

УДК 629.1

*Ю. М. Ахметов, Э. И. Зангиров, А. В. Свистунов*

Уфимский государственный авиационный технический университет

## Возможный механизм течения вихревых закрученных потоков

Рассматривается задача определения механизма течения потоков газа в вихревой трубе. Выполнено прямое численное моделирование движения потока газа по тракту вихревой трубы в пакете прикладных программ вычислительной гидродинамики Flow Simulation 2012. В отличие от известных результатов численного моделирования показано наличие различных структур в потоке газа и выявлен характер их взаимодействия.

**Ключевые слова:** вихревая труба, дросселирование, математическая модель, прямое численное моделирование, крупномасштабная вихревая структура.

Исследование термогазодинамических параметров вихревых устройств и механизмов, реализующих вихревой эффект, является основным направлением развития вихревой техники. В результате множества исследований определено, что вихревое движение обладает структурой потока. Особо важно знать вихревую структуру потока при создании и эксплуатации новых технических устройств, для интенсификации особенностей вихревого эффекта в них. С целью интенсификации процессов, возникающих при вихревом движении, аппараты эксплуатируются на режимах с повышенной закруткой потока. При этом течение оказывается, как правило, нестационарным. Структура таких течений, особенно с теоретической точки зрения, изучена недостаточно.

Процесс дросселирования газа в вихревой трубе (вихревой эффект), исследуемый с 1937 года, обладает рядом особенностей. Рассмотрены и проанализированы научные труды, публикации, результаты исследований, посвященные проблемам изучения и практического применения устройств, реализующих вихревой эффект, таких ученых, как В. С. Мартыновский, В. П. Алексеев, А. П. Меркулов, А. И. Леонтьев, Ш. А. Пиралишвили, Ю. Д. Райский, Л. Е. Тункель, В. М. Бродянский, А. Д. Суслов, Р. Я. Амиров, Р. Х. Мухутдинов, М. А. Жидков, А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. А. Целищев, С. В. Гурин, А. А. Соловьев, А. Ю. Пархимович, из зарубежных современных исследователей вихревого эффекта можно выделить Шепера (Scheper G. V.), Ван Димтера (Van Deemter J. J.), Такахама (Takahama H.) и др. Однако, несмотря на интенсивное изучение этого явления в течение последних пятидесяти лет, исследователи не пришли к единому мнению о его механизме. Гертлеровские вихри (Stephan et al., 1983); сжимаемость (Amitani et al., 1983; Д. К. Зайцев, Е. М. Смирнов, 1994); турбулентный перенос тепловой энергии (Linderstrom-Lang, 1971); акустические потоки (Kurosaka, 1982); перестройка вынужденного вихря в свободный (А. П. Меркулов, 1969); влияние вязкостных эффектов (В. И. Кузнецов, 1989; В. А. Баранов и др., 1994) и другие механизмы предлагались как возможные механизмы реализации эффекта энергоразделения в вихревых трубах.

На современном этапе изучения закрученных потоков исследователи пришли к выводу о том, что основную роль в них играют трехмерные вихревые структуры винтовой формы (С. В. Алексеенко, В. Л. Окулов, 1996). А. Гупта с соавторами (1987) указывают на значительное влияние прецессии вихревого ядра на процесс энергоразделения. Н. А. Артамонов, Б. Ф. Абросимов и М. З. Максименко (1987) при изучении динамики течения в вихревой трубе сделали важное наблюдение о винтовой структуре потока в трубе Ранка. С. В. Лукачевым (1981) было дано объяснение регулярных пульсаций потока (типа прецессии) в вихревых трубах как следствие возникновения крупномасштабных вихревых структур. В своей последующей работе он предложил гипотезу о возможности существования двойных и тройных вихревых образований на основе анализа сдвига фаз между

пульсациями давления, измеренными в двух диаметрально противоположных точках вихревой трубы (С. В. Лукачев, 1984). Развитие этих представлений было продолжено в работе Ю. А. Кныша (1988). Однако возникновение вихревых структур в вихревых трубах оба исследователя связывают не с неустойчивостью интенсивно закрученных потоков, а с неустойчивостью типа контактного разрыва на поверхности раздела периферийного подогретого газа и центрального холодного ядра потока. В связи с этим базовыми вихревыми структурами они считают вихревые кольца в виде тора, которые в реальном несимметричном потоке деформируются и сворачиваются в спиральные вихревые структуры. Точное представление о винтообразной форме вихревой структуры, образующейся в результате неустойчивости потока, в указанных работах отсутствует. Вместе с тем при исследовании структуры потока в другом аппарате — вихревом генераторе звука — С. В. Лукачев (1988) связывает образование прецессирующего винтового вихря с распадом вихря. Наконец, явное подтверждение наличия винтообразных винтовых структур в вихревой трубе получено с помощью специальных методов визуализации в работе В. А. Арбузова с соавторами (1997) [1].

