. 572 с.
13. Бреев В.В., Губарев А.В., Панченко В.П. Сверхзвуковые МГД-генераторы. М. : Энергоатомиздат, 1988. 240 с.
14. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / под ред. В.Е. Фортова. М. : Наука, 2000, Т. IV. 507 с.
15. Чернов Ю.Г., Сахаров Б.Б., Веретенев В.Ю. Пакет прикладных программ «Плазма». Препринт № 3522. М. : ИАЭ, 1981.
16. Панченко В.П. Введение в магнитогидродинамическое (МГД) преобразование энергии : электрон. учеб. изд. М. : МГТУ им. Баумана, 2011. 55 с.
17. Афонин А.Г., Бутов В.Г., Панченко В.П. и др. Импульсный магнитогидродинамический генератор большой мощности на твёрдом (пороховом) топливе нового поколения // Прикладная механика и техническая физика. 2018. № 6. С. 75–87. doi: 10.15372/PMTF20180608

References

1. Afonin A.G., Butov V.G., Solonenko V.A., Yashchuk A.A., Yakushev A.A. (2022) Issledovanie protsessov v generatore plazmy impul'snogo MGD-generatora na kombinirovannom pirotekhnicheskom toplive [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
2. 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 vozdukh [Investigation of plasma properties in combustion products of pyrotechnic (metal) fuels in the air]. *Doklady RAN*. 340(6). pp. 768–771.
3. 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
4. Nigmatulin R.I. (1987) *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Part I. Moscow: Nauka.
5. Libby P.A., Williams F.A. (1980) *Turbulent Reacting Flows*. New York: Topics in Applied Physics.
6. Sternin L.E. (1974) *Osnovy gazodinamiki dvukhfaznykh techeniy v soplakh* [Fundamentals of gas dynamics of two-phase nozzle flows]. Moscow: Mashinostroenie.
7. 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.

8. Sternin L.E., Shrayber A.A. (1994) *Mnogofaznye techeniya gaza s chastitsami* [Multiphase flows of gas with particles]. Moscow: Mashinostroenie.
9. Volkov K.N., Emel'yanov V.N. (2008) *Techeniya gaza s chastitsami* [Flows of gas with particles]. Moscow: Fizmatlit.
10. Menter F.R. (1994) Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 32(8). pp. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149
11. 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.
12. Vatazhin A.B., Lyubimov G.A., Regirer S.A. (1970) *Magnitogidrodinamicheskie techeniya v kanalakh* [Magnetohydrodynamic flows in channels]. Moscow: Nauka.
13. Breev V.V., Gubarev A.V., Panchenko V.P. (1988) *Sverkhzvukovye MGD-generatory* [Supersonic MHD generators]. Moscow: Energoatomizdat.
14. Fortov V.E. (2000) *Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy* [Encyclopedia of low-temperature plasma]. Volume IV. Moscow: Nauka.
15. Chernov Yu.G., Sakharov B.B., Veretenov V.Yu. (1981) *Paket prikladnykh programm «Plazma»* [Applied software package "Plasma"]. Preprint № 3522. Moscow: IAE.
16. Panchenko V.P. (2011) *Vvedenie v magnitogidrodinamicheskoe (MGD) preobrazovanie energii* [Introduction to magnetohydrodynamic energy conversion]. Moscow: Bauman MSTU.
17. 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

Сведения об авторах:

Бутов Владимир Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математической физики Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: bvg@niipmm.tsu.ru

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

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

Кулешов Артем Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптимизации Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: artem.kuleshov@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

Information about the authors:

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

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

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

Kuleshov Artyom A. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

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

Статья поступила в редакцию 04.07.2023; принята к публикации 12.02.2024

The article was submitted 04.07.2023; accepted for publication 12.02.2024