

Самарский Государственный Аэрокосмический Университет имени академика
С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Исследование взаимодействия закрученных течений с газоразрядной плазмой

Сугак Семён Сергеевич, 6406 гр.

Научный руководитель: д. ф.-м. н., профессор,

Завершинский Игорь Петрович

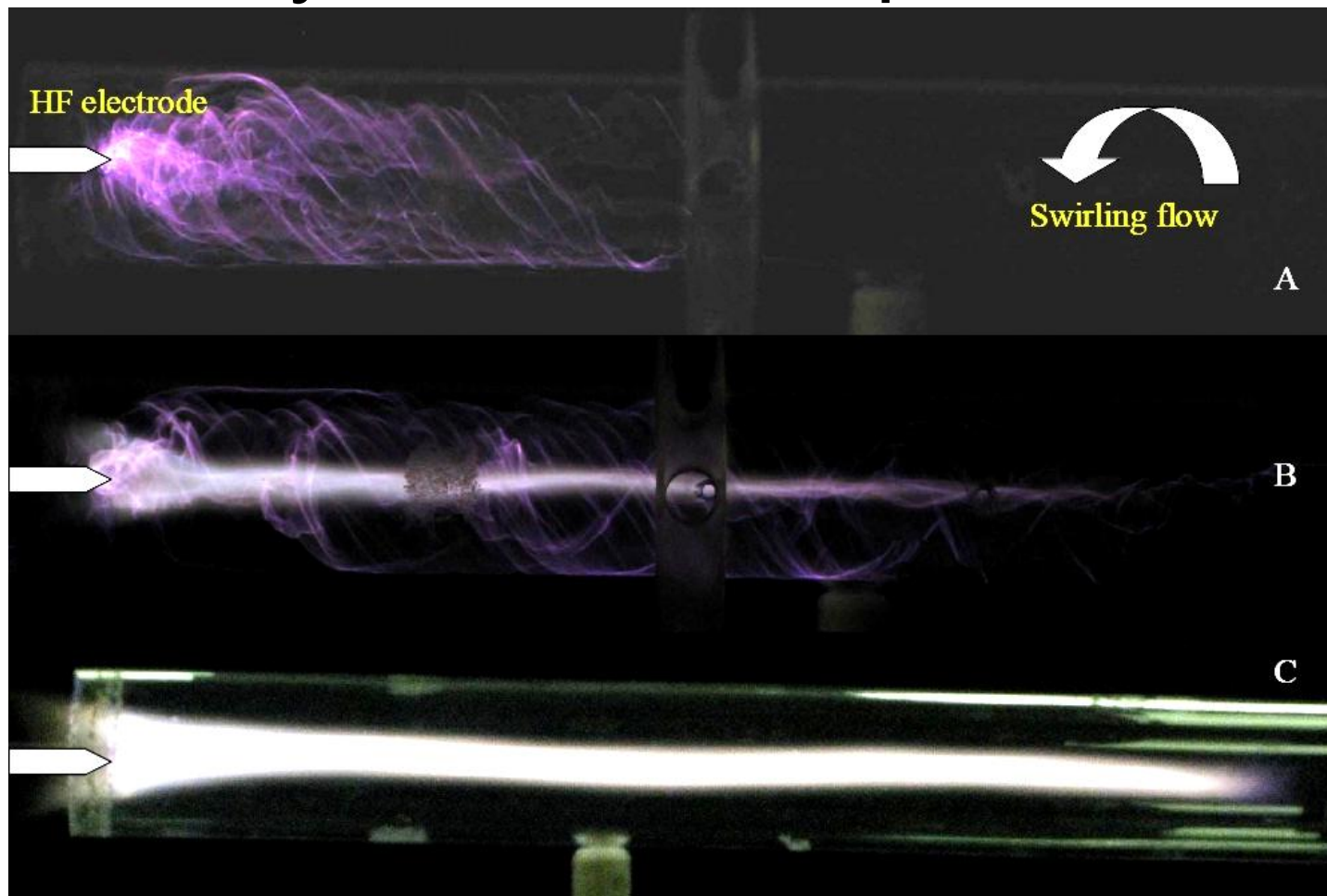
Самара 2011

Исследование взаимодействия закрученных течений с газоразрядной плазмой, Сугак С.С.

