

УДК 533.17:621.431.75

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

© 2013 О. В. Василюк, Ш. А. Пиралишвили, А. А. Шайкина

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск

В работе проведено численное решение полных уравнений Навье – Стокса для течения интенсивно закрученного потока по осесимметричному каналу, задиафрагмированному в сечении подвода основного потока и снабжённому дросселем на противоположном конце канала с центральным отверстием для ввода дополнительных масс газа. Получены картины течения, поля распределения термодинамических параметров. Выполнено сравнение результатов численного расчёта с экспериментальными данными вихревых труб с дополнительным потоком. Отмечено образование крупномасштабных вихревых структур. Полученные результаты численного расчёта и компьютерной визуализации могут быть в дальнейшем использованы для уточнения физической модели и методики расчёта характеристик вихревых труб.

Численное моделирование, вихревая труба с дополнительным потоком, температурная стратификация.

В мире довольно остро встал вопрос о рациональном использовании и расходе топлива, поэтому на сегодняшний день большое внимание уделяется вопросам широкого применения вторичных энергоресурсов, разработке и внедрению новых энерготехнологических процессов. Современные технологии использования возобновляемых энергетических ресурсов недостаточно эффективны или дороги по сравнению с технологиями преобразования энергии органического топлива. Анализ современных технологий показывает, что одним из перспективных способов является преобразование тепловой энергии на основе вихревого эффекта. Он выгодно отличается от известных устройств простотой технического выполнения и обслуживания, а также является более дешёвым в промышленном производстве. Вихревые трубы безопасны, компактны и надёжны в промышленной эксплуатации.

В настоящее время вихревая техника широко внедрена в промышленность: вихревые управляющие клапаны в системах управления тягой ракетных двигателей, вихревые холодильники, вихревые системы очистки, осушки газа в газовой промышленности и т.д. Вихревые трубы могут быть использованы индивидуально

и в технологической схеме с теплообменником-рекуператором и сепаратором [1].

Результаты различных экспериментальных исследований показывают, что интенсивная закрутка потока оказывает существенное влияние на характеристики течения.

Экспериментальное исследование закрученных течений не всегда возможно, но всегда дорогостояще, трудоёмко и требует больших временных и материальных затрат. В то же время развитие компьютерных технологий и достигнутый уровень численных расчётов, а также возможности современных персональных компьютеров позволяют заменять постановку физического эксперимента численным моделированием, одновременно осуществляя компьютерную визуализацию, позволяющую позже получать интересные сведения о физике протекающих процессов. Работа посвящена численному исследованию явления стратификации температуры в вихревой трубе с дополнительным потоком.

Вихревая труба с дополнительным потоком (рис.1) имеет камеру энергоразделения 1, закручивающее устройство 2, диафрагму 3 с центральным отверстием, дроссель 4 в виде специальным образом

сконструированного щелевого диффузора, в заднюю стенку которого соосно камере энергетического разделения устанавливается трубка ввода дополнительных масс газа 5. Сжатый газ, пройдя закручивающее устройство 2, поступает в виде интенсивно закрученного потока в камеру энергоразделения 1 и перемещается в направлении дросселя. Через трубку 5 в приосевую зону вводится дополнительный поток, движущийся от дросселя к диафрагме 3. Таким образом, в камере энергоразделения перемещаются два закрученных потока, у которых осевая компонента скорости имеет противоположную ориентацию. Между ними осуществляется энергообмен.

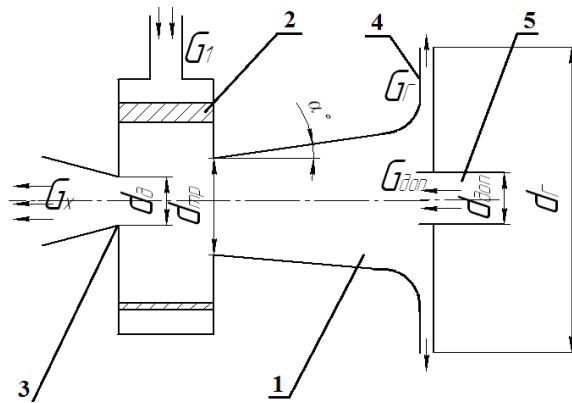


Рис. 1. Схема двухконтурного энергоразделителя

С использованием программного пакета UniGraphics построены трёхмерные модели исследуемой схемы вихревого энергоразделителя. Геометрия вихревой трубы с дополнительным потоком выбрана с целью сопоставления результатов расчёта с ранее проведёнными исследованиями [2, 3]: диаметр трубы 30 мм, угол конусности камеры энергоразделения 3° , относительная длина камеры энергоразделения 3,9 калибров, относительный радиус отверстия диафрагмы 0,7, относительный диаметр трубки дополнительного потока 0,7, относительная площадь соплового ввода 0,05.

