

С.В. Веретенников, С.Н. Баринов

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТОЧНОЙ СХОДИМОСТИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Представлены результаты численных исследований сеточной сходимости при моделировании процессов газодинамики и теплообмена в вихревой трубе с помощью неструктурированной тетрагональной сетки в стационарной постановке. Для моделирования выбрана противоточная вихревая труба, в качестве рабочей среды – идеальный газ. Проведены исследования зависимости интегральных (массового расхода и полной энтальпии) и локальных параметров потока (распределение скорости, статического давления и температуры) от числа элементов расчетной области и шага по времени. Обнаружено существенное влияние количества призматических слоев на распределение значений коэффициента теплоотдачи по внутренней поверхности камеры энергоразделения и патрубка охлажденного потока.

Ключевые слова: вихревая труба, сеточная сходимость.

S.V. Veretennikov, S.N. Barinov

Rybinsk State Academy of Aviation Technology named after P.A. Solovyev,
Rybinsk, Russian Federation

MESH CONVERGENCE STUDYING UNDER SIMULATION OF GAS DYNAMICS AND HEAT TRANSFER PROCESSES IN VORTEX TUBE

The results of mesh convergence numerical studying under simulation of gas dynamics and heat transfer processes into a vortex tube are obtained using non-structured tetragonal mesh in a stationary case and are presented in the paper. A countercurrent flow vortex tube is chosen for the modeling and ideal gas is considered as the processing medium. Studying the dependencies of the integral (mass flow and full enthalpy) and the local (velocity distribution, hydrostatic pressure and temperature) parameters of the gas flux on the elements number into computation volume and on the time step is fulfilled. The substantial influence of the prismatic layers number on the distribution of the heat emission coefficient values along the internal surface of the energy separation chamber and the duct of a chilled flux is obtained.

Keywords: vortex tube, mesh convergence.

При использовании численных расчетов для моделирования физических процессов необходимо учитывать влияние большого числа параметров расчета на его результаты. К таким параметрам относятся тип сетки (структурированная, неструктурированная), число элементов расчетной области, соответствие этих элементов параметрам качества и т.д. [1, 2]. Поскольку на данный момент не существует строгих зависимостей, позволяющих учитывать отклонения результатов расчета от вышеперечисленных параметров, перед проведением численного моделирования для каждой конкретной геометрии необходим ряд предварительных расчетов.

Численные расчеты были проведены на модели противоточной вихревой трубы [3], состоящей из закручивающего устройства 1, камеры энергоразделения 2, патрубка охлажденного потока 3 и геометрии 4, моделирующей окружающую среду на выходе из вихревой трубы (рис. 1). Геометрические параметры вихревой трубы: двухзаходное закручивающее устройство 1 с тангенциальными соплами прямоугольной формы (отношение сторон $b:h = 1:2$), диаметр камеры энергоразделения $2d = 10$ мм; относительный диаметр диафрагмы $d_d = 0,5$; относительная площадь сопловых вводов $f_c = 0,1$; длина камеры энергоразделения $1L = 8$ калибров. На выходе из камеры энергоразделения стоит крестовина 5.

В каждом новом расчете изменялось только число элементов неструктурированной тетрагональной сетки расчетной области внутренних каналов вихревой трубы ($N = 1\ 098\ 552$; $3\ 211\ 404$; $5\ 102\ 889$; $6\ 660\ 583$; $8\ 871\ 787$); геометрия и граничные условия оставались неизменными. На сопловых вводах задавались температура и давление адиабатного торможения $T_{вх}^* = 293$ К; $P_{вх}^* = 200\ 000$ Па; на выходах «холодного» и «горячего» потоков – статическое давление $P = 101\ 325$ Па. Остальные поверхности расчетной области адиабатные. При выполнении всех расчетов использовалась k - ϵ -модель турбулентности (сетка построена без призматического подслоя). Свойства рабочей среды описывались моделью Air Ideal Gas (молярная масса $\mu = 0,0029$ кг/моль (воздух)). Сетка удовлетворяет следующим параметрам качества: Min Angle $> 14^\circ$; Determinant > 0 ; Quality > 0 .