Поставленные задачи

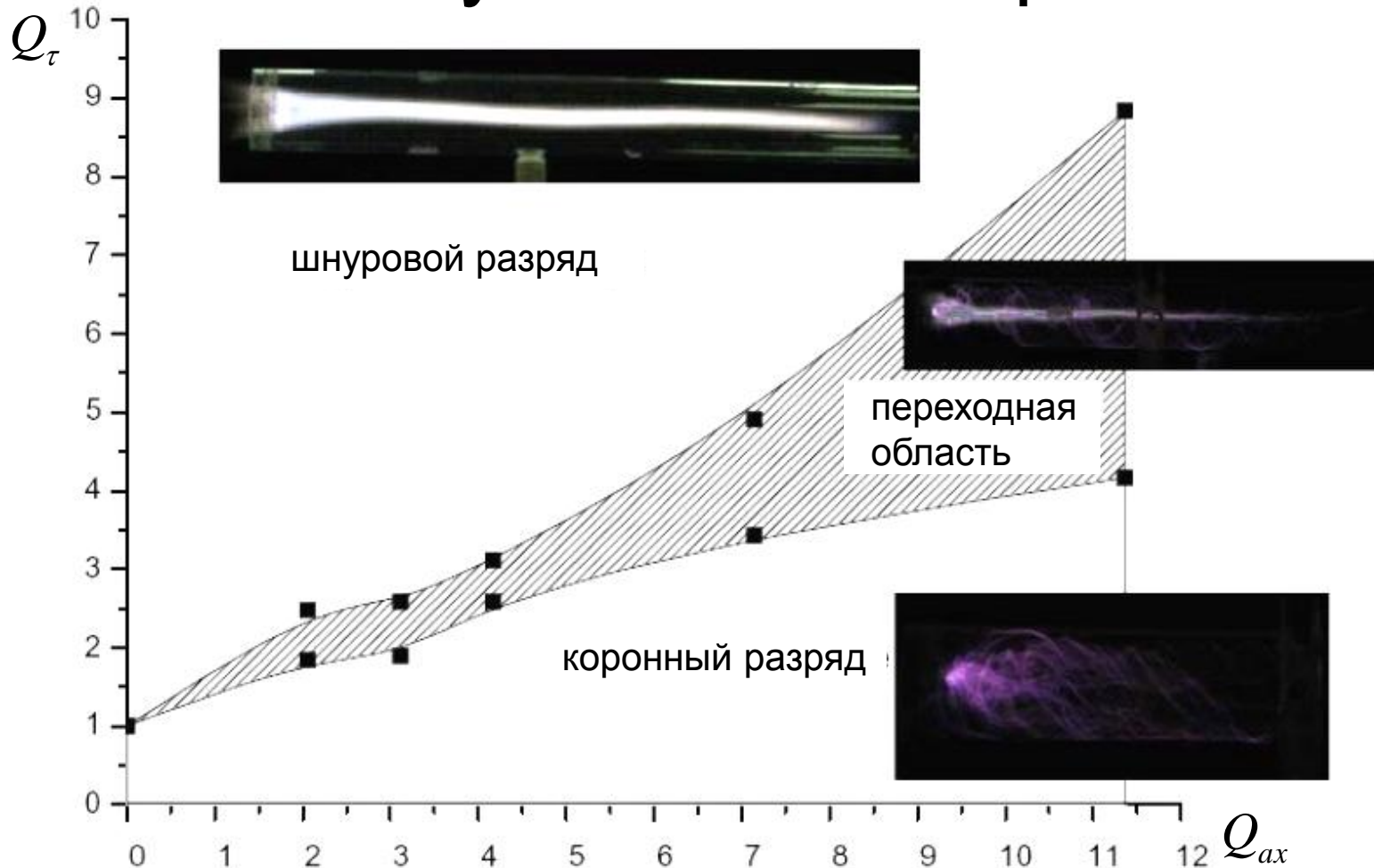
- Построить трехмерную численную модель закрученного течения с локализованным источником тепла.
- Аналитически решить задачу устойчивости закрученного течения с разрывом скорости и температуры потока.