Попытки визуализации течения в вихревой трубе по результатам численного эксперимента, предпринятые некоторыми авторами [2], показывают качественно непротиворечивую картину, но не отражают специфику движения потоков и характер их взаимодействия.

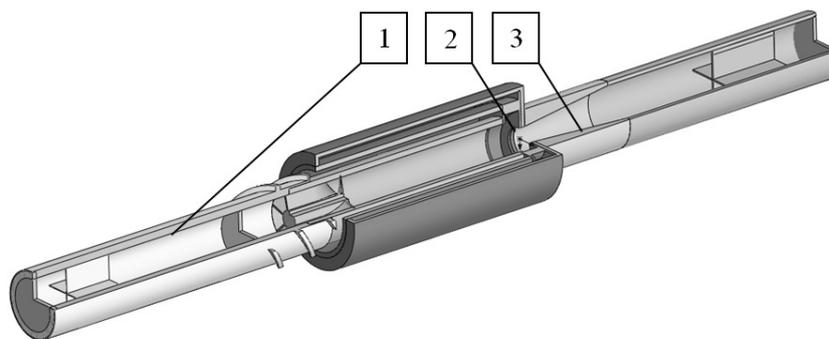


Рис. 1. Трехмерная твердотельная модель вихревой трубы: 1 – камера энергетического разделения; 2 – закручивающее устройство (улитка); 3 – диафрагма

С целью визуализации процессов стратификации в вихревой трубе авторами была разработана твердотельная модель вихревой трубы (рис. 1) и осуществлено прямое численное моделирование процессов. Прямое численное моделирование было выполнено в пакете прикладных программ вычислительной гидродинамики *Flow Simulation 2012* производства компании *SolidWorks* [3].

Система уравнений математической модели, решаемая аппаратом программного комплекса *Flow Simulation*, после расстановки граничных и начальных условий включает в себя:

- уравнение неразрывности:

$$(\rho u^j)_{,j} = 0, \quad (1)$$

- уравнения движения:

$$\rho u^j u^i{}_{,j} = (2\mu e^{ij} - \frac{2}{3}\mu u^k{}_{,k} g^{ij} - p g^{ij})_{,j}, \quad (2)$$

- уравнение энергии:

$$\rho c_p u^j \frac{\partial T}{\partial x^j} = u^j \frac{\partial p}{\partial x^j} + g^{ij} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x^j} \right)_{,j} + 2\mu e^{ij} - \frac{2}{3} (u^j{}_{,j})^2. \quad (3)$$

Верхние индексы обозначают контравариантные, а нижние – ковариантные составляющие соответствующих тензоров; индекс «запятая» внизу обозначает делать ковариантное дифференцирование по соответствующей координате;  $e^{ij}$  – контравариантные составляющие тензора скоростей деформации, которые равны

$$e^{ij} = \frac{1}{2}(g^{ik}u_{,k}^j + g^{jk}u_{,k}^i), \quad (4)$$

$g^{ik}$  – контравариантные составляющие метрического тензора;  $\mu$  – коэффициент вязкости;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c_p$  – коэффициент удельной теплоемкости при постоянном давлении;  $\rho$  – плотность;  $u^j$  – контравариантная составляющая вектора скорости;  $T$  – температура;  $p$  – давление.

В решении данной задачи используется квазистационарная полуэмпирическая  $k - \varepsilon$ -модель турбулентности.

Касательные напряжения для вязкой ньютоновской жидкости определяются в данной модели следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \cdot \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}. \quad (5)$$

Для замыкания системы уравнений применяются уравнения переноса турбулентной кинетической энергии и уровня ее диссипации согласно  $k - \varepsilon$ -модели:

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k}{\varepsilon}. \quad (6)$$

Уравнение турбулентной кинетической энергии ( $k$ ):

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon. \quad (7)$$

Уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} f_1 \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}. \quad (8)$$

В существующих моделях вихревых течений для описания состояния газа используется уравнение идеального газа Менделеева–Клапейрона. Такое допущение корректно лишь для узкого диапазона параметров течения газа в вихревой трубе. Это связано со свойством сжимаемости реальных газов, которое не описывается уравнением состояния идеального газа.

