

УДК 533.17:621.431.75

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ В СТАЦИОНАРНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОСТАНОВКАХ

© 2015 Ш. А. Пиралишвили, О. А. Соколова

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва

Представлены результаты численного моделирования термодинамики закрученного потока при тчении в камере энергоразделения вихревых устройств в стационарной и нестационарной постановках. Результаты расчётов подтвердили наличие прецессионного движения приосевого вихревого жгута, пульсаций скорости, давления и температуры. Их обработка с позиции термодинамики позволила в P, v -диаграмме построить реализуемый крупномасштабными вихревыми структурами обратный цикл, осуществляющий основной энергоперенос от периферийных слоёв к приосевым. Выявлено подмешивание подогретых масс газа к охлаждённому потоку у торцевой поверхности диафрагмы за счёт формирующегося уголкового вихря. Предложено сопловой ввод сделать наклонным в виде скоса, выполненного по лемнискату Бернулли, что привело к улучшению характеристик энергоразделения на 1,5-2,0 %. Численное моделирование течения в вихревом энергоразделителе и исследование нестационарных явлений, имеющих место в ВТДП, показали, что источником крупномасштабных периодических колебаний в вихревой трубе является прецессия вихревого ядра. Различные области потока: зона рециркуляции, вихревое ядро, свободная струя на выходе из щелевого диффузора – являются единичными компонентами одной колебательной системы.

Вихревая труба с дополнительным потоком, энергоразделение, прецессия, приосевой и периферийный вихри.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-151-158

Введение

Вихревой эффект – разделение подводящего через закручивающее устройство сжатого газа на приосевой (с энтальпией меньше, чем у исходного потока) и периферийный (с энтальпией больше) – представляет собой сложный газодинамический процесс. Экспериментальное исследование структуры течения сопряжено с большими трудностями, связанными с нарушением течения из-за установки датчиков; снижением точности измерения, вызванным большими радиальными градиентами и малыми размерами исследуемых моделей. Для возможности визуализации картины течения и оценки термодинамических параметров в последнее время стали широко использоваться численные методы исследования, позволяющие моделировать достаточно сложные процессы стационарного и нестационарного течений.

Наиболее эффективной конструкцией вихревых энергоразделителей по холодопроизводительности и величине адиабатного КПД является вихревая труба с дополнительным потоком (ВТДП) [1]. Количество публикаций и материалов по исследованию ВТДП ограничено. Результаты экспериментов, поставленных на ВТДП, представлены в монографиях [1-3]. Публикации по численному моделированию рабочего процесса ВТДП отсутствуют, поэтому представляет интерес численное исследование макро- и микро-структуры потока в ВТДП с определением интегральных характеристик и возможности улучшения показателей эффективности работы устройства.

Постановка задачи исследования

Численное моделирование и расчёт характеристик течения, а также полей

термогазодинамических параметров в объёме камеры энергоразделения вихревых труб выполнены в коммерческом пакете ANSYS CFX. Математическая модель предполагает, что течение описывается системой трёхмерных уравнений Навье-Стокса, уравнениями энергии и состояния. Турбулентная вязкость определялась SST-моделью (совмещённая k- ω и k- ϵ модели). С использованием программного пакета UniGraphics построены трёхмерные модели вихревых энергоразделителей, на базе которых осуществлялась генерация сетки с помощью универсального сеткопостроителя ICEM CFD. Количество ячеек – 1,5 – 2 млн. Сетки неструктурированные, тетрагональные, максимальный размер ячеек 0,9 мм, со сгущением в области пограничного слоя. Толщина первого призматического слоя (размер первой ячейки от стенки в пограничном слое) – 10^{-5} мм. Генерация сетки выполнена в декартовых координатах.

Для возможности сопоставления результатов расчёта с ранее проведёнными исследованиями [1] выбраны геометрические параметры модели. Вихревая труба с дополнительным потоком диаметром проточной части трубы $d_1 = 30$ мм, относительными длиной камеры энергоразделения $\bar{l} = 3, 6, 9$ калибров, радиусом отверстия диафрагмы, равным радиусу трубки ввода дополнительного потока $\bar{r}_d = \bar{r}_{доп} = 0,7$, площадью соплового ввода $\bar{f}_c = 0,05$, глубиной проникновения трубки дополнительного потока в камеру энергоразделения $\bar{l}_{доп} = 0,33$, углом конусности камеры энергоразделения $\alpha = 3,5^\circ$, углом конусности отверстия диафрагмы $\gamma = 15^\circ$.