На базе 3D-моделей расчётной области осуществлялась дискретизация (генерация сетки) с помощью пакета ANSYS ICEM CFD. Генерация сетки осуществле-

на в декартовых координатах. Сетка структурированная, гексагональная, сгущённая к стенке, минимальный размер ячейки в пристеночной области 0,1 мм, общее число ячеек 1,2 млн. для трёхкалибровой трубы и около 2,5 млн. – для девятикалибровой.

Численное моделирование и расчёт характеристик течения, а также полей термогазодинамических параметров в объёме камеры энергоразделения вихревой трубы был выполнен на коммерческом пакете ANSYS CFX. При этом математическая модель предполагала, что течение описывается системой трёхмерных уравнений Навье – Стокса, уравнениями энергии и состояния. Турбулентная вязкость определялась на начальном этапе расчётов $k - \epsilon$ моделью, которая впоследствии была заменена на SST модель (совмещённая $k - \epsilon$ и $k - \omega$ модель). Причём, такая замена привела к более точному совпадению результатов численного расчёта с результатами экспериментальных исследований. Нестационарная задача решалась методом установления стационарных турбулентных течений.

Исходная математическая модель описания процессов, протекающих в вихревой трубе, состояла из уравнений:

- сохранения массы

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (rU_j) = 0;$$

- сохранения импульса

$$\frac{\partial}{\partial t} (rU_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (rU_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} + r f_i;$$

- сохранения энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (rH) + \frac{\partial}{\partial x_j} (rU_j H) = \\ = \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j t_{ij} + Q_j) + r U_j f_j; \end{aligned}$$

- состояния $Pu = RT$.

Система замыкается $k - \epsilon$ моделью турбулентности:

$$\frac{\partial}{\partial t} (rk) + \frac{\partial}{\partial x_j} (rU_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - re,$$

где

$$P_k = m_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(rk + m_t \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_k}{\partial x_k}$$

– генерация турбулентной кинетической энергии; $\Gamma_k = m + \frac{m_t}{S_k}$ – коэффициент диффузии.

Постановка задачи завершается заданием краевых и начальных условий в виде условий адиабатности и прилипания.

На входе в вихревую трубу известными считались: полное давление основного и дополнительного потоков $P_1^* = 0.4...0.6 \text{ МПа}$, $P_{дон}^* = 0.12...0.25 \text{ МПа}$ и температура $T_1^* = T_{дон}^* = 298 \text{ К}$, на выхо-

дах – статическое давление. Шаг по времени составил $10^{-5} - 10^{-6}$ с. Был проведён ряд расчётов для различных начальных условий, изменялась геометрия соплового ввода (одно- или трёхзаходное закручивающее устройство с внутренней частью, выполненной по спирали Архимеда). Сходимость задачи по массе для всех вариантов расчёта была $10^{-6} - 10^{-7}$ кг.

Верификация численной модели осуществлялась с экспериментальными данными [2] при сопоставлении распределения осевой и окружной компоненты скорости (рис 2). Совпадение результатов численного моделирования с экспериментальными данными лежит в пределах 10%.

