

УДК 621.6:533

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ВИХРЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ

Ю. М. АХМЕТОВ¹, Э. И. ЗАНГИРОВ²

¹37@bk.ru, ²zangirov.ernest@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 06.06. 16

Аннотация. В рамках проведенных исследований течения газа в вихревых устройствах отражено наличие и характер протекания крупномасштабных вихревых структур. Выдвинуто предположение о влиянии обнаруженных структур на процесс квазиизотермического дросселирования.

Ключевые слова: вихревая труба, квазиизотермический вихревой регулятор давления, смешение стратифицированных потоков, квазиизотермическое дросселирование.

ВВЕДЕНИЕ

Явление снижения температуры при дросселировании газа с закруткой потока в центральных слоях при одновременном значительном росте температуры периферийных слоев было впервые обнаружено австрийским инженером Ж. Ранком в 1931 г. Всестороннее изучение этого явления было начато после того, как в 1946 году французский физик Р. Хильш опубликовал результаты исследования вихревой трубы, реализующей процессы температурного и массового разделения газового потока. Это явление получило название «вихревой эффект» или «эффект Ранка–Хильша», а устройства, его реализующие, «вихревые устройства» [1].

В настоящее время номенклатурный ряд вихревых устройств существенно расширен. Так, помимо процессов температурно-массовой стратификации, вихревые устройства применяются для реализации процессов компонентного разделения рабочего тела, эжекции, горения и т.д. Относительно новым направлением является реализация процесса квазиизотермического дросселирования давления газа, суть которого заключается в организации эффективного перемешивания стратифицированных потоков газа таким образом, чтобы температура результирующего потока была больше или равна температуре исходного газа (рис. 1) [2, 3].

Впервые процесс квазиизотермического дросселирования газа был реализован в 2000–2002 гг. сотрудниками ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический

университет» (кафедра прикладной гидромеханики, под научным руководством д. т. н., профессора Русака А. М.) и ОАО «Научно-исследовательский институт технологии» (инжиниринговый центр (ИЦ), под научным руководством к. т. н., доцента Ахметова Ю. М.) при выполнении договора на разработку изометрического регулятора давления с ООО «Баштрансгаз» (договор №479 от 2000 г.).

Применение процесса квазиизотермического дросселирования в газовой отрасли позволит снизить затраты на транспортировку природного газа за счет отказа от необходимости сжигания части транспортируемого газа для компенсации потери температуры, вызванной проявлением эффекта Джоуля–Томсона, и упрощения комплекса оборудования, необходимого для безаварийной работы газораспределительной станции.

Проведенные лабораторные исследования разработанных вихревых устройств, реализующих процесс квазиизотермического дросселирования газа, продемонстрировали их работоспособность на низких и средних давлениях, однако, с повышением входного давления, было обнаружено снижение эффективности подогрева газа. Таким образом, актуальность данной работы заключается в необходимости исследования процесса энергетического и массового разделения газа в вихревых устройствах квазиизотермического дросселирования с целью определения возможных способов расширения диапазона его реализации.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальный образец квазиизотермического вихревого регулятора давления (КВРД) представляет собой модифицированную вихревую трубу с подогревом входящего газа перед сопловым регулируемым вводом за счет теплообмена с «горячим» стратифицированным потоком газа через теплопроводные головку и стенки камеры энергетического разделения, и последующим внутренним смешением стратифицированных потоков с односторонним прямоточным выходом (рис. 2). Такой характер теплообмена между входным и «горячим» стратифицированными потоками представляет собой эффект положительной обратной связи и подогрев газа за регулятором при определенных соотношениях

стратифицированных потоков. Как видно из рис. 2, эффект положительной обратной связи может изменяться за счет введения дополнительных каналов перепуска «горячего» газа, обеспечивающих дополнительный подогрев входного газа через теплопроводные стенки.

Расчет основных параметров КВРД выполнялся в соответствии с методикой расчета геометрических и термодинамических параметров вихревых устройств с учетом внутреннего перемешивания стратифицированных потоков и теплообмена между ними (рис. 3), а также с учетом рекомендаций по расчетам вихревых труб, изложенных в работах отечественного основоположника исследований вихревых труб профессора Меркулова А. П. [4].