Постановка задачи завершается заданием краевых и начальных условий в виде условий адиабатности и прилипания. На входе в вихревой энергоразделитель известными считались: полное давление $p_1^* = 0,4$ МПа и температура $T_1^* = 298$ К, на выходе задавалось статическое давле-

ние $p_0 = 0,1$ МПа. Для выбора режима работы ВТДП изменялся расход дополнительного потока: $G_{доп} = 0,3 - 0,75$ г/с. Шаг по времени составлял $\Delta t = 5 \cdot 10^{-3}$ с при стационарном расчёте. При нестационарной постановке задачи задавалось полное время $t = 0,3$ с, шаг по времени устанавливался $\Delta t = 1 \cdot 10^{-4}$ с. Сходимость задачи по массе для вариантов расчёта: $10^{-6} - 10^{-7}$ кг, сходимость по энергии – 0,001 %.

Анализ результатов. Прецессия вихревого приосевого жгута

По результатам численных расчётов адиабатный КПД в среднем на 10 % ниже экспериментального. Его максимальное значение наблюдалось на короткой по длине трёхкалибровой трубе при относительной доле охлаждённого потока $1,1 > \mu > 1,2$ (рис. 1). Отмеченное снижение эффекта энергоразделения предположительно можно объяснить упрощённой формой сетки для области течения в щелевом диффузоре.

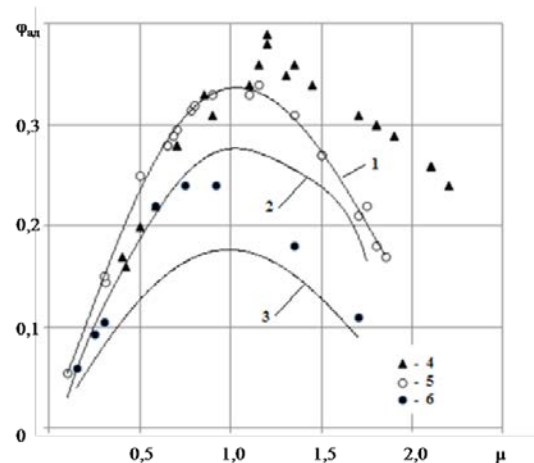


Рис. 1. Верификация результатов численного моделирования с данными экспериментального исследования [1].
Адиабатный КПД

$$d_1 = 30 \text{ мм}; \quad p_1^* = 0,4 \text{ МПа}; \quad T_1^* = 298 \text{ К}; \quad \bar{f}_c = 0,05; \\ \bar{r}_d = \bar{r}_{доп} = 0,7; \quad \bar{\delta}_d = 0,01; \quad \mu = 1,1. \quad 1,$$

2, 3 – численный расчёт для труб длиной 3, 6, 9 калибров;

4, 5, 6 – экспериментальные данные для труб длиной 3, 6, 9 калибров [1]

Визуализация картины течения подтверждает наличие в камере энергоразделения прецессирующего приосевого вихревого жгута и периодически расположенных по периферии вдоль оси крупномасштабных вихревых структур – тороидальных вихрей (рис. 2).

Можно предположить, что перенос массы этими вихрями при наличии радиального градиента давления является основной температурного разделения. В камере энергоразделения можно отметить нестационарное взаимодействие масс газа. Прецессионное движение спиралеобразного типа приосевого вихря в ВТДП вдоль камеры энергоразделения неодинаково. Наиболее выраженная прецессия наблюдается в области $1,1 < \bar{x} < 1,2$ для трёхкалибровой трубы; $1,3 < \bar{x} < 1,5$ – для шестикалибровой и $1,9 < \bar{x} < 2,2$ – в камере энергоразделения девятикалибровой трубы. В отмеченных областях амплитуда смещения центра приосевого вихря достигает $\bar{r} = r/r_1 = 0,55$ (рис. 3).