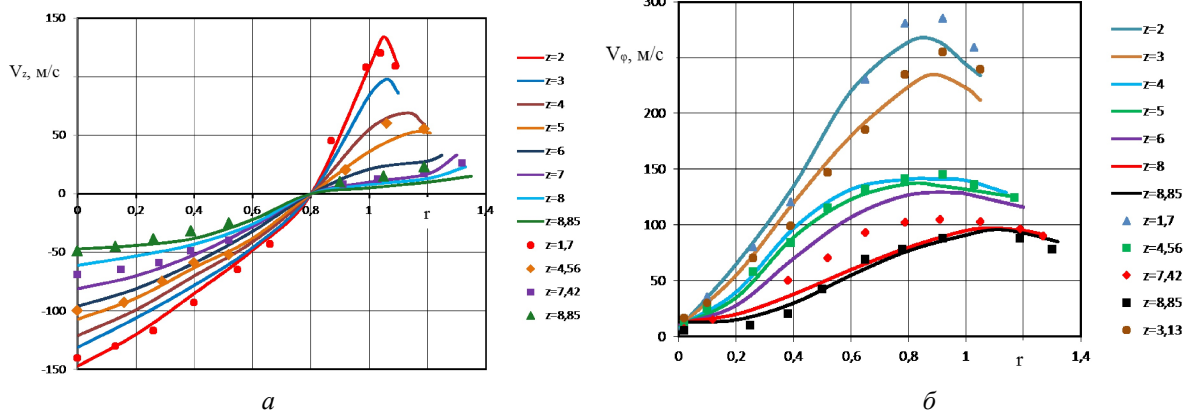
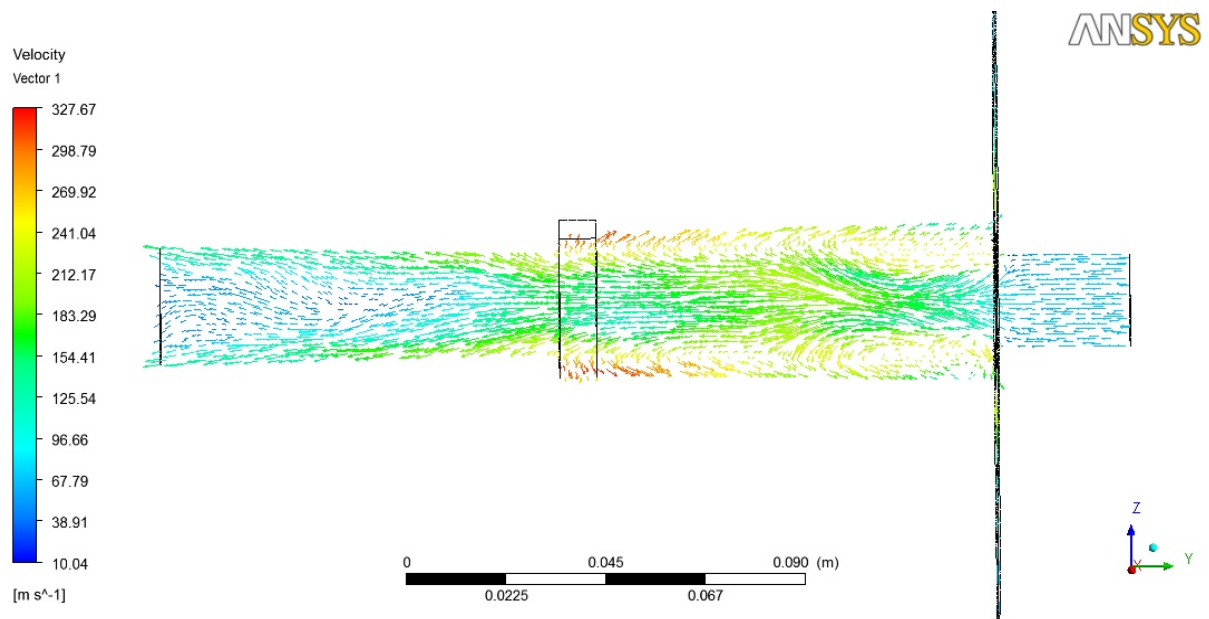
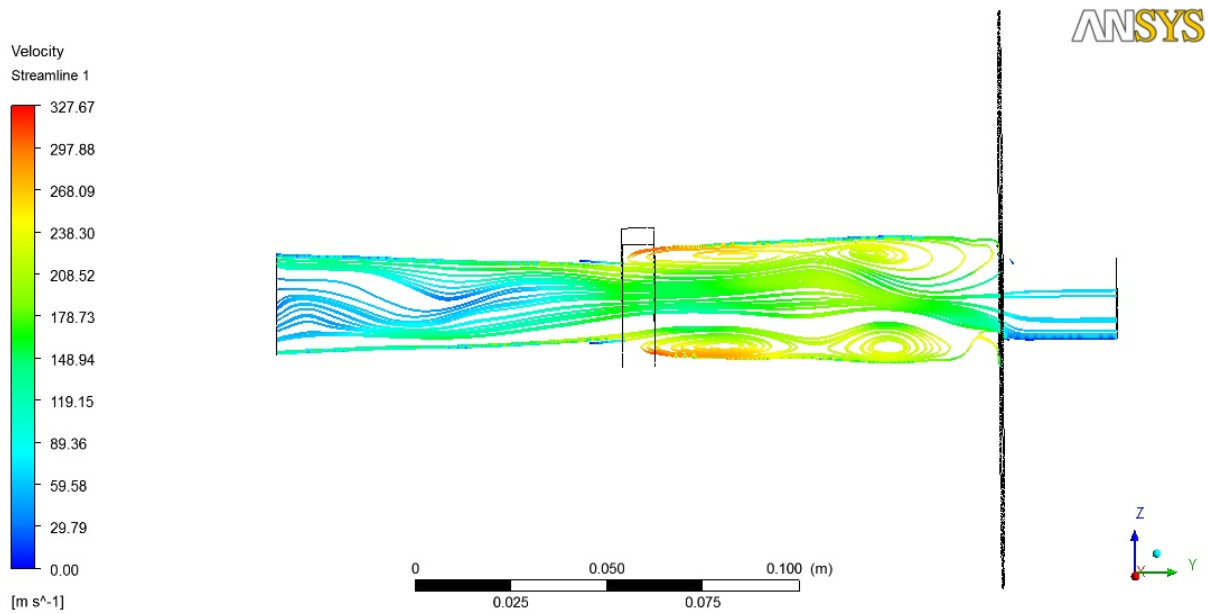