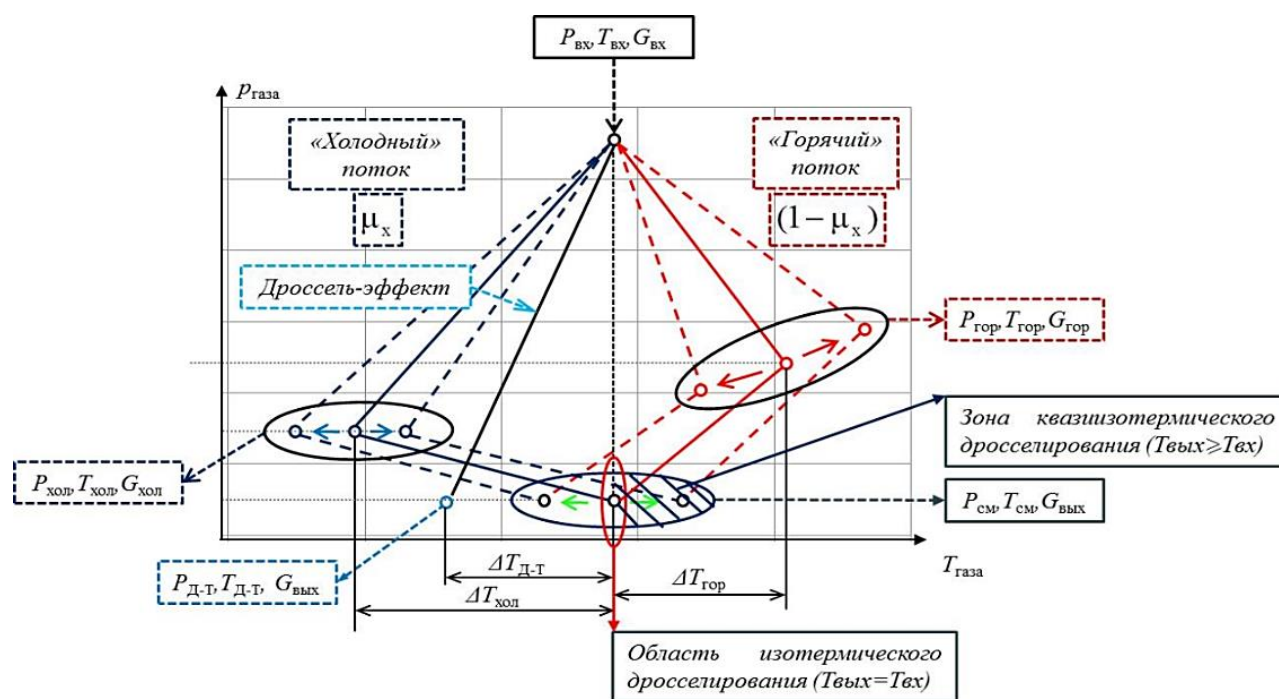


Рис. 1. Принципиальное сравнительное представление в P - T координатах процесса дросселирования давления газа при протекании газа через гидросопротивление (дроссель эффект Джоуля–Томсона) и процесса дросселирования в вихревой трубе (ВТ) с последующим смешением стратифицированных потоков (квазиизотермическое дросселирование):

- $P_{вх}, T_{вх}, G_{вх}$ – давление, температура, расход газа на входе в ВТ;
- $(1-\mu_x)$ – весовая доля горячего потока газа в ВТ;
- $P_{холь}, T_{холь}, G_{холь}$ – давление, температура, расход газа на холодном плече ВТ;
- $P_{гор}, T_{гор}, G_{гор}$ – давление, температура, расход газа на горячем плече ВТ;
- $P_{см}, T_{см}, G_{см}$ – давление, температура, расход «смешенного» потока газа;
- $P_{Д-Т}, T_{Д-Т}, G_{вых}$ – давление, температура, расход газа согласно эффекту Джоуля–Томсона;
- $\Delta T_{Д-Т}$ – захлаждение газа при дросселировании согласно эффекту Джоуля–Томсона;
- $\Delta T_{холь}$ – захлаждение газа на холодном плече ВТ;
- $\Delta T_{гор}$ – подогрев газа на горячем плече ВТ