Прецессионное движение приосевого вихря порождает образование на периферии крупномасштабной вихревой структуры тороидальной формы. Циркуляция масс сжимаемой среды в этих структурах в присутствии радиального градиента давления реализует обратный цикл, в результате которого приосевые массы охлаждаются, а периферийные подгреваются. Это подтверждает природу энергоразделения, определённую в [4, 5] и подтверждает физические основы гипотезы взаимодействия вихрей. На реализацию цикла затрачивается кинетическая энергия крупномасштабной турбулентности.

Амплитуды колебаний скорости и статического давления возрастают с увеличением радиуса (рис. 4). В процессе перемещения вдоль камеры энергоразделения некоторое затухание можно отметить в области ввода дополнительного потока (рис. 5).

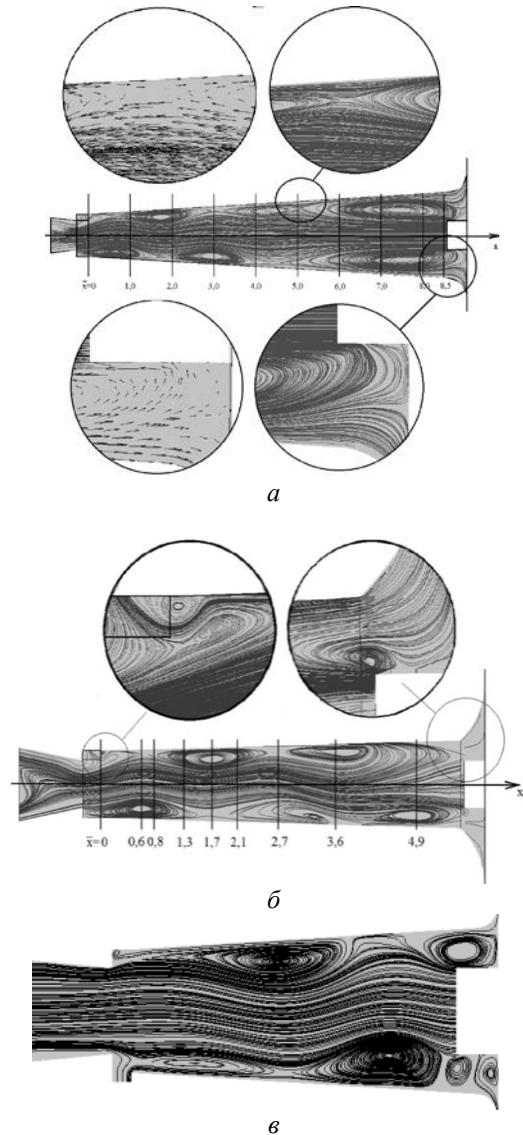


Рис. 2. Изолинии скорости в продольном сечении камеры энергоразделения ВТДП:

$$a - \bar{l} = 9; \quad б - \bar{l} = 6; \quad в - \bar{l} = 3;$$

$$d_1 = 30 \text{ мм}; \quad p_1^* = 0,4 \text{ МПа}; \quad T_1^* = 298 \text{ К};$$

$$\bar{f}_c = 0,05; \quad \bar{r}_d = r_{\text{доп}} = 0,7; \quad \bar{\delta}_d = 0,01; \quad \mu = 1,1$$



Рис. 3. Прецессия вихревого жгута в ВТДП. Изолинии скорости в поперечном сечении камеры энергоразделения при

$$\bar{x} = 1,0.$$

$$d_1 = 30 \text{ мм}; \quad \bar{l} = 3; \quad p_1^* = 0,4 \text{ МПа}; \quad T_1^* = 298 \text{ К};$$

$$\bar{f}_c = 0,05; \quad \bar{r}_d = r_{\text{доп}} = 0,7; \quad \bar{\delta}_d = 0,01; \quad \mu = 1,1$$