Рис. 2. Сравнение результатов численных расчётов с экспериментом:
 а - распределение осевой компоненты скорости;
 б - распределение окружной компоненты скорости

Были исследованы трубы трёх и девяти калибров. Следует отметить, что с увеличением длины камеры энергоразделения возрастает давление в трубке ввода дополнительного потока, обеспечивающее заданную величину μ , что также согласуется с результатами представленных экспериментальных данных [2, 3].

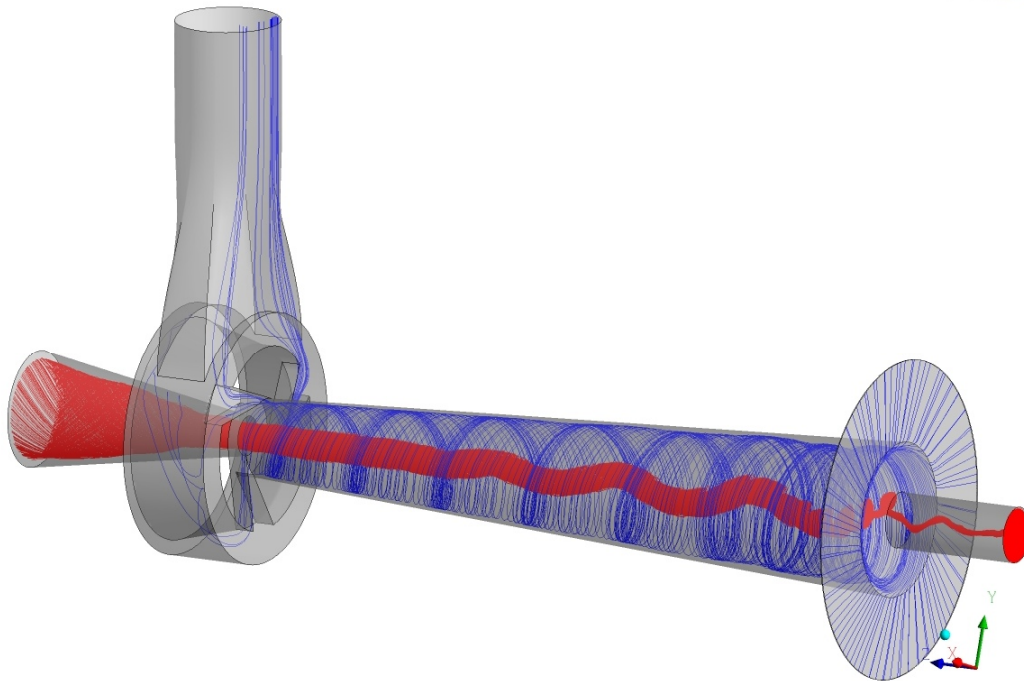
Как и следовало ожидать, в результате визуализации картины течения в камере энергоразделения двухконтурной

вихревой трубы наблюдается два закрученных потока, перемещающихся навстречу друг другу (рис. 3). Периферийный вихрь движется от соплового ввода к дросселю, а приосевой – в обратном направлении. Их энергетическое и газодинамическое взаимодействие составляет основу физической модели описания процесса энергоразделения, известной как гипотеза взаимодействия вихрей.