Зависимость теплопроводности и динамической вязкости учитывалась по формуле Сатерленда:

$$\mu = \frac{1,45774 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,5}}{110,4 + T}; \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{0,00250139 \cdot T^{1,5}}{194,4 + T}. \quad (2)$$

Начальное значение физического шага по времени 10^{-5} с; в ходе расчета шаг по времени увеличивался до 10^{-3} с (промежуточные значения $5 \cdot 10^{-5}$; 10^{-4} ; $5 \cdot 10^{-4}$ с).

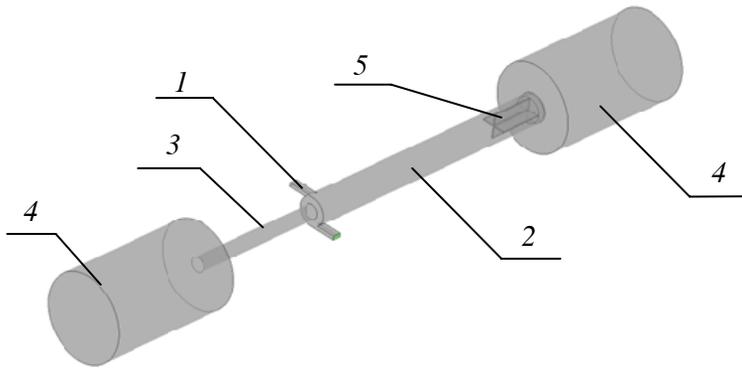


Рис. 1. Геометрическая модель вихревой трубы

По результатам расчетов (таблица) построены графики зависимости массового расхода и энтальпии потока, вычисленной по параметрам торможения, на входе, «горячем» и «холодном» выходах от числа элементов расчетной области (рис. 2). Величина относительного отклонения от баланса массового расхода и энергии уменьшается с увеличением числа элементов расчетной области, причем для расхода отклонение уменьшается быстрее. Для массового расхода минимальная величина отклонения составляет 0,131 %, для энтальпии – 2,4 %.

Графики зависимости массового расхода и полной энтальпии от шага по времени имеют качественно одинаковый вид для различных сеток. Как видно из рис. 3, уже при $\tau = 5 \cdot 10^{-4}$ с дальнейшее увеличение шага по времени не вызывает существенного изменения ни одной из рассматриваемых величин. Таким образом, можно сделать вывод, что при моделировании газодинамики течения в данной вихревой трубе расчет необходимо остановить при шаге по времени $5 \cdot 10^{-4}$ с.