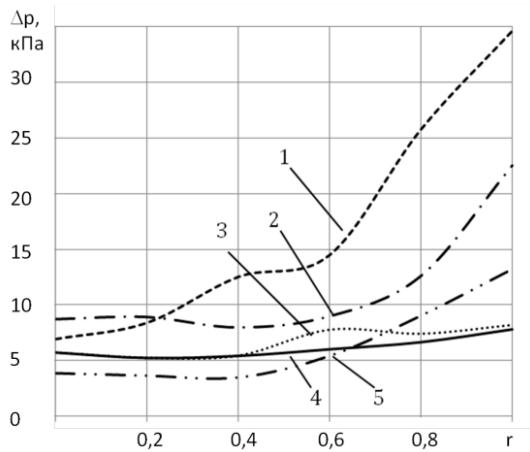


Рис. 4. Изменение амплитуды колебаний статического давления в камере энергоразделения ВТДП по радиусу:

- 1 – $\bar{x} = 1,0$; 2 – $\bar{x} = 3,0$; 3 – $\bar{x} = 5,0$;
- 4 – $\bar{x} = 7,0$; 5 – $\bar{x} = 9,0$;

$d_1 = 30 \text{ мм}$; $\bar{l} = 9$; $p_1^* = 0,4 \text{ МПа}$; $T_1^* = 298 \text{ К}$;
 $\bar{f}_c = 0,05$; $\bar{r}_d = \bar{r}_{\text{доп}} = 0,7$; $\bar{\delta}_d = 0,01$; $\mu = 1,1$

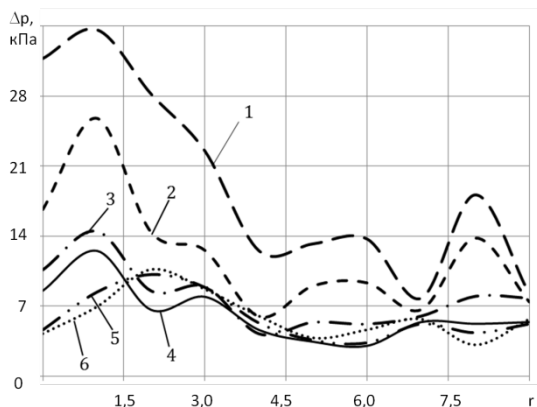


Рис. 5. Изменение амплитуды колебаний полного давления в камере энергоразделения ВТДП по оси трубы:

- 1 – $\bar{r} = 1,0$; 2 – $\bar{r} = 0,8$; 3 – $\bar{r} = 0,6$;
- 4 – $\bar{r} = 0,4$; 5 – $\bar{r} = 0,2$;

$d_1 = 30 \text{ мм}$; $\bar{l} = 9$; $p_1^* = 0,4 \text{ МПа}$; $T_1^* = 298 \text{ К}$;
 $\bar{f}_c = 0,05$; $\bar{r}_d = \bar{r}_{\text{доп}} = 0,7$; $\bar{\delta}_d = 0,01$; $\mu = 1,1$

Анализ поля скоростей

Исследование компонентов скорости показало, что охлаждённый поток, в основном сформировавшийся из масс газа, подведённых в виде дополнительного потока, имеет относительно высокую осе-

вую скорость 60 – 70 м/с. При $1,5 < \bar{x} < 4,0$ осевая составляющая скорости имеет минимальные значения, а в области соплового ввода ($0 < \bar{x} < 1,5$) снова возрастает вследствие возникающего в приосевой области разряжения (рис. 6).

Окружной компонент скорости в сопловом сечении заметно превосходит осевую. По мере передвижения к дроссели затухание вращательного движения становится существенным, что приводит к росту шага винтовых линий тока (рис. 7).

Радиальный компонент скорости имеет сравнительно малые значения (5 – 20 м/с). Увеличение радиальной скорости наблюдается в области формирования крупномасштабных вихревых структур, оно происходит за счёт перемещения масс газа из приосевого вихря в периферийный и в обратном направлении (рис. 8).