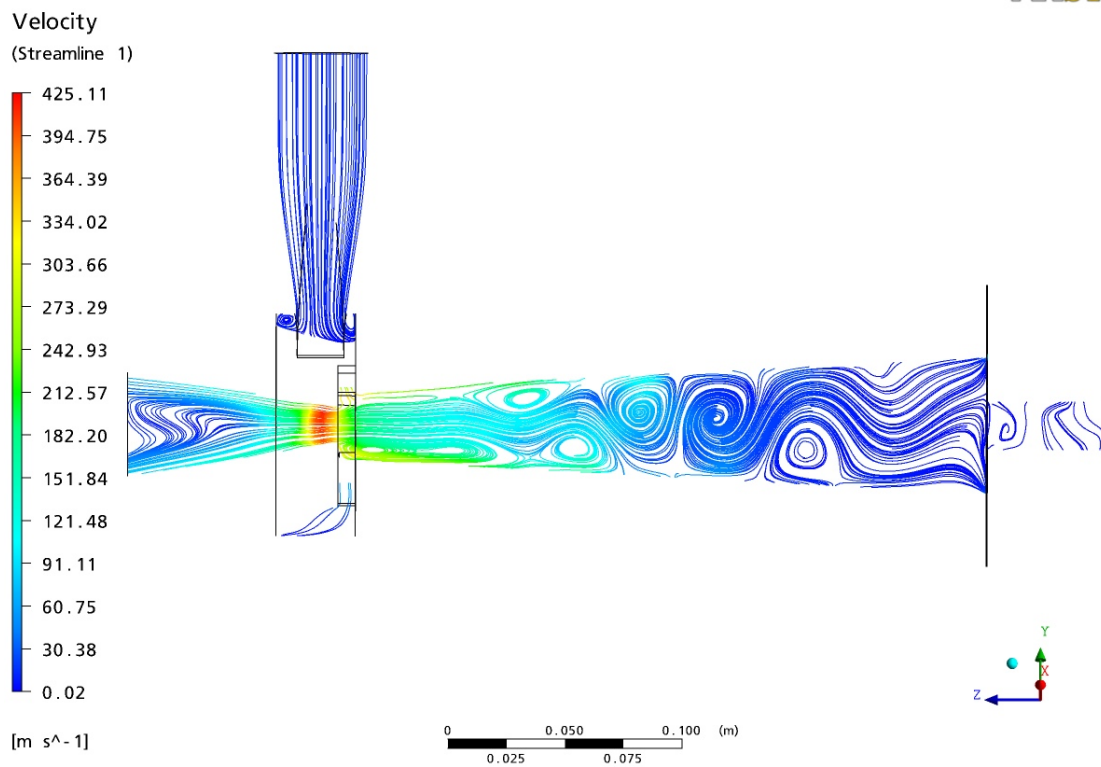


a

ANSYS



ANSYS



б

Рис. 3. Визуализация течения в камере энергоразделения:
 а - длина 3 калибра, однозаходное закручивающее устройство;
 б - длина 9 калибров, трехзаходное закручивающее устройство

Достаточно чётко прослеживается граница раздела потоков, находящаяся на радиусе разделения вихрей, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными [1, 2]. Величина радиуса вдоль осевой координаты остается неизменной $r_2 = \text{const}$. При интенсивности крутки, характерной для вихревых труб, он практически равен $r_2 = 0.8r_1$, а это также совпадает с результатами теоретических расчётов и экспериментальных исследований [1 – 3]. Радиус дислокации по мере приближения к дросселю несколько возрастает. В вынужденном вихре $r < r_2$ зависимость осевой составляющей скорости от сечения к сечению остается неизменной, сохраняя максимум на оси и равенство нулю на радиусе разделения вихрей $r = r_2$. Осевая составляющая в свободном потенциальном вихре $r_2 \leq r \leq 1$ изменяется от нуля на радиусе разделения вихрей через $V_{z\text{max}}$ до нуля на стенке камеры энергетического разделения $r = r_1 * V_{z\text{max}}$, уменьшаясь от сечения к сечению по мере приближения к дросселю.

