Моделирование формирования структуры самоподдерживающегося токового слоя в потоке газа

В.А.Деревянко, Е.Н.Васильев, В.А.Сапожников, Н.Н.Лазарева, И.В.Баженова

Характеристики МГД-течения с Т-слоем в значительной степени зависят от распределения физических параметров в высокотемпературной плазменной области, так как именно эта электропроводная зона потока взаимодействует с магнитным полем. В формировании структуры Т-слоя выделяется два процесса: инициирование и вход в МГД-канал. Процесс инициирования плазменной области определяет начальную структуру Т-слоя и, тем самым, влияет на дальнейшую эволюцию Т-слоя и эффективность его взаимодействия с магнитным полем и газовым потоком. При входе плазменной области в МГД-канал начинается ее взаимодействие с магнитным полем, приводящее к перестройке структуры, как самой плазменной области, так и всего непроводящего потока.

Инициирование токового слоя происходит за счет энергии внешнего источника в отсутствие внешнего магнитного поля. При этом концентрированное джоулево тепловыделение приводит к расширению начального тонкого токопроводящего канала, образованного в результате искрового пробоя межэлектродного промежутка. При входе в МГД-канал происходит формирование самоподдерживающегося токового слоя (Т-слоя), высокая температура в котором поддерживается за счет кинетической энергии потока посредством индуцированного электрического поля. Т-слой является своеобразным плазменным поршнем, взаимодействующим с внешним поперечным магнитным полем и неэлектропроводным газовым потоком. Эффективность такого взаимодействия зависит от того, насколько "надежно" перекрывает Т-слой поперечное сечение МГД-канала. Протекание газа через область Т-слоя приводит к снижению силового взаимодействия и дополнительным конвективным потерям энергии, что увеличивает энергозатраты на поддержание Т-слоя и, тем самым, снижает энергетические характеристики генераторного процесса.

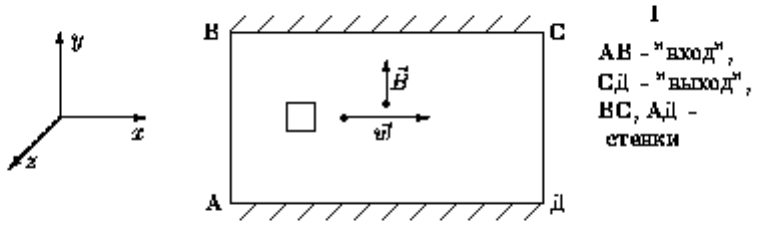

Рис.1.

Моделирование проводится в двумерной постановке для среднего сечения канала, параллельного плоскости электродов (Рис.1). Оценки показывают, что влиянием индуцированного магнитного поля можно пренебречь. Радиационные потери энергии учитывались в приближении объемного излучателя.

Задача инициирования Т-слоя решалась на основе нестационарной системы уравнений газовой динамики в эйлеровой системе координат на плоскости пространственных переменных (x, y)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial x} = j_z \cdot B_0,$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial \rho \Sigma u}{\partial x} + \frac{\partial \rho \Sigma v}{\partial y} + \frac{\partial P u}{\partial y} + \frac{\partial P v}{\partial y} = j_z E_z - q_{изл},$$

Здесь использованы стандартные обозначения: ρ - плотность, P - давление, Σ - удельная полная энергия, w=(u,v,0) – вектор скорости, $j=(0,0,j_z)$ - вектор плотности тока, $E=(0,0,E_z)$ - вектор напряженности электрического поля, $B=(0,B_0,0)$ - вектор индукции магнитного поля, $q_{изл}$ - излучение.

В правой части системы уравнений в соответствии с выбранной физической моделью учитывается сила Лоренца (j×B), джоулева диссипация (j·E) и излучение ($q_{изл}$).

Система уравнений замыкается уравнением состояния идеального газа

$$P = (\gamma - 1)\rho\varepsilon,$$

где γ - показатель адиабаты, а ε - удельная внутренняя энергия. Удельная полная и внутренняя энергия связаны соотношением

$$\Sigma = \varepsilon + 0{,}5(u^2 + v^2).$$

Уравнения газодинамики дополнены граничными условиями: на входе поток постоянный, на стенках задаются условия непротекания, на выходе поток свободно выпускается.