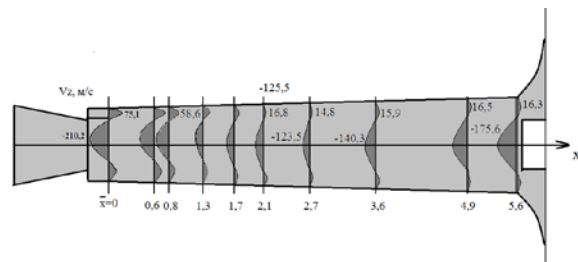


Рис. 6. Эюра осевой скорости вдоль камеры энергоразделения ВТДП:

$d_1 = 30 \text{ мм}$; $\bar{l} = 6$; $p_1^* = 0,4 \text{ МПа}$; $T_1^* = 298 \text{ К}$;
 $\bar{f}_c = 0,05$; $\bar{r}_d = \bar{r}_{\text{доп}} = 0,7$; $\bar{\delta}_d = 0,01$; $\mu = 1,1$

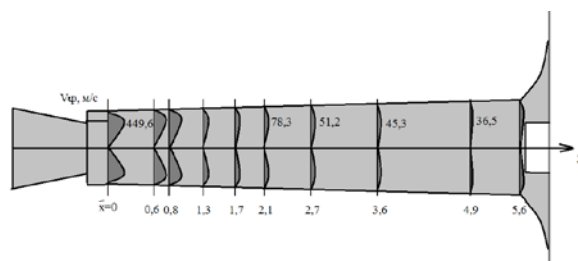


Рис. 7. Эюра окружной скорости вдоль камеры энергоразделения:

$d_1 = 30 \text{ мм}$; $\bar{l} = 6$; $p_1^* = 0,4 \text{ МПа}$; $T_1^* = 298 \text{ К}$;
 $\bar{f}_c = 0,05$; $\bar{r}_d = \bar{r}_{\text{доп}} = 0,7$; $\bar{\delta}_d = 0,01$; $\mu = 1,1$

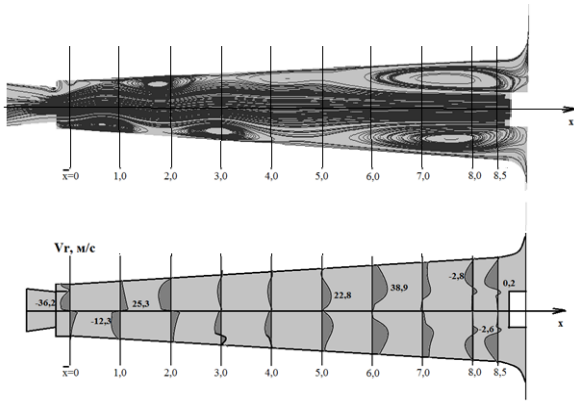


Рис. 8. Изолинии и эпюра радиальной скорости вдоль камеры энергоразделения ВТДП:

$$d_1 = 30 \text{ мм}; \bar{l} = 9; p_1^* = 0,4 \text{ МПа}; T_1^* = 298 \text{ К};$$

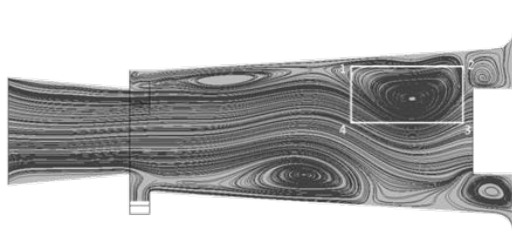
$$\bar{f}_c = 0,05; \bar{r}_d = \bar{r}_{\text{доп}} = 0,7; \bar{\delta}_d = 0,01; \mu = 1,1$$

Обратный холодильный цикл, осуществляемый в камере энергоразделения

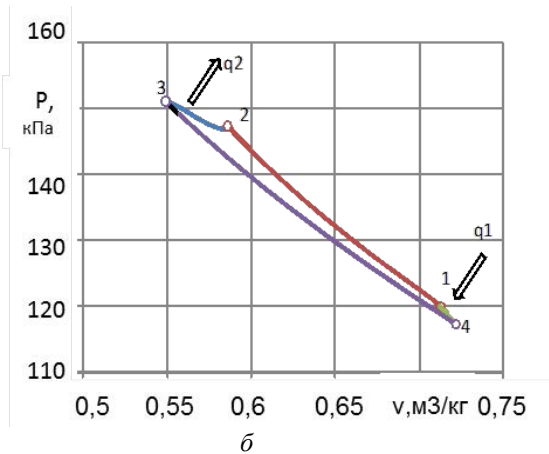
Компьютерная визуализация структуры течения в вихревых трубах позволяет с достаточной степенью точности представить процессы, протекающие в камере энергоразделения, и показать графически реализуемые обратные циклы, обеспечи-