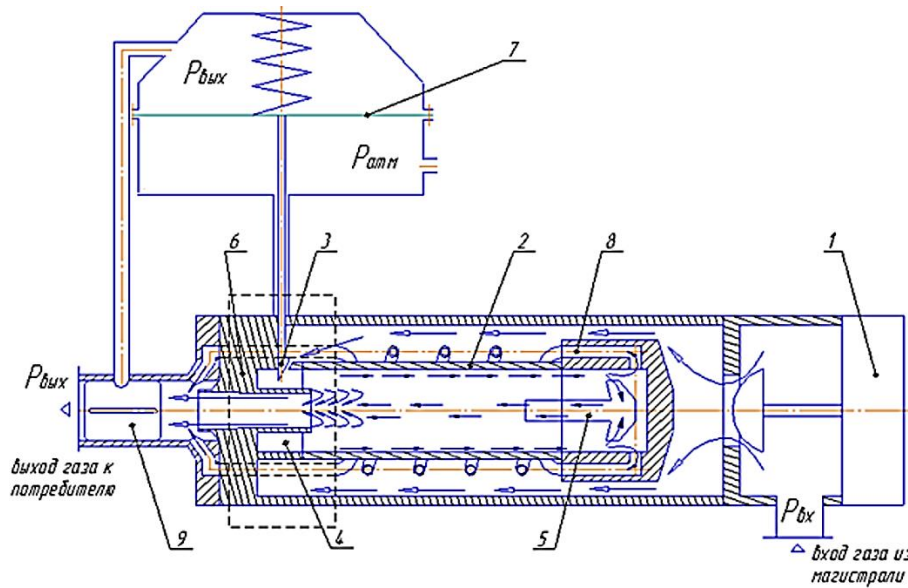


Рис. 2. Схема КВРД:

1 – отсекатель подвода газа; 2 – камера энергетического разделения; 3 – сопловой регулируемый ввод (управляющий клин); 4 – закручивающее устройство (улитка); 5 – крестовина; 6 – диафрагма; 7 – мембрана; 8 – каналы перепуска; 9 – эжекторный смеситель

Геометрические параметры проточной части квазиизотермического вихревого регулятора давления газа рассчитывались таким образом, чтобы входной поток газа после прохождения закручивающего устройства делился на две составляющие: часть газа, попадающая сразу на выход КВРД через мембрану (как правило, 10–15% от потока газа, поступающего на вход в КВРД), и основной закрученный поток, продолжающий движение по камере энергетического разделения в направлении тормозного устройства. При достижении газом каналов перепуска происходит дополнительное разделение газа на перепускаемый поток и развернутый поток газа, продолжающий движение в направлении диафрагмы. Далее, на выходе из диафрагмы, в области эжекторного смесителя происходит перемешивание стратифицированных потоков.

Таким образом, уравнение баланса расхода газа по тракту КВРД имеет следующий вид:

$$G_1 = G_2 + G_4 + G_5; \quad (1)$$

$$G_3 = G_4 + G_5, \quad (2)$$

где G_1 – расход газа на входе, G_2 – расход газа, попадающего сразу на выход КВРД после истечения из закручивающего устройства, G_3 – расход основного закрученного потока газа, движущегося по камере энергетического разделения, G_4 – расход газа, перепускаемого через каналы перепуска, G_5 – расход газа, развернутого в направлении диафрагмы.



Рис. 3. Структурная схема построения твердотельной модели и алгоритма расчета параметров газа по тракту КВРД

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования процессов тепломассобмена, протекающих в сложных вихревых турбулентных течениях газового потока, применялся метод математического моделирования, суть которого состоит в замене исходного объекта его образом – математической моделью и последующим изучением с помощью реализуемых на компьютерах вычислительно–логических алгоритмов, которые позволяют определить наличие и интенсивность процессов стратификации [5].

В рамках данного исследования использовался универсальный вычислительный CFD–пакет *SolidWorks* – пакет *Flow Simulation*, который выделяется удобством использования и возможностью графоаналитического анализа результатов и наглядной визуализации газодинамических процессов.

