

03;04

Особенности взаимодействия электрического разряда с газовым потокм во внешнем магнитном поле

© И.Б. Клементьева, А.Н. Бочаров, В.А. Битюрин

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
E-mail: ira.klementyeva@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 апреля 2007 г.

Обеспечение устойчивого, эффективного смешения и сгорания газообразных топлива и окислителя в сверхзвуковом потоке в пределах камеры сгорания разумного размера — одна из важных задач при создании высокоскоростных проточных камер сгорания. В качестве метода интенсификации смешения спутных струй предлагается использовать магнитогидродинамический метод [1], который заключается в создании импульсного электрического разряда в газовом потоке и в использовании взаимодействия электрического разряда с внешним магнитным полем для организации завихренных течений. В статье представлен один из инструментов, используемый наряду с двумерным моделированием и физическим экспериментом, для исследования взаимодействия электрического разряда с газовым потоком во внешнем магнитном поле — квазитрехмерное моделирование, позволяющее описывать существенно трехмерную эволюцию разряда в рассматриваемых условиях.

PACS: 52.80.-s

Особенность квазитрехмерной модели заключается в том, что она строится на соотношениях макробаланса [2]. Источниками основных характеристик и зависимостей для построения модели служат результаты физических и двумерных численных экспериментов. Не претендуя на описание начальной стадии разряда, предполагается, что дальнейшее его развитие может быть описано в рамках модели многотемпературной плазмы. Модель предполагает, что тяжелые атомы, молекулы и ионы имеют одинаковую поступательную температуру T ; двухатомные молекулы могут быть колебательно возбуждены, и степень возбуждения характеризуется колебательной температурой T_v , своей для каждого сорта молекул; вращательные степени свободы находятся

в равновесии с поступательными; электронный газ имеет температуру T_e . В дополнение к общим законам сохранения массы и полной энергии рассматриваются уравнения, описывающие перенос электронной энергии, перенос колебательной энергии, уравнение внешней электрической цепи, уравнения движения и состояния. В уравнениях химической кинетики, по-видимому важных при описании начальной стадии и периферии, предполагается, что константы скоростей реакций с участием электронов определяются температурой электронов.

При построении физической модели электрического разряда используются следующие положения: масса вещества разряда считается постоянной во времени величиной, рассматриваются осредненные по сечению разряда характеристики, учитывается сильная неоднородность характеристик разряда по длине, описание потоков через разрядную поверхность осуществляется на основе гипотезы диффузионного слоя, ускорение разряда определяется как собственно массой канала, так и эффективной массой обтекающего его внешнего потока.

Для определения характеристик разряда и его положения в пространстве в каждый момент времени решается система уравнений, записанная для каждого малого элемента объема разряда V :

$$\frac{d}{dt} \int \rho dV = M = \text{const}, \quad (1)$$

$$M \frac{de_0}{dt} + q_0 \Delta S = Q_0 V, \quad (2)$$

$$M \frac{de_e}{dt} + q_e \Delta S = Q_e V, \quad (3)$$

$$M \frac{de_v}{dt} + q_v \Delta S = Q_v V, \quad (4)$$

$$V \frac{d\rho_j}{dt} = \dot{\omega}_j V, \quad (5)$$

$$M^* \frac{d\mathbf{U}}{dt} = \mathbf{J} \times \mathbf{BV}, \quad (6)$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{U}, \quad (7)$$

$$PV = \frac{M}{\mu} RT. \quad (8)$$

Здесь ρ , M — плотность и масса газа элемента электрической дуги; e_0 , e_e , e_v — осредненные по массе элемента полная энергия, энергия электронного газа и колебательная энергия возбужденных двухатомных молекул. Слагаемые q_0 , q_e , q_v — полные потоки тепла через единичную поверхность элемента разряда. Q_0 , Q_e , Q_v имеют смысл осредненных по объему элемента источников членов — полный энерговклад, энерговклад в электронный газ и в колебательные степени свободы тяжелого газа. ρ_j — плотность j -той компоненты, \mathbf{r} и \mathbf{U} — радиус-векторы и скорости центров масс элементов разряда, при этом $\mathbf{U} = \mathbf{V}_B + \mathbf{V}_{flow}(\mathbf{r})$, где \mathbf{V}_B — скорость движения, обусловленная действием электромагнитной силы на проводник с током в магнитном поле, $\mathbf{V}_{flow}(\mathbf{r})$ — скоростное поле невозмущенного потока.