вающие перенос энергии в форме тепла от приосевого вихря к периферийному, что приводит к наблюдаемой температурной стратификации (рис. 9). Как видно из рисунка, крупномасштабная вихревая структура зарождается в сечении, приближенном к сопловому вводу, и разрушается непосредственно в области размещения дросселя в виде щелевого диффузора (рис. 9, а). С использованием вычисленных значений параметров воздуха построен реализуемый холодильный цикл (рис. 9, б).

Интенсивность энергопереноса вдоль оси камеры энергоразделения ВТДП неодинакова. Визуализация картины течения в продольном сечении показывает неравномерность масштаба вихревой структуры в различных областях камеры. Величину отданной и принятой энергии в форме тепла можно оценить путём интегрирования по длине периферийного вихревого жгута, охватывающего приосевую поток, который формируется в основном из дополнительно подводимых масс газа.



а



б

Рис. 9. Изолинии скорости в вихревой трубе (а); P,v-диаграмма холодильного цикла, реализуемого в торцевом сечении вторичных вихревых структур (б):

$$d_1 = 30 \text{ мм}; \bar{l} = 3; p_1^* = 0,4 \text{ МПа}; T_1^* = 298 \text{ К}; \bar{f}_c = 0,05; \bar{r}_d = \bar{r}_{\text{доп}} = 0,7; \bar{\delta}_d = 0,01; \mu = 1,1$$

Влияние конструкции диафрагмы на процесс энергоразделения

Важное значение в формировании структуры течения имеет геометрия входного сопла. При сравнении расчётных и

экспериментально полученных результатов в подавляющем большинстве публикаций по вихревому эффекту отмечается их некоторое несоответствие, отражающее несколько более низкую эффектив-

ность энергоразделения, достигаемую в опытах. Объяснение этого факта практически всегда относилось к причинно-следственной связи, обусловленной стеканием пограничного слоя вдоль торцевой плоскости диафрагмы от соплового сечения к центральному отверстию и повышением температуры охлаждённых масс, покидающих трубу. Практически все попытки теоретического прогнозирования этого подмешивания оказались недостаточно состоятельными.

Тем не менее, причиной всё же является подмешивание масс газа, имеющих более высокую температуру, которое происходит в процессе прецессионного движения приосевого вихревого жгута, и за счёт формирования на выходе из соплового ввода в сечении диафрагмы циркуляционного вихря, подмешивающего воздух с более высокой температурой на входе в охлаждённый поток (рис.10). Визуализация структуры течения в этой области подтверждает отмеченное. Периодическое отклонение приосевого вихря от геометрической оси непосредственно у отверстия диафрагмы является причиной образования открытых для подмешивания основного потока областей. Толщина приосевого вихря и радиус отверстия диафрагмы являются определяющими факторами.

Наиболее часто для закрутки потока применяются закручивающие устройства с тангенциальным подводом газа в вихревую трубу. При использовании данной геометрии соплового ввода наблюдается стекание основного потока по стенке диафрагмы, вследствие чего к охлаждённым массам подмешивается воздух, не участвующий в процессе энергоразделения (2-5% от поступающего через сопловый ввод воздуха), что неблагоприятно сказывается на эффективности работы вихревой трубы, поскольку среднemasсовая температура охлаждённого потока при этом повышается.

Одним из конструктивных решений, позволяющих уменьшать влияние подмешивания, является изменение плоского

соплового ввода на скруглённый по лемнискате Бернулли.

Такое исполнение позволяет уменьшать среднemasсовую температуру охлаждённого потока и соответственно повышать холодопроизводительность в среднем на 1,5–2,0% в зависимости от режимных параметров работы вихревой трубы (рис. 11, 12).