Результаты экспериментов



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

Результаты экспериментов



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

Решаемые уравнения

Уравнения

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

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

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

Граничные условия

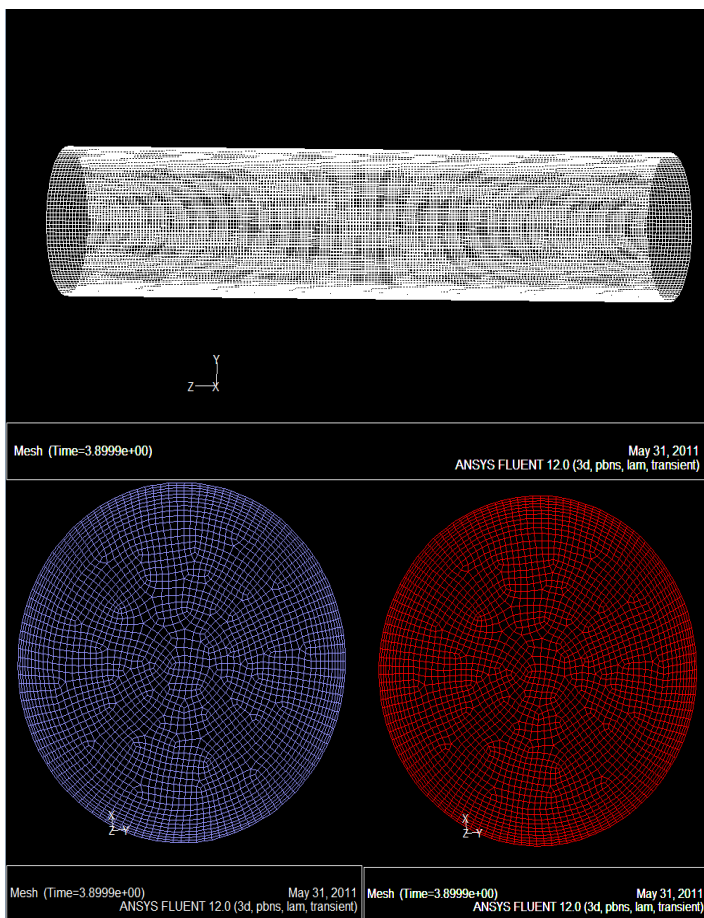
$$v_r(r, z, \phi, 0) = v_\phi(r, z, \phi, 0) = v_z(r, z, \phi, 0) = 0$$

$$v_r(R, z, \phi, t) = v_\phi(R, z, \phi, t) = v_z(R, z, \phi, t) = 0$$

$$T(r, z, \phi, 0) = T_0, \rho(r, z, \phi, 0) = \rho_0$$

$$T(R, z, \phi, t) = T_0$$

Описание конечно элементной модели



Сетка построена в **GAMBIT 2.3.16**

Труба 400x36x36мм - 1383500 элементов

Расчет проведен в **ANSYS Fluent 12.1**

Вход

-основание (2767 элементов, Q_{ax})

-часть боковой поверхности (3250 элементов, Q_T)

Выход

-основание (2767 элементов, P_{atm})