P — давление газа, представляемое суммой парциальных давлений компонент:

$$P = \sum_{j=1} P_j = \sum n_j k T_j, \quad (9)$$

R и k — универсальная газовая постоянная и постоянная Больцмана, n_j — концентрации соответствующих компонент.

В уравнении динамики величина M^* представляет собой сумму двух масс

$$M^* = M + M_{eff}, \quad (10)$$

M — масса вещества элемента дуги, а M_{eff} — эффективная масса, рассчитанная по объему элемента электрического разряда V и плотности несущего его потока ρ_{envir} . M_{eff} в гидродинамике носит название присоединенной массы. Его появление связано с учетом реакции жидкости на движущееся в ней тело. Присоединенная масса цилиндрического тела равна массе жидкости в объеме этого тела.

Связь между элементами разряда осуществляется из условия протекания общего тока, определяемого уравнением внешней цепи

$$E = I(R_0 + R_{arc}), \quad (11)$$

где E , ЭДС источника, и R_0 , внешнее сопротивление цепи, — заданные параметры, а сопротивление электрического разряда

$$R_{arc} = \frac{L}{\sigma(T_e)\pi r^2}. \quad (12)$$

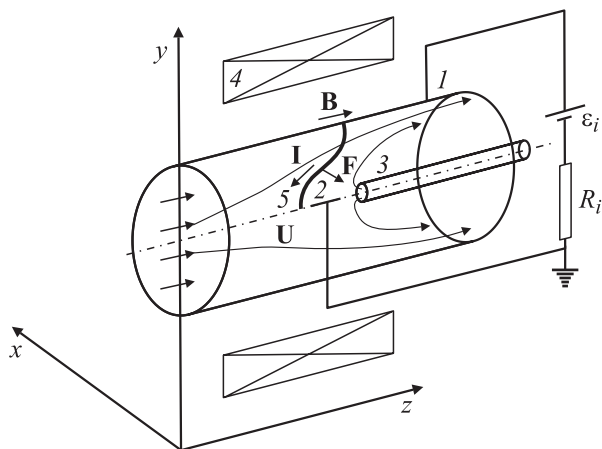


Рис. 1. Схема численного эксперимента: 1 — цилиндрический электрод, 2 — центральный проволочный электрод, 3 — газовый поток, 4 — магнитная катушка, 5 — электрический разряд.

Для исследования поведения электрического разряда в потоке во внешнем магнитном поле решается модельная задача в следующей постановке (рис. 1).

Расчетной областью является пространство, ограниченное цилиндрической поверхностью. Скоростное поле газового потока моделируется как суперпозиция скоростных полей основного потока (течет слева направо) и встречного потока (подается через расположенную на оси систему инжекции). Электрический разряд инициируется между проволочным электродом, расположенным на оси, и электродом внутренней поверхности цилиндра, расстояние между которыми 30 мм. Под действием поперечной силы и газового потока разряд перемещается и деформируется. Данная схема обеспечивает локализацию разряда вблизи контактной поверхности основного и встречного потоков. Можно ожидать, что локализация разряда вблизи их контактной поверхности решит задачу интенсификации смешения и горения в спутных струях.

Ниже приведены результаты расчета разряда молекулярного недиссоциирующего газа с молекулярным весом 29. В этом случае концентрация электронов и, следовательно, двухатомных ионов определяется

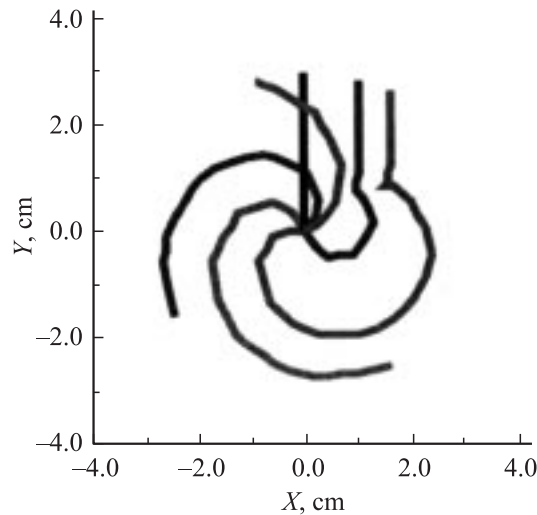


Рис. 2. Эволюция разряда в плоскости действия пондеромоторной силы.