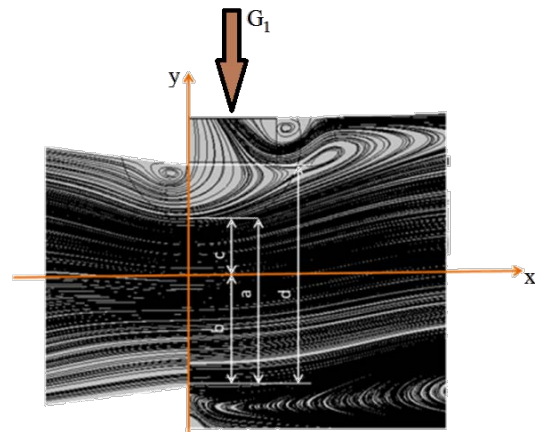


Рис. 10. Эффект подмешивания основного потока в отверстие диафрагмы: а – толщина приосевого вихря; б, с – положение приосевого вихря относительно геометрической оси; d – диаметр отверстия диафрагмы;

$$d_1 = 30 \text{ мм}; \bar{l} = 9; p_1^* = 0,4 \text{ МПа}; T_1^* = 298 \text{ К};$$

$$\bar{f}_c = 0,05; \bar{r}_d = \bar{r}_{\text{доп}} = 0,7; \bar{\delta}_d = 0,01; \mu = 1,1$$

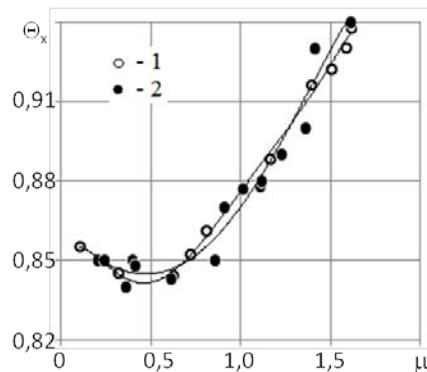


Рис. 11. Зависимость относительного эффекта охлаждения от доли охлаждённого потока.

Верификация результатов численного моделирования с экспериментальными данными [1]:

$$d_1 = 30 \text{ мм}; \bar{l} = 9; p_1^* = 0,4 \text{ МПа}; T_1^* = 298 \text{ К};$$

$$\bar{f}_c = 0,05; \bar{r}_d = \bar{r}_{\text{доп}} = 0,7; \bar{\delta}_d = 0,01; \mu = 1,1;$$

1 – эксперимент с прямой стенкой диафрагмы [1]; 2 – численный расчёт с прямой стенкой диафрагмы

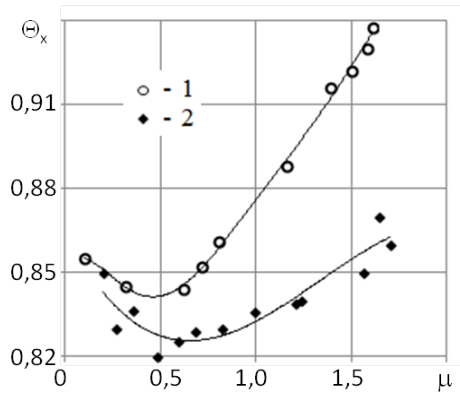


Рис. 12. Зависимость относительного эффекта охлаждения от доли охлажденного потока:
 $d_1 = 30$ мм; $\bar{l} = 9$; $p_1^* = 0,4$ МПа; $T_1^* = 298$ К;
 $\bar{f}_c = 0,05$; $\bar{r}_d = r_{\text{доп}} = 0,7$; $\bar{\delta}_d = 0,01$; $\mu = 1,1$;
 1 – эксперимент с прямой стенкой диафрагмы [1]; 2 – численный расчёт со скруглением стенки диафрагмы

Заключение

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения физической модели и методики расчёта характеристик противоточных вихревых труб и вихревых труб с дополнительным потоком. Предложена конструкция диафрагмы, обеспечивающая повышение эффекта охлаждения вихревых труб, и удалось обеспечить повышение холодопроизводительности на 1,5 – 2,0 %. Численное моделирование течения в вихревом энергоразделителе и исследование нестационарных явлений, имеющих место в ВТДП, показали, что источником крупномасштабных периодических колебаний в вихревой трубе является прецессия вихревого ядра. Различные области потока – зона рециркуляции, вихревое ядро, свободная струя на выходе из щелевого диффузора – являются единичными компонентами одной колебательной системы.