Уравнения состояния идеального газа Ван-дер-Ваальса и Редлиха–Квонга были выбраны как уравнения для широкого диапазона изменения параметров состояния газа. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса описывается следующим выражением:

$$\left( p + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v - b) = R \cdot T, \quad (9)$$

где  $a$ ,  $b$  – константы, характеризующие величину сил притяжения молекул и величину сил отталкивания соответственно, определяемые значениями критических параметров газа:

$$a = 3 \cdot p_{\text{кр}} \cdot v_{\text{кр}}^2, \quad b = \frac{R \cdot T_{\text{кр}}}{8 \cdot p_{\text{кр}}}.$$

Уравнение состояния Редлиха–Квонга выглядит следующим образом:

$$p = \frac{R \cdot T}{v - b} - \frac{a}{(v + b) \cdot v \cdot \sqrt{T}}, \quad (10)$$

$$a = \frac{0.42748 \cdot R^2 \cdot T_{\text{кр}}^{2.5}}{p_{\text{кр}}}, \quad b = \frac{0.08662 \cdot R \cdot T_{\text{кр}}}{p_{\text{кр}}}.$$

Для описания термогазодинамических характеристик турбулентных течений в квази-стационарной постановке уравнения математической модели из классической формы преобразуются методом Рейнольдса и записываются в тензорном виде.

Систему уравнений движения среды при численных расчетах турбулентных течений дополнили моделями турбулентности, позволяющими рассчитать значения турбулентных добавок, входящих в эти уравнения [4].

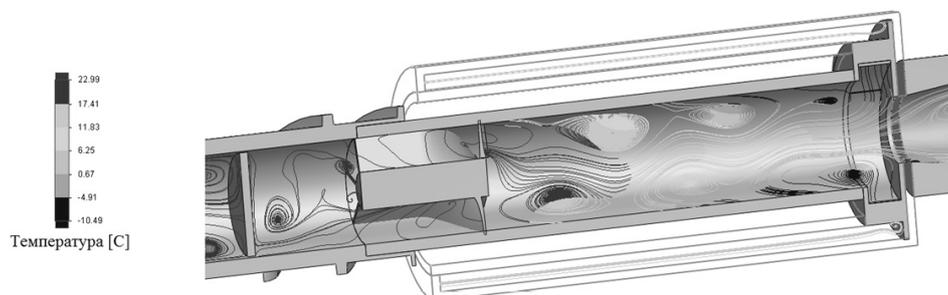


Рис. 2. Проекция линий тока на плоскость симметрии камеры энергетического разделения

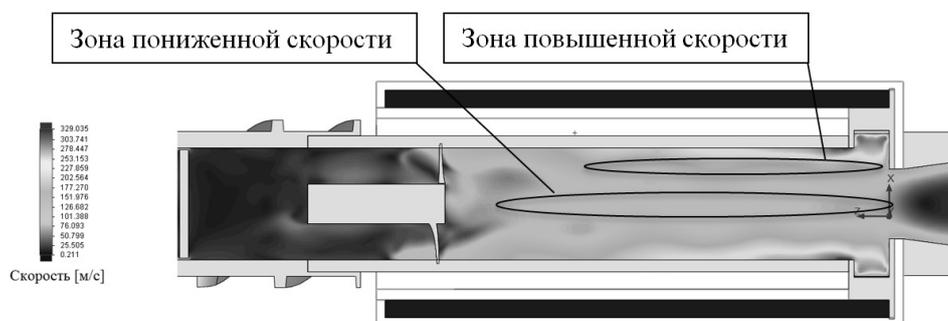


Рис. 3. Поле полных скоростей потока

Визуализация результатов численного моделирования течения газа в вихревой трубе с помощью линий тока, спроецированных на плоскость симметрии камеры энергетического разделения (рис. 2), показывает наличие замкнутых циркуляционных зон между центральным и периферийным потоками. Поле полных скоростей потока, представленное на рис. 3, демонстрирует неоднородность характера течения газа и наличие зон заторможенного потока в центральной части вихревой трубы (примерно 90 м/с).