Граничные условия

$T = 300K$

$P_{atm} = 100кПа$

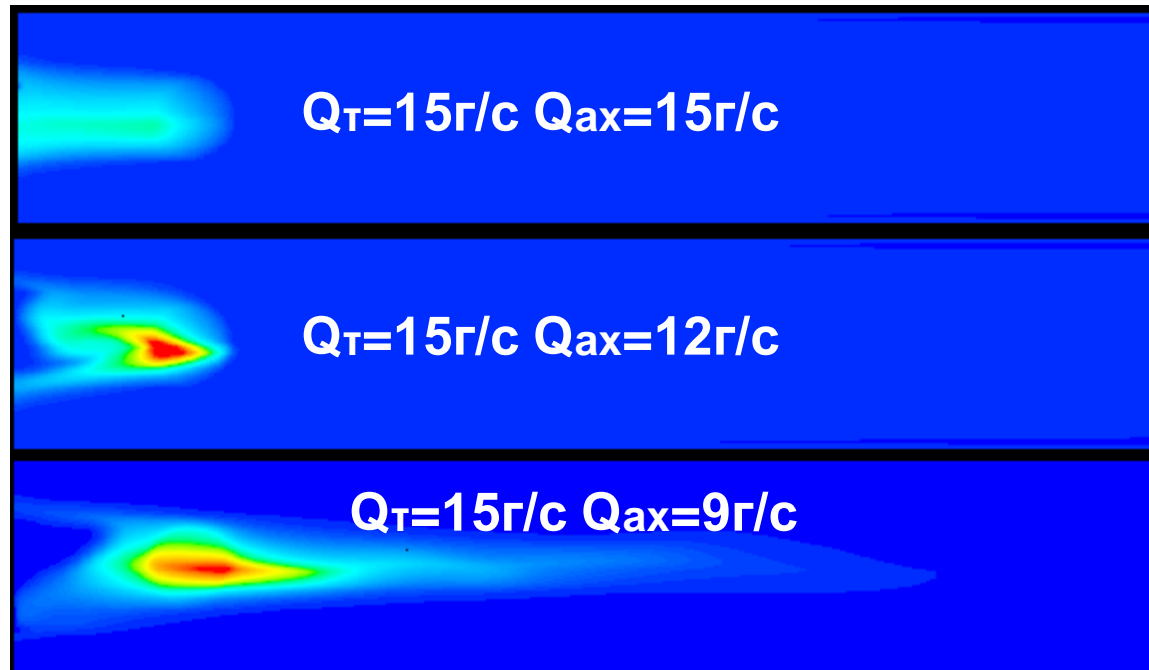
На расстоянии 3см от выхода локализован сферический источник тепла, радиусом 7 мм и мощностью 125 Вт