При математическом описании процессов протекающих в вихревых устройствах в квазистационарной постановке используется метод конечных объемов. Данный метод основан на численном методе интегрирования системы дифференциальных уравнений в частных производных, которая состоит из следующих уравнений:

1. Уравнение движения

Общепринятым методом моделирования движения газа является решение уравнений Навье–Стокса осредненных по времени (уравнения Рейнольдса) [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \bar{S}_{ij}) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j'), \end{aligned} \quad (3)$$

где знак осреднения « $\bar{}$ » означает рейнольдсово осреднение по времени; x, y, z – декартовы координаты; u – абсолютная компонента скорости жидкости; p – пьезометрическое давление, $p = p_s - \rho_0 \cdot g \cdot x_m$, где p_s – статическое давление, ρ_0 – относительная плотность, g – ускорение свободного падения, x_m – высота относительно уровня, на котором определено ρ_0 ; ρ – плотность.

При таком преобразовании происходит переход от истинной картины к рассмотрению осредненного турбулентного течения, т.е. замена принципиально неустановившегося движения на квазиустановившееся.

Для того чтобы замкнуть систему уравнений (3), необходимо использовать полуэмпирические соотношения, связывающие эти напряжения с осредненными по времени компонентами скорости u, v, ω , которые предусмотрены в программном пакете *Flow Simulation*.

2. Уравнение неразрывности

Уравнение неразрывности для установившегося потока вязкой сжимаемой жидкости в дифференциальной форме имеет следующий вид [6]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

После осреднения методом Рейнольдса уравнение (4) выглядит так:

$$\frac{\partial(\rho \cdot U_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (5)$$

3. Уравнение состояния

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

Из известных уравнений, описывающих состояние реального газа, можно выделить модель Редлиха–Квонга [7]. Эта модель состояния была выбрана как наиболее общепотребимая для широкого диапазона изменения параметров состояния газа [8].

Уравнение состояния Редлиха–Квонга выглядит следующим образом:

$$p = \frac{R \cdot T}{v - b} - \frac{a}{(v + b) \cdot v \cdot \sqrt{T}}; \quad (6)$$

$$a = \frac{0.42748 \cdot R^2 \cdot T_{кр}^{2.5}}{P_{кр}}; \quad (7)$$

$$b = \frac{0.08662 \cdot R \cdot T_{кр}}{P_{кр}}, \quad (8)$$

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

4. Модель турбулентности

В настоящее время существует большое количество разновидностей двухпараметрических моделей турбулентности, подразделяемые на три подгруппы: $k-\omega$, $k-l$, $k-\varepsilon$.

Наиболее простые модели турбулентности, используемые в расчетной практике, основаны на эмпирических соотношениях для коэффициента турбулентной вязкости μ_t ($k-\varepsilon$) или для модели турбулентности Прандтля о длине пути смешения ($k-l$).

В простейшем случае считают, что турбулентные напряжения трения связаны со свойствами осредненного течения такой же зависимостью, какой обычное молекулярное вязкое трение связано с полем скоростей (гипотеза Бусинеска). Модель Прандтля рассматривает движение частиц жидкости при турбулентном течении подобным движению молекул газа.

Таким образом, моделирование турбулентных потоков сводится к подбору эмпирических выражений для связи турбулентной вязкости с осредненными параметрами течения. В данном случае, как правило, решается только одно дифференциальное уравнение переноса.

Как показывает анализ работ [7, 9], для описания вихревых процессов, организованных течением высоконапорных газовых потоков со строго ориентированной геометрией каналов тангенциальным направлением напорного потока наиболее приемлемо применение квазистационарной $k-\varepsilon$ модели турбулентности, состоящей из уравнений:

4.1. Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0. \quad (9)$$

4.2. Уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j \right). \quad (10)$$

4.3. Уравнение для кинетической энергии турбулентных пульсаций k :

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial \tau} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \\ + \left[\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом турбулентную вязкость μ_t можно представить в виде скаляра, величина которого определяется выражением:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (12)$$

где C_μ – эмпирический коэффициент, равный, в рамках данного исследования:

$$C_\mu = 0,09 \cdot \exp \left[\frac{-3,4}{\left(1 + \frac{\text{Re}_t}{50}\right)^2} \right], \quad (13)$$

$$\text{Re}_t = \frac{k^2}{\nu \cdot \varepsilon}. \quad (14)$$

4.4. Уравнение скорости диссипации энергии ε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \\ + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \\ - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 3} \nu \mu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_j} \right)^2, \end{aligned} \quad (15)$$