Анализ полученных структур потока позволил их разделить на структуру центрального потока (приосевую) и крупномасштабную вихревую структуру потока (КВС) (рис. 4), что подтверждается результатами визуализации течений в вихревых трубах, представленных на рис. 5 и 6.

Исследование характера движения полученных структур позволило выявить следующие особенности: КВС имеет закрутку относительно собственной оси, находящейся в «центре» структуры, ось КВС не имеет закрутки, имеет форму спирали и движется вдоль оси вихревой трубы в направлении от тангенциального закручивающего устройства в сторону камеры энергетического разделения; осевой поток имеет закрутку относительно собственной оси и движется вдоль нее в сторону, противоположную движению КВС, ось имеет форму спирали (рис. 7).

Моделирование течения газа по тракту камеры энергетического разделения вихревой трубы позволило получить массив данных и построить линии тока движения газа. Анализ визуализации экспериментальных данных позволил выявить крупномасштабную вихревую и приосевую структуры потока газа.

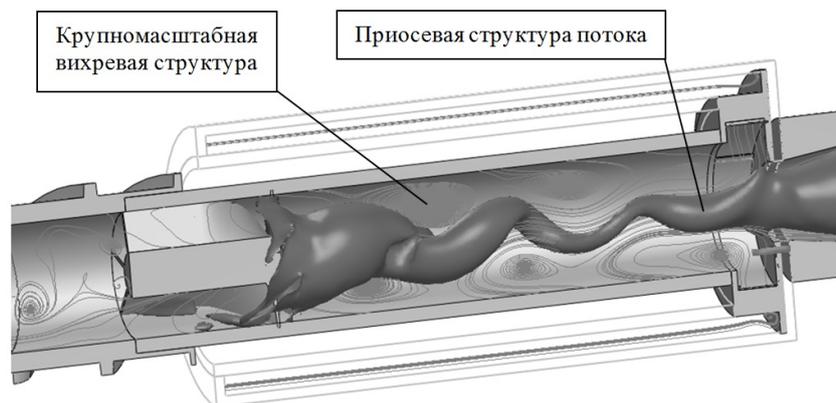


Рис. 4. Пространственная конфигурация центральной структуры потока (приосевой) и крупномасштабной вихревой структуры потока (КВС), полученная в результате прямого численного моделирования вихревой трубы

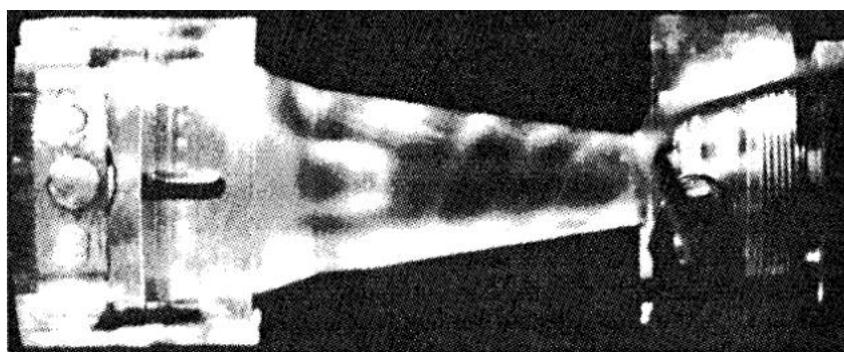


Рис. 5. Шлирен-снимок крупномасштабных вихревых жгутов в камере энергетического разделения трубы Ранка–Хилша [5]

