Исследование взаимодействия закрученных течений с газоразрядной плазмой

В экспериментальной работе [1] проводились наблюдения высокочастотного емкостного разряда в закрученном потоке воздуха. Электрод устанавливался у открытого конца воздушной трубки. Наблюдения проводились при варьируемом массовом расходе воздуха, подаваемом в завихритель в аксиальном и тангенциальном направлениях. Опыт показал, что при малой закрутке (Q_t/Q_{ax}) в трубу распространяется стримерный разряд, однако при повышении закрутки происходит плавный переход режима из коронного в шнуровой, где шнур протягивается навстречу потоку.

На основе условий проведения экспериментов [1] для пакета Ansys FLUENT 12.1 построена трехмерная модель. Модель представляет из себя конечно-элементную сетку (1,4млн элементов) в виде трубы 400х36х36мм с открытым в атмосферу (P = 1атм) выходом. Вход имитирует завихритель с регулируемой подачей газа (воздуха) в аксиальном и тангенциальном направлениях. На выходе помещен источник джоулева тепла имитирующий выделение тепла электродом.

Для модели на всем объеме, с естественными граничными условиями прилипания и температуры на границах, решались уравнения Навье-Стокса и уравнение энергии

$$\rho\left(\frac{\partial \upsilon_i}{\partial t}+\upsilon_k\frac{\partial \upsilon_i}{\partial_k}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\mu\left(\frac{\partial \upsilon_i}{\partial x_k}+\frac{\partial \upsilon_k}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ik}\frac{\partial \upsilon_l}{\partial x_i}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\zeta\frac{\partial \upsilon_l}{\partial x_l}\delta_{ik}\right),$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+div(\rho\vec{\upsilon})=0,$$

$$\frac{d}{dt}(\rho E)+\nabla(\vec{\upsilon}(\rho E+p))=\nabla\ \ k_{eff}\nabla T-h\vec{J}+(\bar{\bar{\tau}}_{eff}\vec{\upsilon})\ \ +S_h,$$

где в правой части уравнения энергии первым трем слагаемым соответствуют вклады теплопроводности, диффузии и вязкости, а четвертому – локализованный источник тепла.

Результаты вычислений при различных режимах подачи воздуха показали что

1. при повышении показателя закрутки в приосевой области потока возникают зоны обратного течения, что согласуется с множеством экспериментов.

2. при повышении показателя закрутки происходит прогрев приосевой области течения внутрь потока, что, согласно экспериментальным и теоретическим данным, может являться условием для развития волн ионизации и возникновения в неоднородном потоке шнурового разряда.

3. в продольном рассмотрении область обратного течения в закрученном потоке имеет изгиб.

4. в поперечном рассмотрении область обратного течения совершает прецессионное движение вокруг оси трубы.

Так же получено аналитическое решение задачи об устойчивости закрученного течения с разрывом скорости и температуры потока на поверхности цилиндра радиусом R. Для того чтобы избавиться от уравнения энергии, скачок температуры был заменен скачком плотности.

$$\frac{\partial\vec{\upsilon}}{\partial t}+(\vec{\upsilon},\nabla)\vec{\upsilon}=-\frac{1}{\rho}gradp+\nu\Delta\vec{\upsilon}, \qquad \Omega_o(r)=\begin{cases}\Omega_1, r\le R,\\ \Omega_2, r>R,\end{cases} \quad \rho_o(r)=\begin{cases}\rho_1, r\le R,\\ \rho_2, r>R,\end{cases}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+div(\rho\vec{\upsilon})=0, \qquad \upsilon_{zo}(r)=\begin{cases}\upsilon_1, r\le R,\\ \upsilon_2, r>R,\end{cases} \quad c_{so}(r)=\begin{cases}c_{s1}, r\le R,\\ c_{s2}, r>R,\end{cases}$$

где Ω - угловая скорость, υ_{zo} - осевая, ρ_o - плотность, c_{so} - скорость звука.

Задача в предложенной постановке качественно соответствует модели потока с прогретой приосевой областью, которой соответствует перепад плотности потока. В результате решения системы уравнений для малого возмущения плотности и компонент скорости получено и решено дисперсионное уравнение, в частности инкремент неустойчивости.

$$x=\frac{\omega}{\Omega_1}=\frac{b\pm\sqrt{b^2-ac}}{a},\ где$$

$$a=1+Q,$$

$$b=m-1+qQ(m+1)+\frac{k}{S}(1+dQ),$$

$$c=m(1-q^2)+(-2m+m^2+2mq^2Q+2\frac{k}{S}(m+mqQd-1)+$$

$$+\frac{k^2}{S^2}(1+d^2Q)),$$

$$Q=\frac{\rho_1}{\rho_2},$$

$$q=\frac{\Omega_2}{\Omega_1},$$

$$S=\frac{R\Omega_1}{\upsilon_{z1}},$$

$$d=\frac{\upsilon_{z2}}{\upsilon_{z1}}.$$

[1] Klimov A., Fortov V. Longitudinal Plasmoid in High-Speed Vortex Gas Flow Created by Capacity HF Discharge // ISTC Project No. 3794P. 2010.