Начальным условием задачи является сверхзвуковое течение газа с локальным температурным возмущением, размеры которого малы по сравнению с шириной канала.

Расчет по исследованию структуры Т-слоя проводился в области с размерами 0.3 м и 0.15 м. В качестве рабочего тела взят воздух (для него γ=1.4). Газодинамические параметры в начальный момент задавались однородными по всему каналу (кроме области Т - слоя) $P=5\cdot10^5$ Па, u=1500 м/с, v=0 м/с, $T_ф$=1000 К.

В области Т-слоя задана температура Т=8000 К однородно по всей области (область: квадрат со стороной 0.025 м). Магнитное поле постоянно, B_0=2 Т.

Базовой для метода является схема Мак-Кормака второго порядка точности. Для данной задачи характерно наличие ударных волн и контактных разрывов, поэтому для решения использовался метод локальной диссипации, который относится к классу FCT-методов и позволяет рассчитывать ударные волны и контактные разрывы с минимальным размазыванием. Теплофизические свойства газа вводились в программу в виде таблиц.

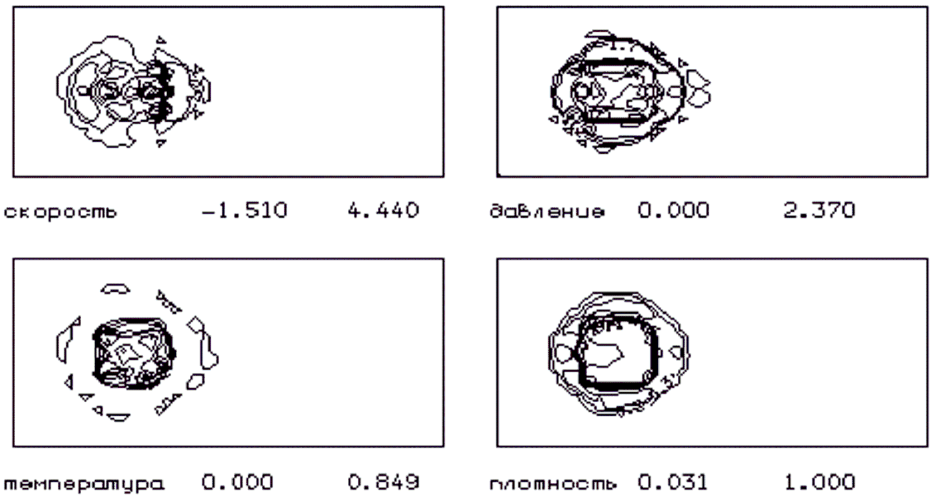

Рис.2.

Результаты моделирования показывают, что концентрированное выделение энергии в узкой, локальной области потока приводит к резкому повышению температуры и давления, что приводит к образованию ударной волны и радиальному разлету газа. При этом на начальной стадии процесса границы токопроводящей области практически совпадают с фронтом ударной

волны, при увеличении площади поперечного сечения разряда, ударная волна отходит от зоны проводимости (Рис.2).

В дальнейшем отражение ударной волны от стенок канала и взаимодействие отраженных ударных волн и волн разрежения приводит к тому, что от токового слоя вниз и вверх по потоку распространяются две ударные волны, а давление в зоне разряда выравнивается. В итоге процесса инициирования в потоке газа создается высокотемпературная плазменная область с достаточно однородным распределением давления (Рис.3).