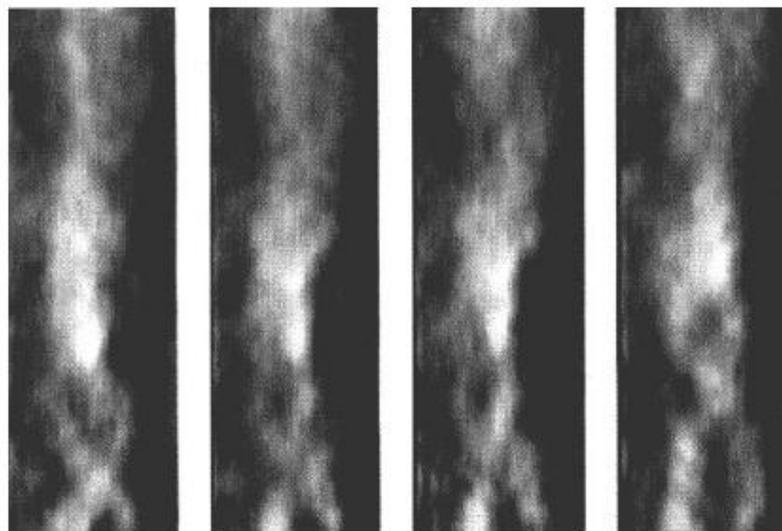


Рис. 6. Визуализация крупномасштабных вихревых структур в двухсопловой вихревой трубе методом биохроматической фильтрации Гильберта в виде двойной спирали со временем экспозиции 250 мс [6]

На основании исследования скоростей потока газа в вихревой трубе была выдвинута гипотеза о характере движения газа в вихревой трубе. Согласно предлагаемой гипотезе в вихревой трубе в потоке газа можно выделить две структуры: приосевую и крупномас-

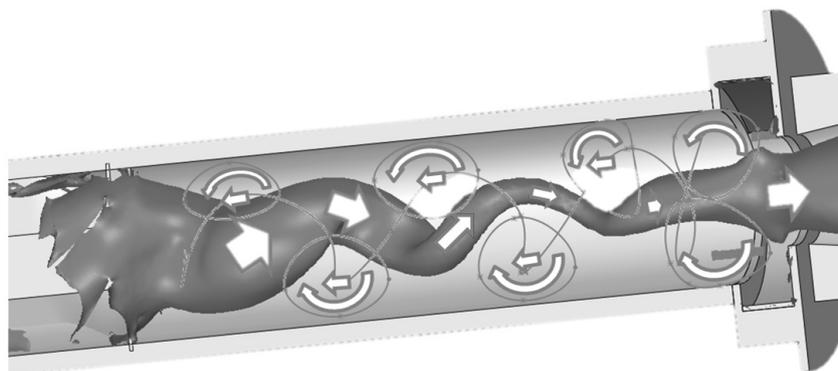


Рис. 7. Схема закрутки потоков в структуре движущегося потока в вихревой трубе

штабную. После прохождения потока газа через закручивающее устройство поток образует крупномасштабную вихревую структуру, которая имеет собственную ось вращения и представляет собой спираль. Частицы потока движутся вдоль оси КВС, имеющей форму спирали, в направлении от закручивающего устройства в сторону камеры энергетического разделения. Помимо этого, КВС совершает вращательное движение относительно оси вихревой трубы. По мере течения потока по камере энергетического разделения образуется спиралевидный приосевой поток, ось которого закручена относительно оси вихревой трубы. Частицы приосевого потока движутся в сторону закручивающего устройства.

Работа, отраженная в данной статье, признана лучшей на Всероссийском конкурсе научных и инновационных проектов студентов, аспирантов и молодых ученых (МФТИ-2012).

## Литература

1. Куйбин П.А. Исследование динамики и неустойчивости отрывных течений и следов: дис. ... канд. физ.-мат. наук / ИТ СО РАН. — Новосибирск, 1993. — 140 с.
2. Linderstrom-Lang C.U. The three-dimensional distributions of tangential velocity and total temperature in vortex tubes // J. Fluid Mech. — 1971. — V. 45. — P. 161–187.
3. Ахметов А.Ю. [и др.]. Численное моделирование стратификации газа в камере энергетического разделения вихревой трубы. Актуальные проблемы в науке и технике. Том 2. Машиностроение, электроника, приборостроение: сборник научных трудов Восьмой Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфимск. гос. авиац. тех. ун-т. — Уфа: УГАТУ, 2013. — С. 107–111.
4. Ахметов А.Ю. [и др.]. Исследование влияния тормозного устройства на структуру потока и параметры изотермического вихревого регулятора давления // Вестник УГАТУ. — Уфа: УГАТУ, 2011. — Т. 15, № 4(44). — С. 149–153.
5. Пиралишвили Ш.А. [и др.]. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. — М: Энергомаш, 2000. — 415 с.
6. Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Яворский Н.И. [и др.]. Наблюдение крупномасштабных гидродинамических структур в вихревой трубке и эффект Ранка // Письма в ЖТФ. — 1997. — Т. 23, № 23.

Поступила в редакцию 16.04.2013.