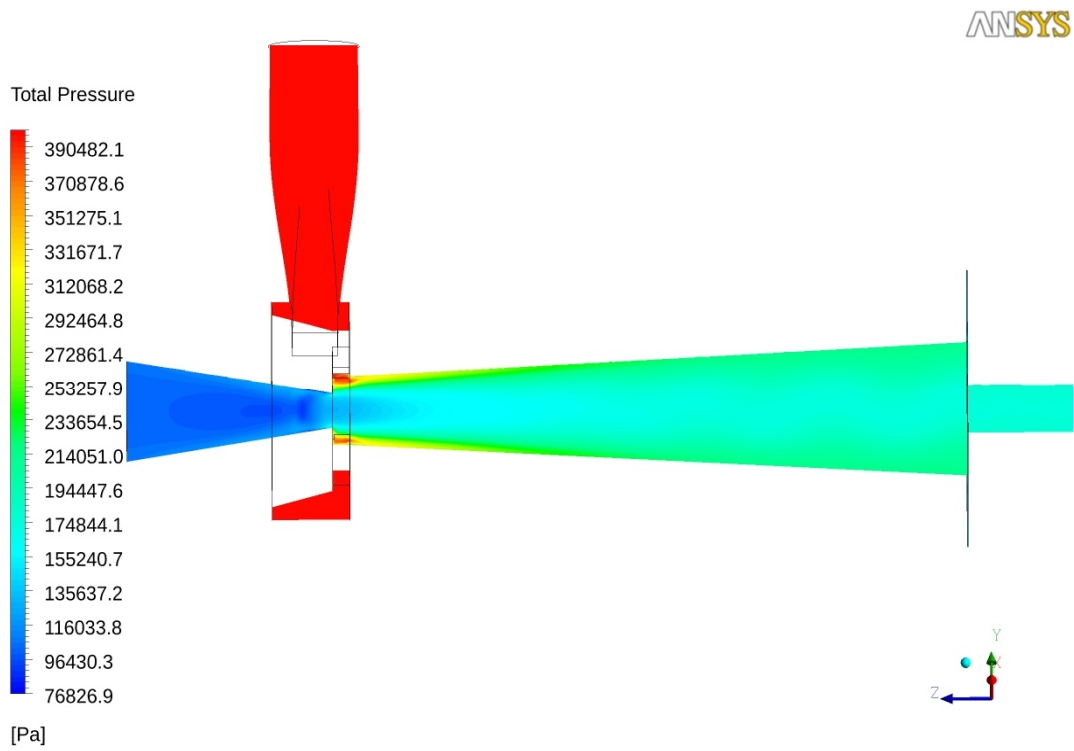
Окружная компонента скорости заметно превосходит осевую, причём если осевая составляющая скорости периферийного вихря по мере удаления вдоль камеры энергоразделения от соплового ввода к дросселю изменяется незначительно, то затухание вращательного движения более существенно, что приводит к росту шага винтовых линий. Этот факт использован в гипотезе взаимодействия вихрей. Именно поэтому радиальный градиент давления от соплового сечения к дросселю падает, а статическое давление на оси растёт, вызывая появление осевого градиента давления, направленного от дросселя к оси диафрагмы.

Существенно неравномерным по сечению и вдоль оси камеры энергетическо-

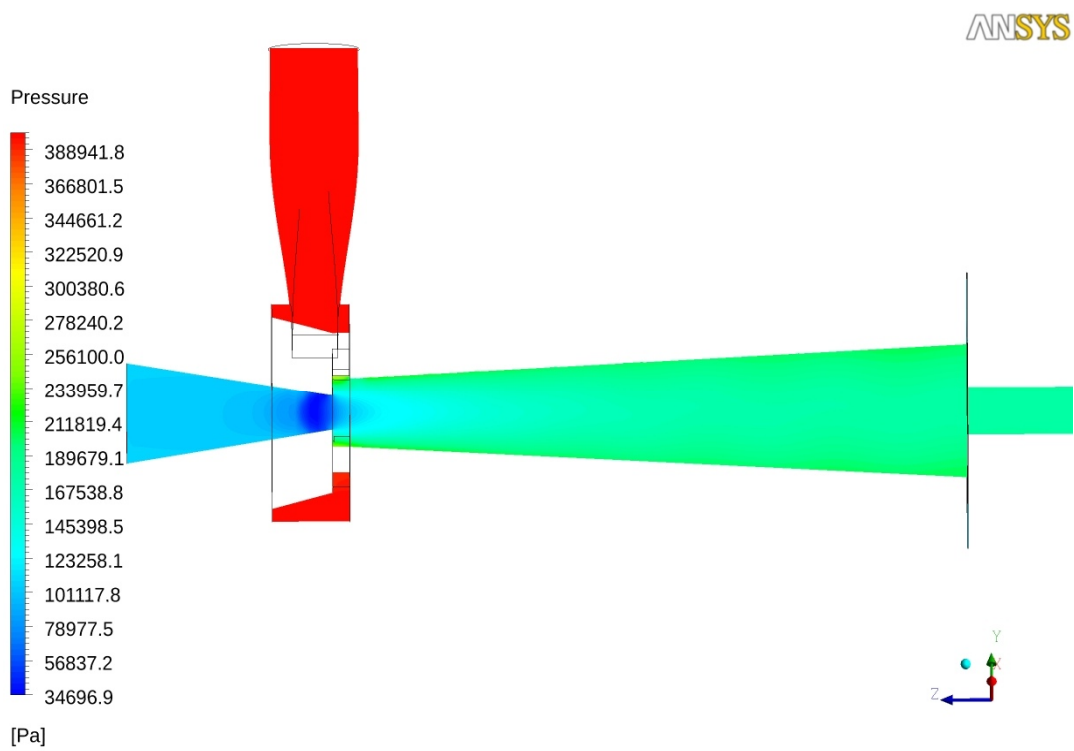
го разделения оказывается распределение термодинамических параметров. Статическое и полное давления непрерывно возрастают по мере удаления от оси камеры энергетического разделения. Вдоль оси от сечения соплового ввода к дросселю уровень давления непрерывно падает, снижается и уровень скоростей. Это приводит практически к равномерному распределению давления по сечению и к близким значениям статического и полного давлений на «горячем» конце трубы (рис.4). Радиальные градиенты статического давления и полной температуры снижаются от соплового сечения к сечению дросселя.