где $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$, σ_ε , σ_k – эмпирические коэффициенты, δ_{ij} – символ Кронекера. Численные значения коэффициентов приняты согласно рекомендациям [7]:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad (16)$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,92 \cdot (1 - 0,3 \cdot \exp(-\text{Re}_t^2)), \quad (17)$$

$$C_{\varepsilon 3} = 2, \quad (18)$$

$$\sigma_k = 1, \quad (19)$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,3. \quad (20)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Верификация результатов численного моделирования, выполненного по описанной математической модели, и экспериментального исследования показала, что максимальная погрешность расчетов не превышает 8% с по температурным среднемазовым показателям входных и выходных параметров [10].

Применение средств визуализации программной среды *Flow Simulation* позволило выявить зоны закрутки потока газа, разделить их на периферийную крупномасштабную вихревую структуру (ПКВС) и центральную крупномасштабную вихревую структуру (ЦКВС), а их последующий анализ – определить геометрические параметры и отобразить их конфигурацию в пространстве в соответствии с гипотезой взаимодействия вихрей и выделением в цветовой гамме изоповерхностей осевых (для ПКВС) и тангенциальных (для ЦКВС) скоростей движения структур [11].

ЦКВС была показана путем отображения проекций линий тока на плоскость, перпендикулярную оси камеры энергетического разделения (рис. 4). При этом все частицы газа перемещаются по спиралевидной траектории, относительно общей оси вращения, и имеют разнонаправленную осевую скорость (рис. 5), т.е. движутся в разном направлении относительно оси камеры энергетического разделения.

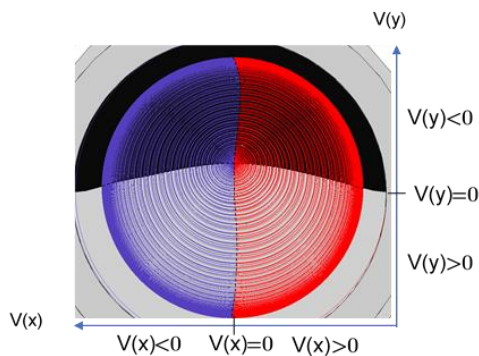


Рис. 4. Определение центра ЦКВС

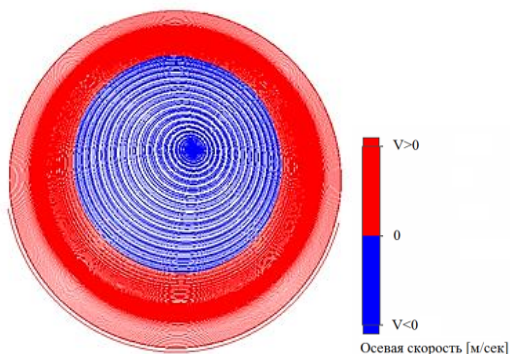


Рис. 5. Определение границы ЦКВС

Проекция линий тока на плоскость, проходящую вдоль камеры энергетического разделения, позволила визуализировать ПКВС как газовую структуру, имеющую ось вращения масс (рис. 6). Частицы газа движутся вокруг оси с переменной скоростью также по спирали, имеющей максимум и затухающей при удалении от оси (рис. 7). Необходимо отметить, что на картинах поперечных сечений для обеих структур наблюдаются зоны с пропорциональной зависимостью окружной скорости от радиуса, т.е.:

$$U_i = K_i \cdot R_i, \quad (21)$$

где U_i и R_i соответственно тангенциальная скорость и радиус размещения расчетной точки, а K_i – постоянный коэффициент для указанной зоны до R_{ikk} , после которой K_i изменяется.

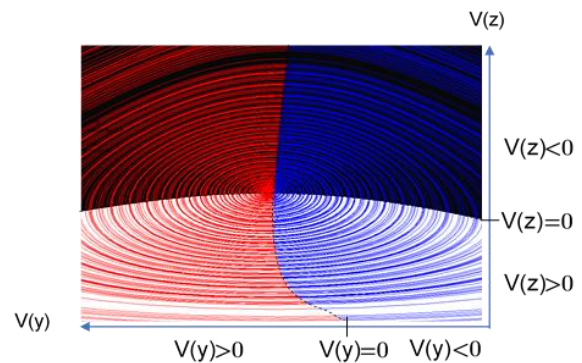


Рис. 6. Определение центра ПКВС

Наличие в потоке газа ПКВС и ЦКВС образует сложную систему теплообмена благодаря взаимодействию периферийных слоев данных структур (рис. 8), что и может вызывать энергообмен и температурную стратификацию газа на горячий и холодный («вихревой эффект») (рис. 9).

