

**ВЛИЯНИЕ ПРЕЦЕССИИ И НУТАЦИИ ВИХРЕВОГО ЯДРА  
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ГАЗА**

В теплоэнергетике область использования закрученных потоков охватывает значительную область, связанную с процессами выработки, транспортировки, передачи и использования тепловой энергии. При этом использование аэродинамики закрученных потоков позволяет интенсифицировать процессы тепло- и массообмена и оптимизировать конструктивные параметры оборудования.

Однако неустойчивость процессов, происходящих вследствие возникновения прецессии вихревого ядра, при степени крутки потока  $S$  более 0,6 не дают возможности использовать в полной мере аэродинамические свойства закрученных потоков.

Существующие в настоящее время модели прецессии вихревого ядра в закрученном потоке не учитывают его изменения и предполагают неизменность геометрической формы вихревого ядра в любом поперечном сечении закрученного потока [1].

Модель прецессии вихревого ядра разрабатывалась в предположении, что вихревое ядро находится под воздействием основного вращающегося потока, распределение скоростей в котором соответствует динамическому вращению. Вращение же вихревого ядра описывалось как статическое вращение.

Кроме того, полагая, что на вихревое ядро действует сила динамического давления, а в самом ядре давление определяется как [2]:

$$P = \rho(4\pi\Omega)^2 \ln r, \quad (1)$$

где:  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\Omega$  – угловая скорость, 1/с;

$r$  – радиус вращения вихревого ядра вокруг оси закрученного потока, м.

На основании уравнений Навье–Стокса и неразрывности потока были получены уравнения для расчета скорости движения

вихревого ядра в плоскости, перпендикулярной поступательному движению закрученного потока (оси Z):

$$V_x = \Omega \sqrt{(x - x_c)^2 + y^2} \cos \alpha; \quad (2)$$

$$V_y = \Omega \sqrt{(x - x_c)^2 + y^2} \sin \alpha; \quad (3)$$

$$\alpha = \text{Arctg} \left( \frac{y \rho c^2 - 2(4\pi\Omega)^2 ((x - x_a)^2 + y^2)}{\rho c^2 (x - x_a) y} \right); \quad (4)$$

$$x_c = y \text{tg} \alpha - x; \quad (5)$$

$$x_a = \sqrt{1 - y^2} + x, \quad (6)$$

где  $V_x$ ,  $V_y$  – скорости движения вихревого ядра в плоскости, перпендикулярной оси Z, м/с;  $x_c$ ,  $x_a$  – расстояния от оси закрученного потока до оси вихревого ядра, м;  $c$  – константа.

Результаты расчетов представлены на рис. 1, где показано изменение скорости вихревого ядра в зависимости от удаления его от оси закрученного (основного) потока. Анализ полученного графика показал, что минимальная скорость движения вихревого ядра соответствует области основного потока между зоной обратных токов и внешней его границей (ось координат расположена в центре закрученного потока), что объясняется преобладающим воздействием центробежных сил на границе обратных токов, а на внешней границе – динамическим давлением основного потока на вихревое ядро. Кроме того, минимальная скорость движения вихревого ядра соответствует минимальному воздействию основного потока, то есть данная область является наиболее устойчивой.

Рассмотрение профиля радиальной скорости (рис. 2) показало, что скорость практически постоянна в области основного потока, возрастание ее при удалении от оси, что вызвано увеличением радиуса вращения вихревого ядра, и соответственно увеличением угловой скорости вращения.

Для качественного подтверждения полученных результатов выполнена фотосъемка процесса горения сжиженного газа в закрученном потоке (рис. 3).

На снимке при затемнении видно ярко выраженное вихревое ядро, располагающееся между зоной обратных токов и внешней границей горения, что подтверждает ранее сделанные выводы.

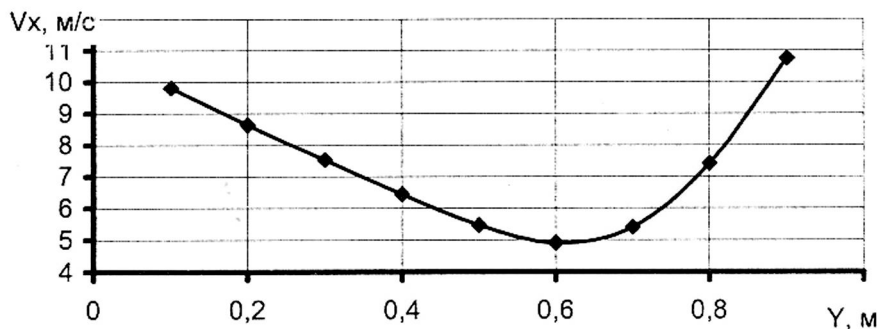


Рис. 1. Изменение аксиальной скорости движения вихревого ядра

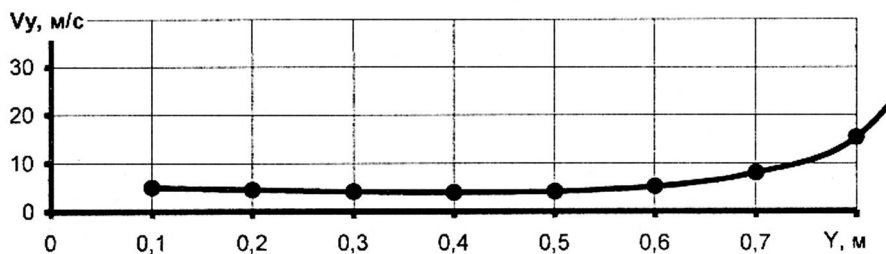


Рис. 2. Изменение радиальной скорости движения вихревого ядра

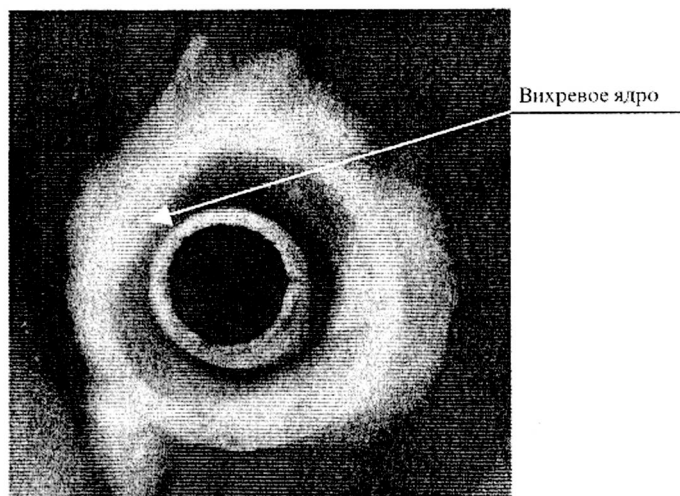


Рис. 3. Процесс горения в закрученном потоке

Таким образом, в результате теоретических исследований получены зависимости скорости движения прецессирующего вихревого ядра, позволившие выявить область устойчивого положения вихревого ядра – равновесия центробежных и центростремительных сил в закрученном потоке при наличии зоны обратных токов.

### Использованная литература

1. Кныш Ю. А., Урывский А. Ф. Модель прецессии вихревого ядра закрученной струи / Изв. ВУЗов, Авиационная техника, 1984, № 3. – С. 41–44.
2. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987.