Проведённое исследование позволило рассчитать картину течения в камере энергоразделения вихревой трубы с дополнительным потоком и получить поля распределения термогазодинамических параметров по её объёму. Численными методами показано наличие двух перемещающихся в противоположных осевых направлениях вихрей: периферийного – подогретого, имеющего более высокую энтальпию по сравнению с исходной, и приосевого, энтальпия торможения которого заметно ниже. Результаты расчётов подтверждают генерацию крупномасштабных вихревых структур сдвигового характера, сливающихся в вихревой жгут, перемещающийся от соплового ввода к дросселю. Структура течения в области отверстия диафрагмы показывает на генерацию вторичного течения в виде рециркулирующего приосевого вихря.

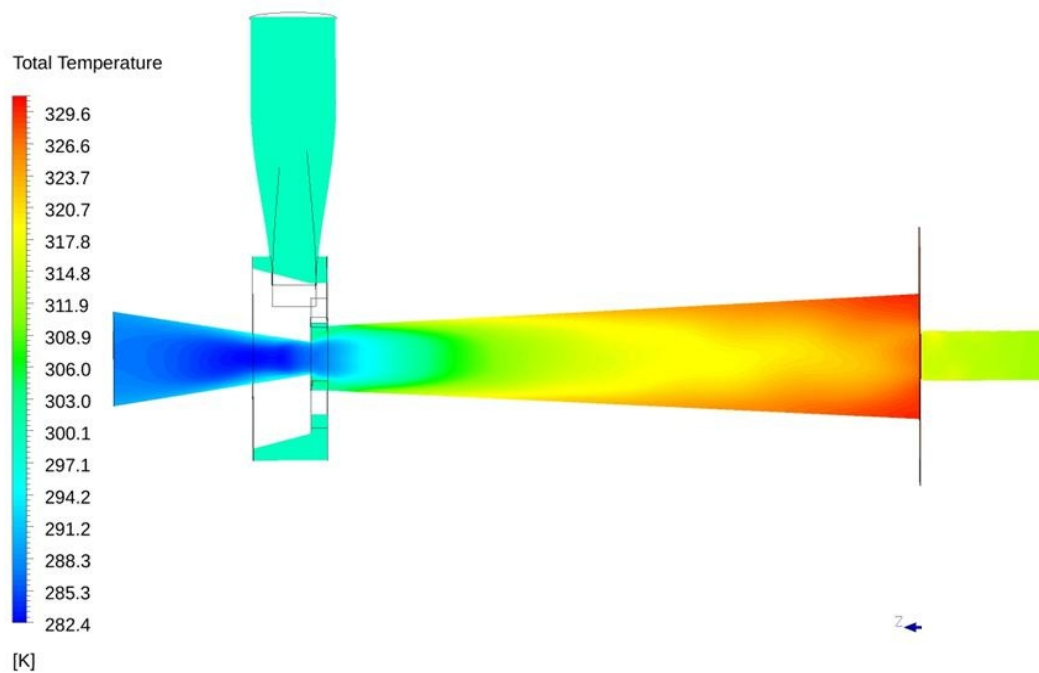
Полученные численным расчётом результаты хорошо коррелируют с опытными данными [1-3] и могут быть использованы для уточнения физической модели и методики расчёта характеристик вихревых труб.