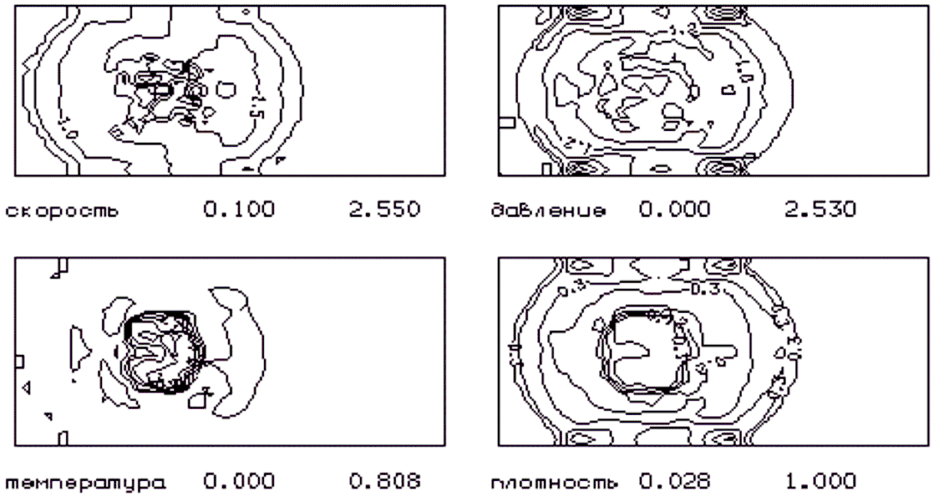

Рис.3.

Взаимодействие плазменной области с магнитным полем приводит к торможению, что вызывает дальнейшую перестройку структуры течения. Торможение электропроводной части потока приводит к формированию волны сжатия, двигающейся вверх по потоку, а в обратном направлении - волны разрежения. Структура токового слоя также перестраивается, вследствие как силового взаимодействия с магнитным полем, так и энергетических механизмов: тепловыделения, вызванного индуцированным электрическим полем, и лучистого теплообмена. При этом максимум температуры перемещается к границе токового слоя, примыкающей к волне разрежения. При этом в центре сформировавшейся плазменной области в течении развивается гидродинамическая неустойчивость, приводящая к разделению Т-слоя на две части (Рис.3).

Причиной развития гидродинамической неустойчивости типа Релей-Тейлора на границе раздела "неэлектропроводный газ - плазма" являются наличие градиента плотности и перепада газодинамического давления на Т-слое, а препятствующие этому физические механизмы - вязкость и процессы

теплопереноса. Влияние вязкости, которая в данной математический модели не учитывалась, должно привести к замедлению развития гидродинамической неустойчивости.

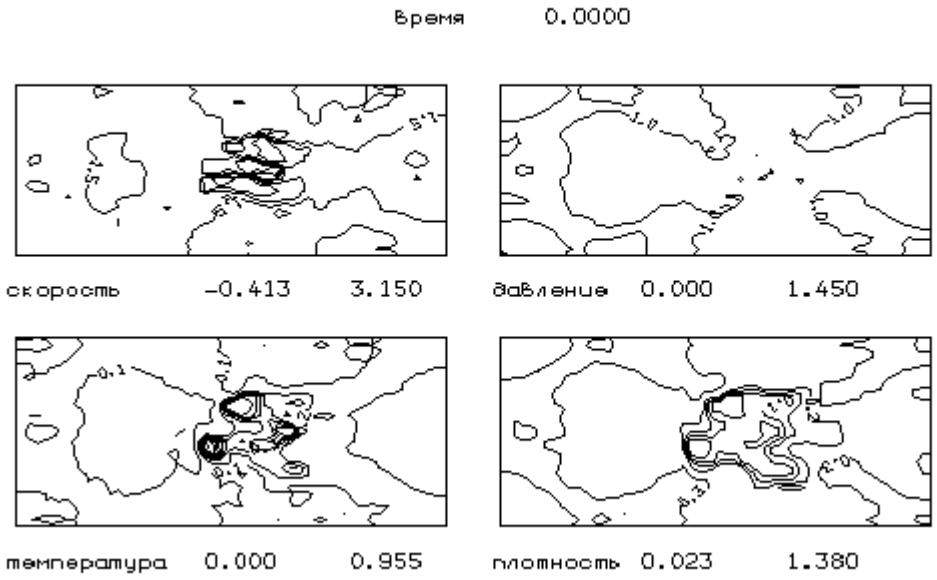

Рис.3.

Таким образом, математическая модель процесса инициирования Т-слоя позволяет изучить физическую суть явления и определить соотношение основных составляющих энергобаланса, таких как доля энергии внешнего источника, пошедшую на нагрев газа, потери на излучение и кинетическая энергия, которую приобрел газ при расширении. Математическая модель позволяет также определить динамику формирования структуры Т-слоя в МГД-канале.