Результаты моделирования

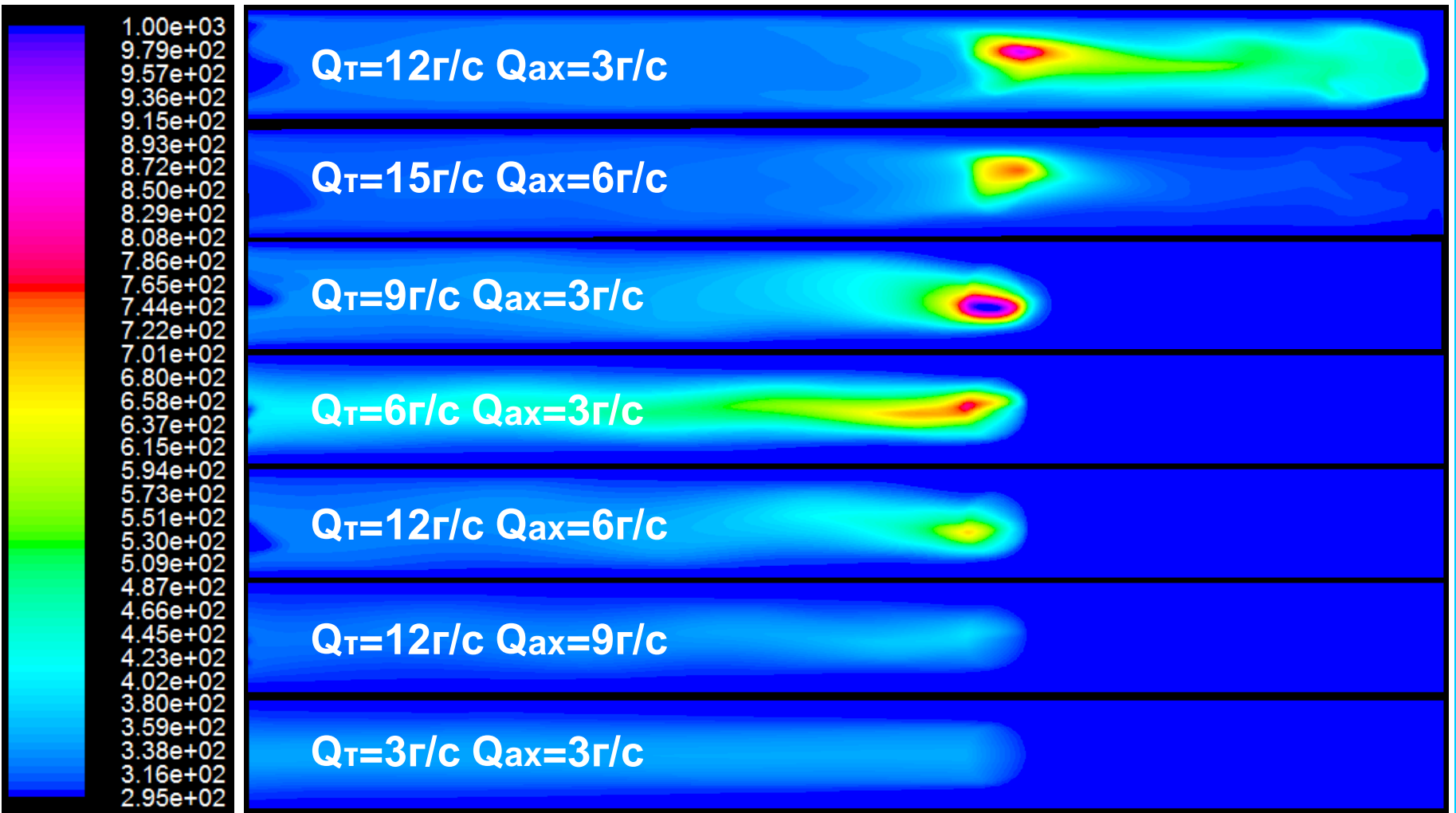
Максимальная температура потока

| Q_{τ} / Q_{ax} | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 |
|---------------------|------|------|------|------|------|-----|
| 15 | 617 | 750 | 660 | 3340 | 1230 | 585 |
| 12 | 960 | 1170 | 4580 | 1090 | 485 | 442 |
| 9 | 1870 | 2016 | 1240 | 500 | 457 | 366 |
| 6 | | 1590 | | | | |

