

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВИХРЕВОГО РАСХОДОМЕРА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.С. Шулев, Е.В. Сафонов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Представлены результаты численного моделирования проточной части вихревого расходомера для трех сеток с разным количеством ячеек. Суть решаемой задачи заключается в определении влияния количества ячеек расчетной сетки для геометрии проточной части на точность результатов моделирования, а конкретнее на амплитудно-частотные характеристики вихревого расходомера. Для решения используется метод сравнительных численных расчетов для трех типов сеток одной проточной части и одного режима течения. Численное моделирование проточной части вихревого расходомера с телом обтекания в виде крыла, осуществлялось с помощью суперкомпьютера «СКИФ-УРАЛ» на программном обеспечении ANSYS CFX и Cosmos Flow Simulation. Для проверки сходимости результатов расчеты проведены на трех типах сеток, содержащих 2 млн ячеек, 6 млн ячеек и 18 млн ячеек. Частота колебаний вихрей получена в результате применения метода частотного анализа, основанного на разложении Фурье, для результирующего перепада давления на крыле. Результаты представлены для несжимаемой среды (вода) в виде зависимостей амплитудно-частотных характеристик от времени. Выявлена зависимость точности результатов численного моделирования в зависимости от количества ячеек сетки. Анализ полученных результатов указывает на удовлетворительное согласование результатов численного моделирования между собой и данными физического эксперимента. Относительная погрешность данных численного моделирования не превышает 9 %, при этом наибольшее совпадение получено на расчетной сетке, содержащей 6 млн ячеек и использующей SST-модель турбулентности (расхождение не более 2,4 %). Сравнение данных численного и физического экспериментов показало удовлетворительное количественное совпадение. В качестве рабочей сетки рекомендовано принять сетку, содержащей 6 млн ячеек и использующей SST-модель турбулентности.

Ключевые слова: вихревой расходомер, дорожка кармана, численное моделирование внутренних течений, CFD, суперкомпьютер.

Введение. Объектом исследования является проточная часть вихревого расходомера, внутри которой установлено тело обтекания и датчик частоты вихреобразования (сенсор) (рис. 1) [1].

Вихревые расходомеры предназначены для измерения объемного расхода жидких или газообразных сред. Принцип действия вихревого расходомера основан на зависимости частоты срыва вихрей с поверхности плохобтекаемого тела, помещенного в трубопроводе диаметрально оси трубы, от объемного расхода. Сигналы с чувствительного элемента (сенсора), расположенного в проточной части, усиливаются, преобразуются и передаются для дальнейшей обработки [2, 3].

Для отработки и поверки расходомеров в настоящее время применяется проливной метод. Поверка проливным методом осуществляется на проливной установке, где через поверяемый прибор пропускается строго определенное количество жидкости. Достоинством проливных установок является возможность исследования на них расходомеров любых конструкций. К сожалению, для такого метода требуется не только проливная установка, но и разработанный расходомер, что крайне дорого и трудозатратно, поэтому стоимость проливной поверки достаточно высока и сопоставима с ценой самого расходомера.

К настоящему времени благодаря широкому распространению программных продуктов для численного моделирования гидрогазодинамических процессов создается повышенный интерес

Расчет и конструирование

к использованию таких пакетов, как ANSYS CFX и Cosmos Flow Simulation, для решения задач сокращения времени при создании или модернизации датчиков расхода, чему свидетельствует большое количество публикаций [4–9] по этой тематике.

1. Расчетная схема, принятые допущения и результаты моделирования гидрогазодинамических процессов на суперкомпьютере. Задача по отработке конструкции вихревого расходомера может быть решена с помощью численного моделирования. Временные затраты на численное моделирование связаны с количеством ячеек в сетке – чем больше количество ячеек, тем больше времени потребуется на вычисления и тем точнее должны быть конечные результаты моделирования. Суть решаемой задачи заключается в определении влияния количества ячеек расчетной сетки для геометрии проточной части на точность результатов моделирования, а конкретнее – на амплитудно-частотные характеристики вихревого расходомера. Для решения используется метод сравнительных численных расчетов для трех типов сеток одной проточной части и одного режима течения.