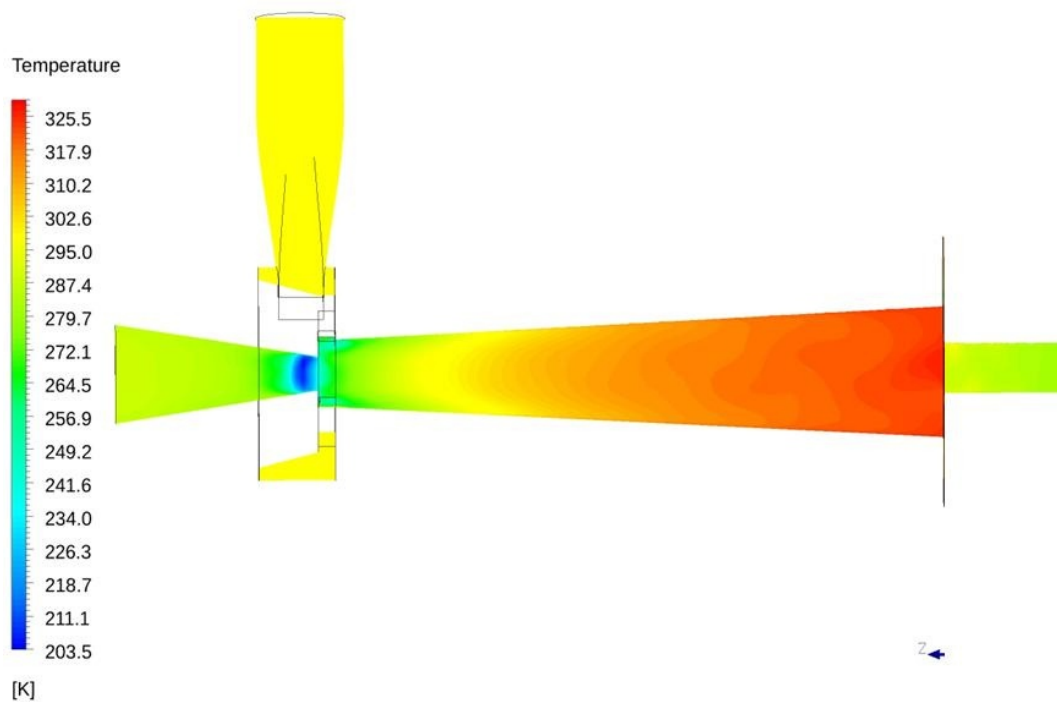
a



b



б



г

Рис.4. Распределение термодинамических параметров в камере энергоразделения девятикалибровой трубы:
а - полное давление; б - статическое давление;
в - полная температура; г - статическая температура

Библиографический список

1. Пиралишвили, Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев; под ред. А. И. Леонтьева. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.

2. Пиралишвили, Ш. А. Развитие теории, разработка и внедрение методов расчёта вихревых энергоделителей с целью создания эффективных техниче-

ских устройств [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Ш. А. Пиралишвили. – Рыбинск: РАТИ, 1990. – 384 с.

3. Пиралишвили, Ш. А. Экспериментальные исследования вихревой трубы с дополнительным потоком [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, В. Г. Михайлов // Некоторые вопросы исследования теплообмена и тепловых машин. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – С. 64 – 74.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE WORKING PROCESS
IN A VORTEX TUBE WITH AN ADDITIONAL STREAM**

© 2013 O. V. Vasilyuk, Sh. A. Piralishvili, A. A. Shaykina

Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov

The paper presents a numerical solution of full Navier-Stokes equations for an intensively swirling flow in an axisymmetric channel disc-loaded in the input cross-section and supplied with a throttle of the peripheral slot type at the opposite end of the channel with a central hole for feeding additional masses of gas. The flow patterns, thermodynamic parameter distribution fields are obtained. The results of numerical computation are compared to the experimental data for vortex tubes with an additional stream. Formation of large-scale vortex structures is noted. The results of numerical calculation and computer visualization can be used to further refine the physical model and methodology for calculating characteristics of vortex tubes.

Numerical simulation, vortex tube with an additional stream, temperature stratification.

Информация об авторах

Василюк Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры общей и технической физики, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. E-mail: kazanch_3004@mail.ru. Область научных интересов: эффект энергоразделения; процессы смесеобразования; энергосбережение.

Пиралишвили Шота Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и технической физики, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. E-mail: piral@list.ru. Область научных интересов: вихревой эффект; процессы горения; энергосбережение; теплообмен.

Шайкина Анастасия Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры общей и технической физики, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. E-mail: ana_fuz@rambler.ru. Область научных интересов: вихревой эффект; теплообмен; энергосбережение.

Vasilyuk Olga Vladimirovna, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of General and Technical Physics, Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov. E-mail: kazanch_3004@mail.ru. Area of research: effect of energy separation, processes of mixing, energy efficiency.

Piralishvili Shota Alexandrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor; Head of the Department of General and Technical Physics, Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov. E-mail: piral@list.ru. Area of research: vortex effect, processes of burning, energy efficiency, heat and mass exchange.

Shaykina Anatasia Alexandrovna, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of General and Technical Physics, Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov. E-mail: ana_fuz@rambler.ru. Area of research: vortex effect, heat and mass exchange, energy efficiency, numerical simulation.