Распределение температуры в потоке при различной закрутке

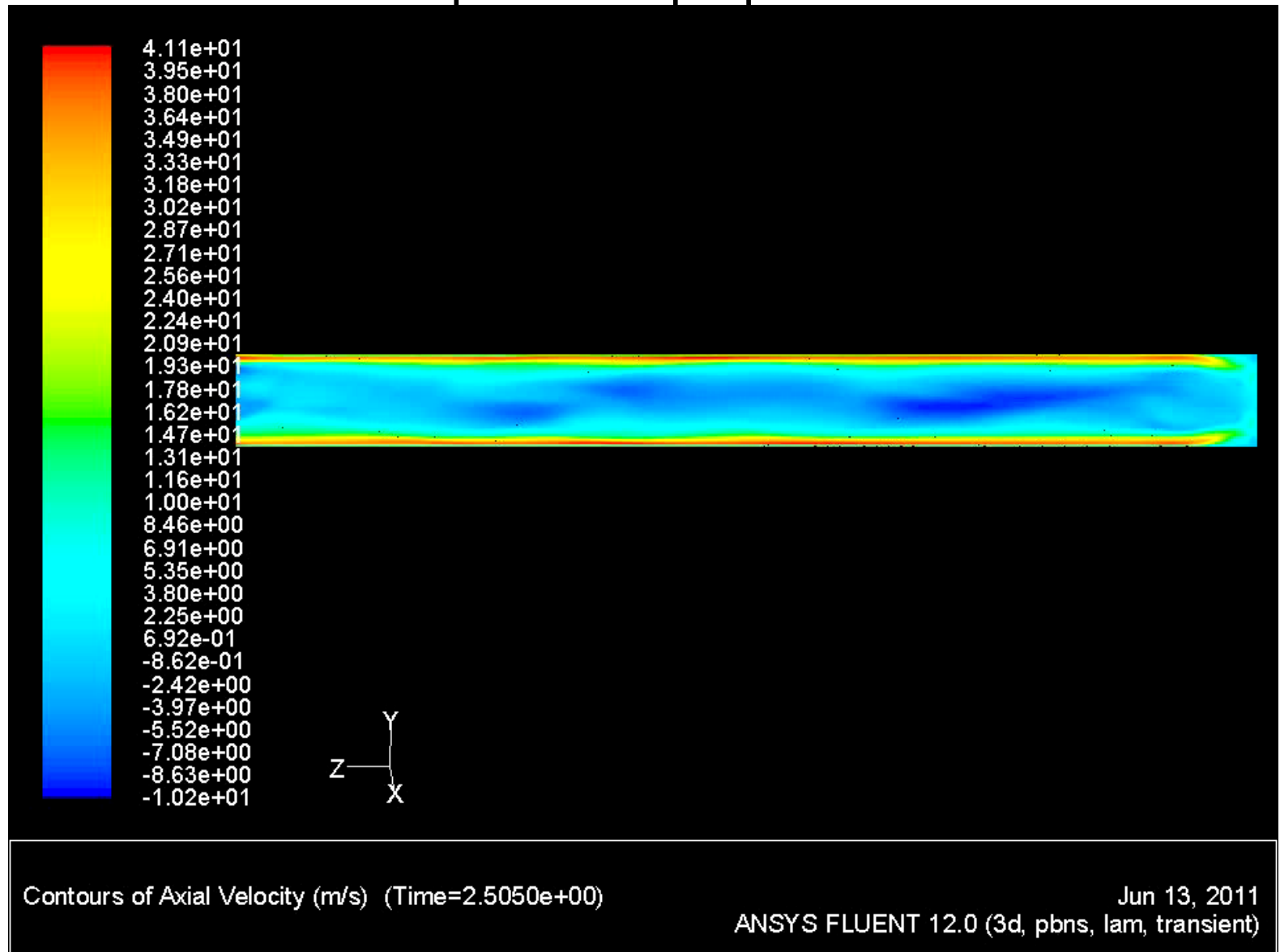


Распределение температуры в потоке

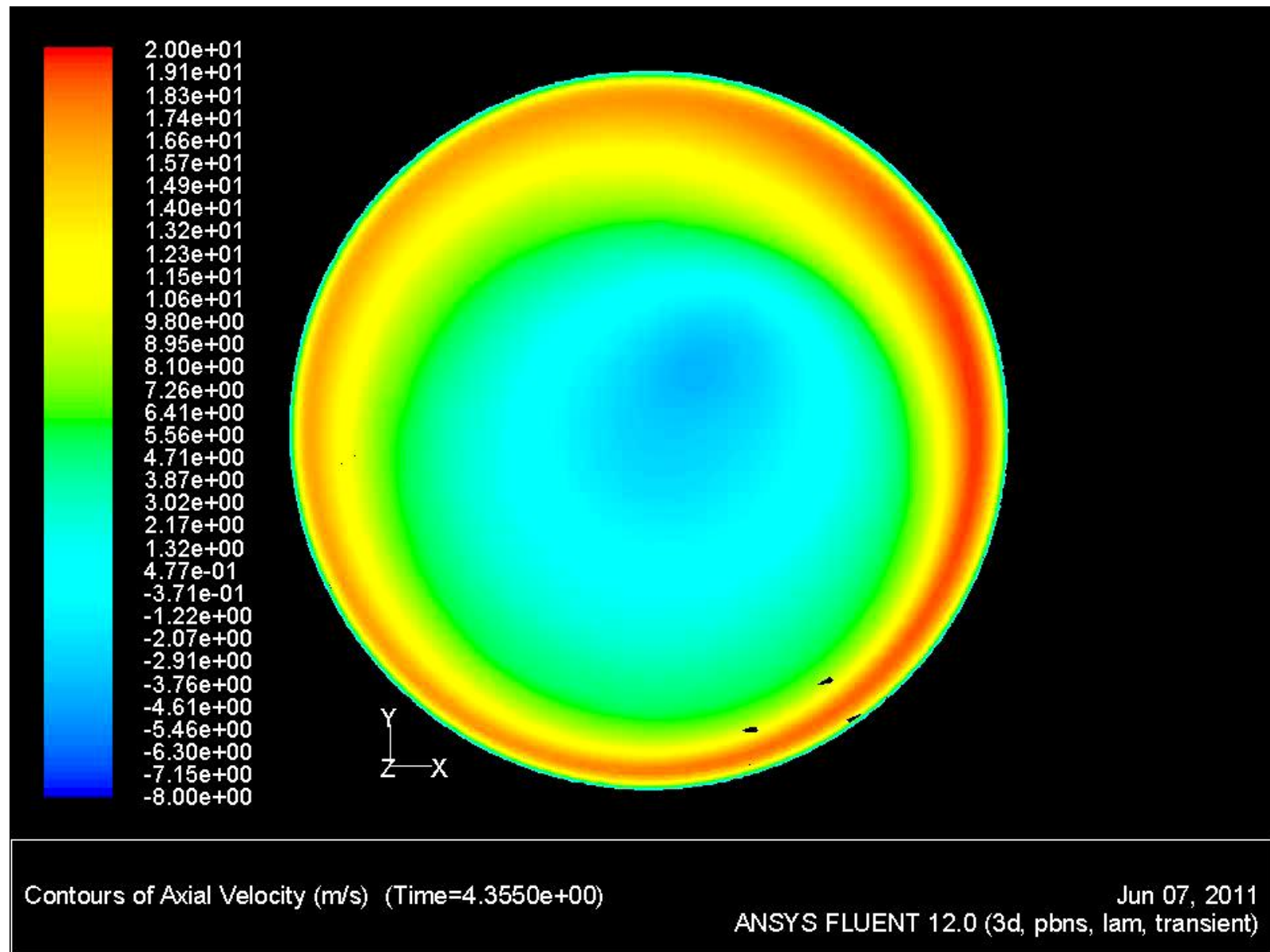


← направление потока

Распределение аксиальной скорости в поперечном профиле потока



Прецессия области обратного течения



Математическая модель

Уравнения Навье - Стокса

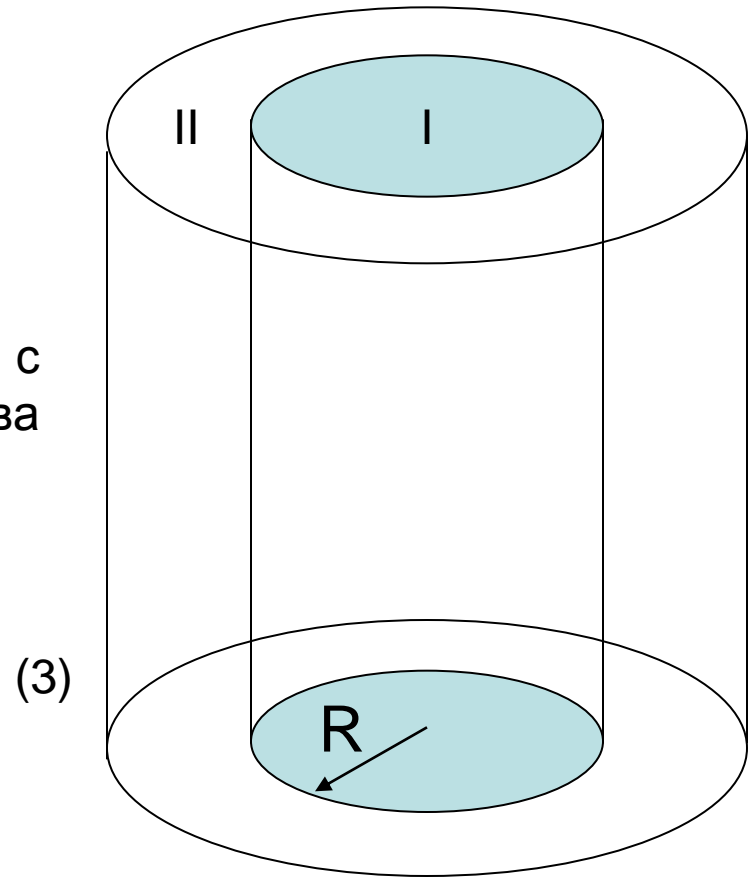
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Закрученный газовый поток с цилиндрической границей разрыва параметров.

$$\Omega_o(r) = \begin{cases} \Omega_1, r \leq R \\ \Omega_2, r > R \end{cases} \quad \rho_o(r) = \begin{cases} \rho_1, r \leq R \\ \rho_2, r > R \end{cases}$$

$$v_{zo}(r) = \begin{cases} v_1, r \leq R \\ v_2, r > R \end{cases} \quad c_{so}(r) = \begin{cases} c_{s1}, r \leq R \\ c_{s2}, r > R \end{cases}$$



Система уравнений