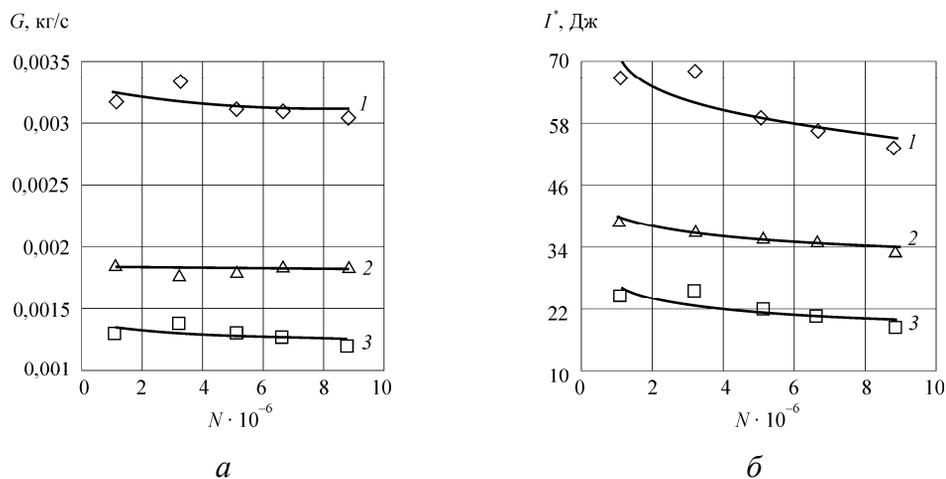


Рис. 2. Зависимость массового расхода: *a* – от полной энтальпии; *б* – от числа элементов расчетной области (шаг по времени 10^{-3} с): 1 – вход; 2 – выход «горячего» потока; 3 – выход «холодного» потока

Влияние числа элементов расчетной области на результаты расчета

Параметры расчета	Число элементов				
	1 098 552	3 211 404	5 102 889	6 660 583	8 871 787
$G_{\text{вх}}$, кг/с	0,0032	0,0033	0,0031	0,0031	0,0031
$G_{\text{х}}$, кг/с	0,0013	0,0014	0,0013	0,0013	0,0012
$G_{\text{г}}$, кг/с	0,0019	0,0018	0,0018	0,0018	0,0019
$I_{\text{вх}}^*$, Вт	67,20	68,49	59,61	56,86	53,09
$I_{\text{х}}^*$, Вт	24,34	25,39	22,14	20,26	18,01
$I_{\text{г}}^*$, Вт	39,52	37,41	35,76	35,04	33,80

Визуализация структуры течения с помощью трехмерных линий тока (по скоростям) показала, что при шаге по времени $\tau > 5 \cdot 10^{-5}$ с наблюдалось разрушение закрученного потока в камере энергоразделения вблизи крестовины (рис. 4). Распределения других локальных параметров потока (статического давления, полной температуры и скорости) в продольном сечении вихревой трубы, характерные для противоточного закрученного течения в камере энергоразделения,

были получены только при шаге по времени $\tau > 10^{-5}$ с. В то же время для получения адекватных результатов необходимо увеличивать значение τ . Все это говорит о существенно нестационарной структуре течения в камере энергоразделения вихревой трубы.

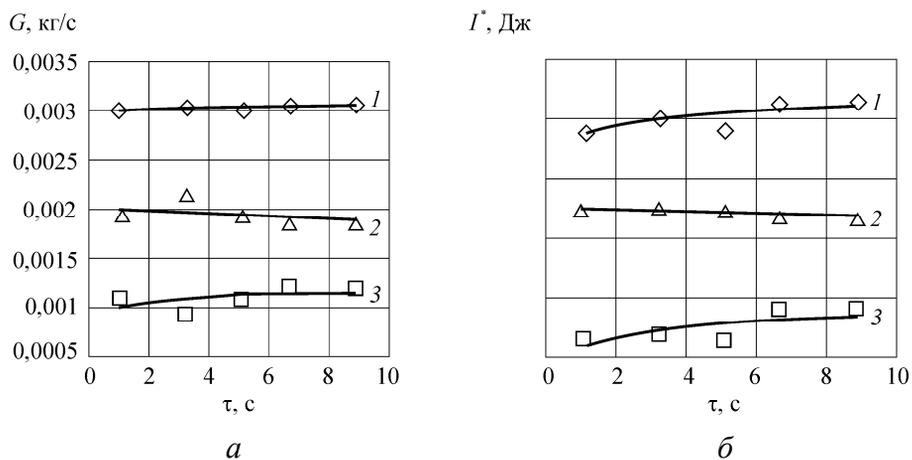


Рис. 3. Зависимость G и I^* от шага по времени τ (число элементов $N = 8\,871\,787$):
 1 – вход; 2 – выход «горячего» потока; 3 – выход «холодного» потока