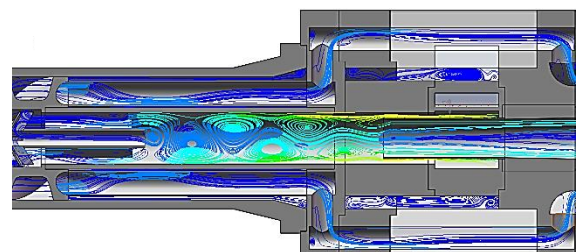


Рис. 7. Визуализация ПКВС и ЦКВС

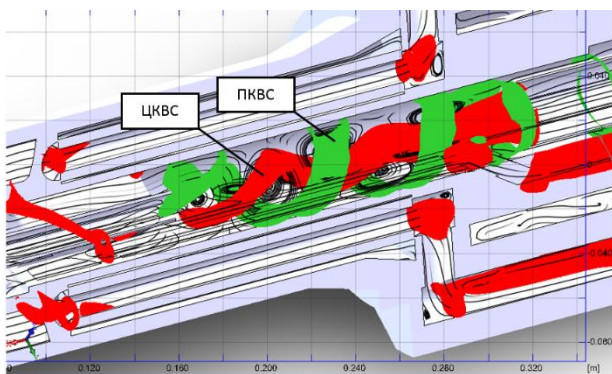


Рис. 8. Пространственная конфигурация крупномасштабных вихревых структур

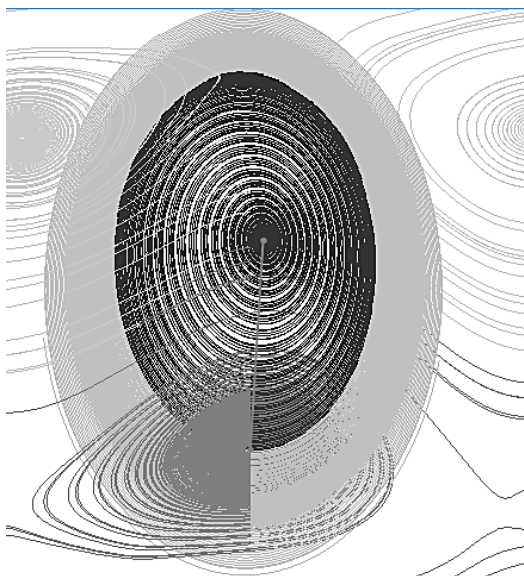


Рис. 9. Визуализация взаимодействия ПКВС и ЦКВС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные материалы показывают, что, согласно результатам численного моделирования, выявленные вихревые структуры, центральная и периферийная, являются последовательным соединением газового потока с внутренним прохождением одного вихря в другом. В результате взаимодействия этих двух структур происходит теплопередача, которая при определенных соотношениях расходов при стратификации может реализовывать квазиизотермические процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ranque G. J.** Method and Apparatus for Obtaining from Fluid under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperatures. US Patent 1, 952281, 1934.
2. **Ахметов Ю. М., Зангиров Э. И.** Анализ процессов стратификации закрученных потоков и классификация устройств, их реализующих // Справочник. Инженерный журнал. 2016. №2, С 55–63. [Akhmetov Yu. M., Zangirov E. I.

The analysis of the processes of stratification swirling flows and classification of devices that implement them // Handbook. Engineering Journal. 2016. №2, 55–63 C]

3. **Ахметов Ю. М., Русак А. М. и др.** Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева // Сборник научных докладов РАН IV Международного совещания по проблемам энергоаккумуляции и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. 2004. С. 133–144. [Akhmetov Y. M., Rusak A. M. et al. The pressure reduction natural gas devices without preheating // Collection of scientific reports of the Russian Academy of Sciences IV International meeting on Program of energoakkumulyatory and environmental engineering, energy and transport. – Moscow: IMASH RAS, 2004, pp. 133–144.].