согласно уравнению Саха по электронной температуре, а концентрация двухатомных нейтральных компонентов рассчитывается из уравнения полного давления (9). На начальной стадии существования разряда обеспечивается высоковольтным импульсом с энергией 0.01 J, затем поддерживается внешней цепью с ЭДС 5 kV и балластным сопротивлением 1 kΩ. Предполагается, что после пробоя диаметр разряда порядка 0.1 mm, тяжелый газ практически не возмущен, электронная температура 10^4 K. Как показывают расчеты, разряд быстро „забывает“ начальные условия, поэтому конкретные значения особой роли не играют, так как основное внимание при построении модели уделяется динамике разряда в потоке и поперечном магнитном поле.

На рис. 2, 3 представлены основные характеристики пятиамперного разряда в магнитном поле 0.1 T при скорости основного потока 30 m/s.

На рис. 2 показана эволюция разряда в плоскости поперечного сечения расчетной области на малых временах наблюдения, когда смещение вдоль оси цилиндра еще мало. Видимое вращение разряда — результат действия направленной по нормали к токовому каналу пондеромоторной силы в рассматриваемой конфигурации. Разряд принимает

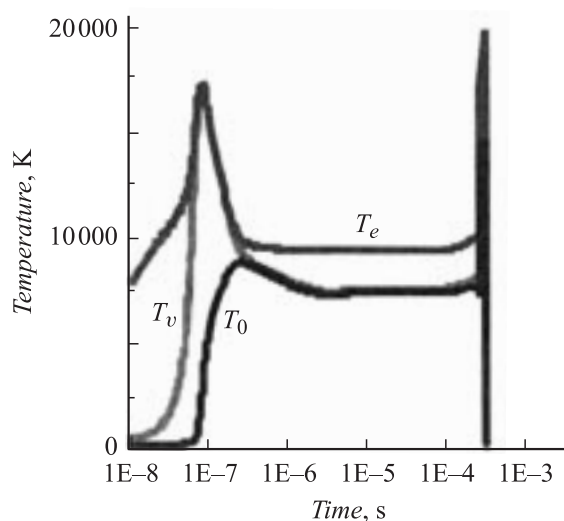


Рис. 3. Температуры в разряде: T_v — колебательная, T_e — электронная, T_0 — поступательная.

форму эвольвентной спирали, раскручивающейся вокруг центрального электрода, что определяется высокой азимутальной составляющей скорости разряда у центрального электрода и высокой радиальной скоростью остальной части разряда.

На рис. 3 представлены температуры в разряде. На начальной стадии быстро греется электронный газ, который передает энергию в колебательное возбуждение молекул, ток при этом протекает только благодаря наличию начальных электронов. Нагрев тяжелого газа происходит за счет двух процессов: колебательно-поступательной релаксации и упругих столкновений электронов. На временах порядка 100 ns колебательная температура приходит в равновесие с поступательной, при этом существует отрыв электронной температуры, обусловленный электрическим полем. Несмотря на то что сопротивление разряда растет в связи с его удлинением, энерговыход увеличивается, поскольку внешняя цепь работает в режиме генератора тока. Увеличение энерговыхода ведет к повышению температур. Момент резкого скачка характеристик разряда соответствует моменту его перезамыкания на

стенку внешнего электрода. Не вдаваясь в подробности описания особенностей поведения численного решения, отметим лишь, что в случае малых токов мощности источника питания не хватает для поддержания эволюции разряда и он гаснет. Разрыв тока происходит за счет деградации наиболее деформирующихся частей разряда. В рассматриваемой конфигурации такие элементы локализованы у центрального электрода.

Полученные в рамках квазиразмерного моделирования результаты согласуются с результатами прямого двумерного моделирования и экспериментальными наблюдениями.

Работа поддержана Программой № 20 РАН.

Список литературы

- [1] *Bocharov A.N., Leonov S.B., Baranov D.S., Klement'eva I.B., Bityurin V.A.* // 4th Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics in Aerospace Applications. Moscow, Russia, 2002. P. 220–230.
- [2] *Bocharov A.N., Bityurin V.A., Klement'eva I.B., Leonov S.B.* // 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, 2003. AIAA Paper 2003–5878.