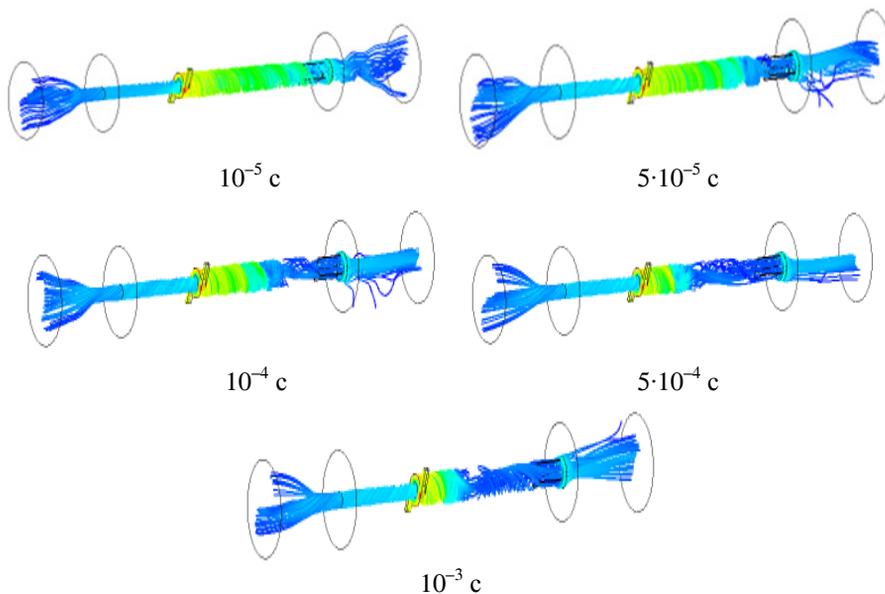


Рис. 4. Трехмерные линии тока (по скорости) при различных значениях шага по времени τ

Во второй серии расчетов исследовалось влияние количества призматических слоев в пристенной области патрубка охлажденного потока и камеры энергоразделения на величину коэффициента теплоотдачи. Геометрия вихревой трубы оставалась неизменной и была дополнена двумя цилиндрами, моделирующими стенку камеры энергоразделения и патрубка охлажденного потока (толщина стенки 2 мм). На наружной поверхности задавалась постоянная температура 170 °С. За исключением использования SST-модели турбулентности, параметры расчета оставались прежними. Расчеты проводились на неструктурированных тетрагональных сетках, отличающихся числом призматических слоев (3; 5; 8). По результатам расчета рассчитан коэффициент теплоотдачи по формуле

$$\alpha = \frac{q}{|T - T_{\text{вх}}^*|}, \quad (3)$$

где T – температура стенки, К; q – плотность теплового потока, Вт/м².

Из рис. 5 видно, что различие в значении коэффициента теплоотдачи для камеры энергоразделения и патрубка охлажденного потока уменьшается с увеличением призматических слоев. Для камеры энергоразделения наиболее существенные различия наблюдаются в области завихрителя ($L/d = 0 \dots 2,5$); для патрубка охлажденного потока – в области выхода «холодного» потока ($L/d = 3 \dots 5$).

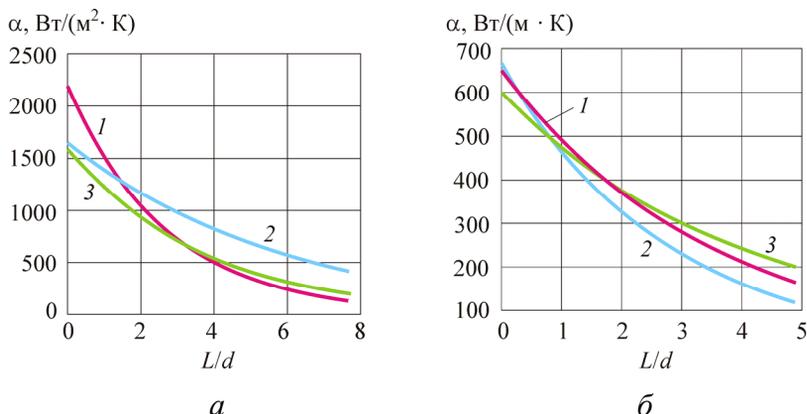


Рис. 5. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине камеры энергоразделения (а) и патрубка охлажденного потока (б) при различном количестве призматических слоев: 1 – 5 слоев; 2 – 3 слоя; 3 – 8 слоев