4. **Меркулов А. П.** Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969 г. 184 с. [A. P. Merkulov. Vortex effect and its application in engineering. M: mechanical engineering, 1969.].

5. **Свистунов А. В.** Методика моделирования квазиизотермического процесса в вихревых устройствах дросселирования давления газов: дис. канд. техн. наук. Уфа, 2012. 134 с. [Svistunov A. V. Modeling Technique quaziizothermic process in the vortex devices throttling pressure gases: the dissertation on competition of a scientific degree Candidate technical Sciences. Ufa, 2012.].

6. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика: в 2 ч.; учеб. пособие для втузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1991. 600 с. [Abramovich, G. N. Applied gas dynamics, Moscow, Izdatel'stvo Nauka. 1991. 600 p.]

7. **Митрофанова О. В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с. [Mitrofanova O.V. Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in channels of nuclear power plants. Sci. Vol. Nauch. izd. 2010. 288 p.]

8. **Вукалович М. П., Новиков И. И.** Термодинамика, М.: Машиностроение, 1972, 672 с. [Vukalovic, M.P., Novikov, I. Thermodynamics. M.: Mechanical engineering. 1972. 672 p.]

9. **Пархимович А. Ю.** Имитационное моделирование температурной стратификации закрученных потоков в вихревых хладогенераторах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфа, 2008. 122 с. [Parhimovich A.Y. Simulation of temperature stratification of swirled flow in the vortex cold generators: the dissertation on competition of a scientific degree Candidate technical Sciences. Ufa, 2018.]

10. **Ахметов Ю. М., Зангиров Э. И. и др.** Анализ параметров смешения стратифицированных потоков в вихревом регуляторе давления газа // Вестник УГАТУ. 2015 Т. 19, №4 (70). С. 8–15. [Y.M. Akhmetov, E.I. Zangirov et al. The analysis of mixing parameters of stratified flows in the vortex gas pressure regulator. Vestnik UGATU, vol. 20, no. 4 (70), pp. 8–15, 2015]

11. **Ахметов Ю. М., Зангиров Э. И. и др.** Визуализация структуры потока газа в вихревой трубе методом численного моделирования // Мавлютовские чтения: все-росс. молодеж. науч. конф.: материалы конф. в 5 т. Том 1. Уфа: УГАТУ, 2014. С. 115–116. [Y.M. Akhmetov, E.I. Zangirov et al. Visualization of the gas flow in the vortex tube structures using numerical simulation method. Mavlyutovskie chteniya. Materials Conf. Volume 1. Ufa . USATU, 2014. pp 115–116]

ОБ АВТОРАХ

Ахметов Юрий Мавлютович, доц. каф. прикл. гидромех., зам. ген. дир. НИИТ. Дипл. инж.–мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1959). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (МАИ, 1978). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

Зангиров Эрнест Ирекович, ассистент каф. ПГМ УГАТУ, асп. каф. прикл. гидромех. (УГАТУ, 2012). Дипл. маг. техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

METADATA

Title: Numerical simulation of gas flow motion in vortex devices.

Authors: Y. M. Akhmetov, E. I. Zangirov

Affiliation:

¹⁻² Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ 37@bk.ru, ² zangirov.ernest@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 2 (72), pp. 66-73, 2016. ISSN 2225–2789 (Online), ISSN 1992–6502 (Print).

Abstract: Within the framework of gas flow conducted research in the vortex control devices reflect the presence and character of the large-scale vortex structures. It is suggested on the impact of the detected structures on quasi-isothermal process throttling.

Key words: vortex tube, vortex quasi-isothermal pressure regulator, mixing of stratified flows, quasi-isothermal throttling.

About authors:

AKHMETOV Yuri Mavlyutovich, associate professor, department of applied hydromechanics. Diploma engineer mech. For aircraft engines (UAI, 1959). Candidate of technical sciences of heat engines (MAI, 1978). Research is in the field of gas-hydraulic flows and control systems of power plants.

ZANGIROV Ernest Irekovich, assistant PGM UGATU, a graduate student of the department of applied hydromechanics (UGATU, 2012), master's degree of engineering and technology for power engineering (USATU, 2011). Research is in the field of gas-hydraulic flows and control systems of power plants.