Библиографический список

1. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование. М.: Научтехлитиздат, 2013. 342 с.
2. Пиралишвили Ш.А., Барановский Б.В. Анализ влияния турбулентных характеристик течения в вихревых трубах на геометрию трубы и термодинамику процесса энергоразделения. Рыбинск: РАТИ, 1991. 41 с.
3. Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
4. Хинце И.О. Турбулентность. М.: ГИФМЛ, 1963. 676 с.
5. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969. 176 с.

Информация об авторах

Пиралишвили Шота Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая и техническая физика», Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва. E-mail: piral@list.ru. Область научных интересов: аэрокосмическая теплофизика, энергетика, гидрогазодинамика и теплообмен

в ограниченных потоках, вихревой эффект.

Соколова Ольга Александровна, студент, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва. E-mail: olyaanya91@mail.ru. Область научных интересов: вихревой эффект.

NUMERICAL STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF A DOUBLE-CIRCUIT VORTEX TUBE IN A STATIONARY AND A NONSTATIONARY SETTINGS

© 2015 Sh. A. Piralishvili, O. A. Sokolova

Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation

The results of numerical modeling of thermodynamics of a swirled flow in an energy separation chamber of vortex devices in stationary and non-stationary settings are presented in the paper. The results of investigation confirmed the presence of precession motion of the paraxial vortex core, velocity, pressure and temperature pulsations in the energy separation chamber. The processing of these made it possible to design a reverse cycle produced by large-scale vortex structures in a p , v -diagram. The cycle is responsible for the major portion of energy transfer from the periphery to the near-axial layers. It was found that the heated masses of gas are added to the cooled flow near the end surface of the diaphragm due to the angle vortex produced. We propose making the nozzle inlet inclined in the form of a slope using the Bernoulli lemniscate, which results in the improvement of energy separation characteristics by 1.5-2.0 per cent. Different areas of the flow such as the recirculation zone, the vortex core, the open jet at the outlet of the slot diffuser are the components of a single vibration system. Numerical simulation of flow in a vortex energy separator and analysis of non-stationary phenomena taking place in a DCVT show that vortex core precession is the source of large-scale periodic vibrations in a vortex tube.

Vortex tube with an additional flow, energy separation, precession, near-axial and peripheral vortices.

References

1. Piralishvili Sh. A. *Vikhrevoy effekt. Fizicheskoe yavlenie, eksperiment, teoreticheskoe modelirovanie* [Vortex effect. Physical phenomenon, experiment, the theoretical modeling]. Moscow: Nauchtehlitizdath Publ., 2013. 342 p.
2. Piralishvili Sh. A., Baranowski B.V. *Analiz vliyaniya turbulentnykh kharakteristik techeniya v vikhrevykh trubakh na geometriyu trub i termodinamiku protsessa energorazdeleniya* [Analysis of the effect of turbulent flow characteristics in vortex tubes]. Rybinsk: RATI, 1991. 41 p.
3. Suslov A.D., Ivanov S.V., Murashkin A.V., Chizhikov Yu.V. *Vikhrevye apparaty* [Vortex devices]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 256 p.
4. Hinze I.O. *Turbulentnost'* [Turbulence]. Moscow: GIFML Publ., 1963. 676 p.
5. Merkulov A.P. *Vikhrevoy effekt i ego primeneniye v tekhnike* [Vortex effect and its application in engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 176 p.

About the authors

Piralishvili Shota Alexandrovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of General and Applied Physics, Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation. E-mail: piral@list.ru. Area of Research: aerospace thermal physics, power

engineering, fluid dynamics and heat transfer in confined flows, swirling effect.

Sokolova Olga Alexandrovna, undergraduate student, Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russian Federation. E-mail: olyaanya91@mail.ru. Area of Research: swirling effect.