Таким образом, в представленном исследовании показано, что для получения результатов расчета с определенной точностью необходимо предварительно для каждой конкретной задачи провести исследование сеточной сходимости. При неизменной геометрии и неизменных начальных параметрах расчета такие величины, как массовый расход и энтальпия, существенно зависят от степени дискретизации сетки и шага по времени. Кроме того, проведенные расчеты показали ограниченность моделирования закрученного течения в стационарной постановке: на протяжении всего расчета (при различных значениях шага по времени) не удалось получить структуру течения, характерную для камеры энергоразделения вихревой трубы.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-749.2014.8.

Библиографический список

1. Веретенников С.В., Баринов С.Н. Влияние параметров сетки на результаты численного моделирования [Электронный ресурс] // Прикладная математика, механика и процессы управления: материалы I Всерос. науч.-техн. интернет-конф. молодых ученых, Пермь, 14–19 ноября 2013 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – С. 140–149. – URL: <http://pmpu.pstu.ru/conf2013/papers/24>.

2. Баринов С.Н., Веретенников С.В. Численное моделирование процессов теплообмена в вихревых энергоразделителях // XXI Туполевские чтения (школа молодых ученых): материалы междунар. науч. конф., Казань, 19–21 ноября 2013 г. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. – С. 234–235.

3. Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В. Вихревой эффект и интенсификация процессов тепло- и массообмена в элементах энергетической техники // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. – 2011. – № 3, ч. 1. – С. 241–247.

References

1. Veretennikov S.V., Barinov S.N. Vliianie parametrov setki na rezul'taty chislennogo modelirovaniia [Influence of grid parameters on numerical simulation results]. *Materialy I Vserossiiskoi nauchno-*

tekhnicheskoi internet-konferentsii molodykh uchenykh "Prikladnaia matematika, mekhanika i protsessy upravleniia". Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, pp. 140-149, available at: <http://pmpu.pstu.ru/conf2013/papers/24>.

2. Barinov S.N., Veretennikov S.V. Chislennoe modelirovanie protsessov teploobmena v vikhrevykh energorazdeliteliakh [Numerical modelling of heat exchange processes in vortex power dividers]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "XXI Tupolevskie chteniia (shkola molodykh uchenykh)"*. Kazan: Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013, pp. 234-235.

3. Piralishvili Sh.A., Veretennikov S.V. Vikhrevoi effect i intensifikatsiia protsessov teplo- i massoobmena v elementakh energeticheskoi tekhniki [Vortex effect and intensification of heat and mass transfer in cell energy technology]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aero-kosmicheskogo universiteta imeni S.P. Koroleva*, 2011, no. 3, part 1, pp. 241-247.

Об авторах

Веретенников Сергей Владимирович (Рыбинск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры общей и технической физики Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева (152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, e-mail: serveret@yandex.ru).

Баринов Сергей Николаевич (Рыбинск, Россия) – студент Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева (152934 г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, e-mail: barinov.sergej.91@mail.ru).

About the authors

Sergei V. Veretennikov (Rybinsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of General and Technical Physics, Rybinsk State University of Aviation Technology named after P.A. Solovyev (53, Pushkin st., Rybinsk, 152934, Russian Federation, e-mail: serveret@yandex.ru).

Sergei N. Barinov (Rybinsk, Russian Federation) – Student, Rybinsk State University of Aviation Technology named after P.A. Solovyev (53, Pushkin st., Rybinsk, 152934, Russian Federation, e-mail: barinov.sergej.91@mail.ru).