Линеаризованная система уравнений для предложенной системы имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_r'}{\partial t} + \frac{v_{\varphi 0}}{r} \frac{\partial v_r'}{\partial \varphi} + v_{z0} \frac{\partial v_r'}{\partial z} - \frac{2v_{\varphi 0}v_{\varphi}'}{r} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial}{\partial r} (c_{so}^2 \rho') \\ \frac{\partial v_{\varphi}'}{\partial t} + v_r' \frac{\partial v_{\varphi 0}}{\partial r} + \frac{v_{\varphi 0}}{r} \frac{\partial v_{\varphi}'}{\partial \varphi} + v_{z0} \frac{\partial v_{\varphi}'}{\partial z} + \frac{v_r'v_{\varphi 0}}{r} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial}{r \partial \varphi} (c_{so}^2 \rho') \\ \frac{\partial v_z'}{\partial t} + v_r' \frac{\partial v_{z0}}{\partial r} + \frac{v_{\varphi 0}}{r} \frac{\partial v_z'}{\partial \varphi} + v_{z0} \frac{\partial v_z'}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial}{\partial z} (c_{so}^2 \rho') \\ \frac{\partial \rho'}{\partial r} + \frac{\rho_o}{r} \frac{\partial (rv_r')}{\partial r} + v_r' \frac{\partial \rho_o}{\partial r} + \frac{\partial}{r \partial \varphi} (\rho_o v_{\varphi}' + \rho' v_{\varphi 0}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_o v_z' + \rho' v_{z0}) = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

Решение дисп. уравнения

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

$$a = 1 + Q,$$

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

$$c = m(1 - q^2) + (-2m + m^2 + 2mq^2Q + 2\frac{k}{S}(m + mqQd - 1) + \frac{k^2}{S^2}(1 + d^2Q)), \quad (5)$$

$$Q = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad q = \frac{\Omega_2}{\Omega_1}, \quad S = \frac{R\Omega_1}{v_{z1}}, \quad d = \frac{v_{z2}}{v_{z1}}.$$

Результаты работы

Получено численное решение для распределения температур в закрученном потоке, обосновывающее изменение режима ВЧЕ – разряда, которое согласуется с экспериментальными данными

Аналитически получен инкремент градиентной неустойчивости для закрученного потока с локализованным в нем источником тепла