Принцип работы вихревого расходомера основан на образовании вихрей за телом обтекания, установленном в проточной части расходомера и последующем их учете (измерении) [2, 3].

Задача оптимизации геометрии проточной части вихревого расходомера как с помощью численного моделирования, так и с помощью физических и теоретических методов актуальна, чему свидетельствуют публикации [10–13] по данной тематике.

Геометрия, используемая для численного моделирования, представлена на рис. 1 и соответствует реальному вихревому датчику расхода DN40.

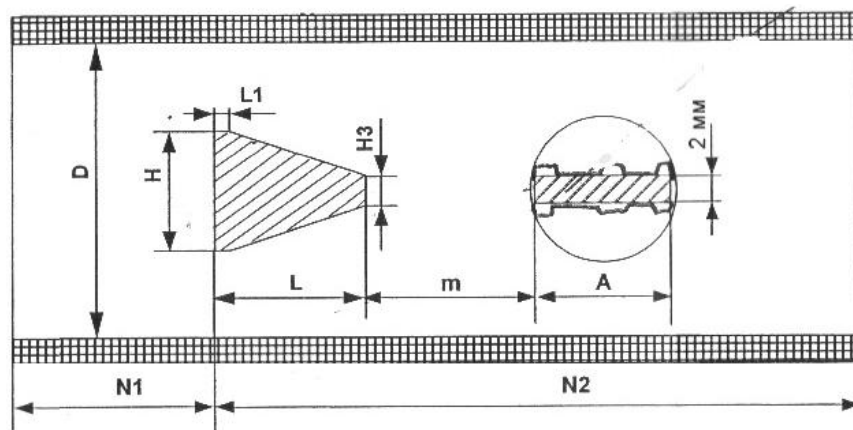


Рис. 1. Эскиз проточной части с идеальной геометрией:

D – диаметр проточной части; H – высота тела; L1 – уступ; H3 – высота; L – длина тела; m – шаг; A – ширина сенсора; N1 – длина входа; N2 – длина выхода

Таблица 1

Параметры моделируемых сред

Параметр	Величина
Среда	Вода
Давление статическое на выходе проточной части (абс.)	300 000 Па
Температура среды	20 °С
Средняя скорость среды на входе проточной части	7 м/с
Кинематическая вязкость среды при 20 °С	$1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Численное моделирование течения жидкости и газа в проточной части вихревых расходомеров проводилось для условий, представленных в табл. 1.

Результаты моделирования процессов в проточной части расходомеров представлялись интегральными параметрами в виде частоты колебаний давления, графиков изменения давления во времени.

В ходе численного моделирования течения в проточной части вихревого расходомера с телом обтекания осуществлялась регистрация изменения давления по двум плоскостям крыла сенсора вихрей. Изменение давления носило периодический характер, причем колебания осуществлялись в противофазах (рис. 2, 4, 6). Результирующий график представляет собой перепад давления на крыле (рис. 3, 5, 7), полученный в результате вычитания данных, представленных на рис. 2, 4, 6.

Различные знаки перепадов давления соответствуют импульсу давления, попеременно приходящего с одной и с другой стороны. Частота колебаний полученных данных обозначена f (табл. 2).

Моделирование проточной части вихревого расходомера с телом обтекания в виде крыла проведено с использованием суперкомпьютера «СКИФ-УРАЛ» на программном обеспечении ANSYS CFX 12. Для проверки сходимости результатов, расчеты проведены на трех типах сеток, содержащих 2 млн ячеек (см. рис. 2, 3), 6 млн ячеек (см. рис. 4, 5) и 18 млн ячеек (см. рис. 6). Результаты представлены в виде графиков изменения давления на двух сторонах крыла сенсора. Частота колебаний f получена в результате применения метода частотного анализа, основанного на разложении Фурье, для результирующего перепада давления на крыле (см. рис. 2–6). Полученные данные приведены на графиках (рис. 7–9) в виде пиков амплитуды соответствующей частоты колебаний.

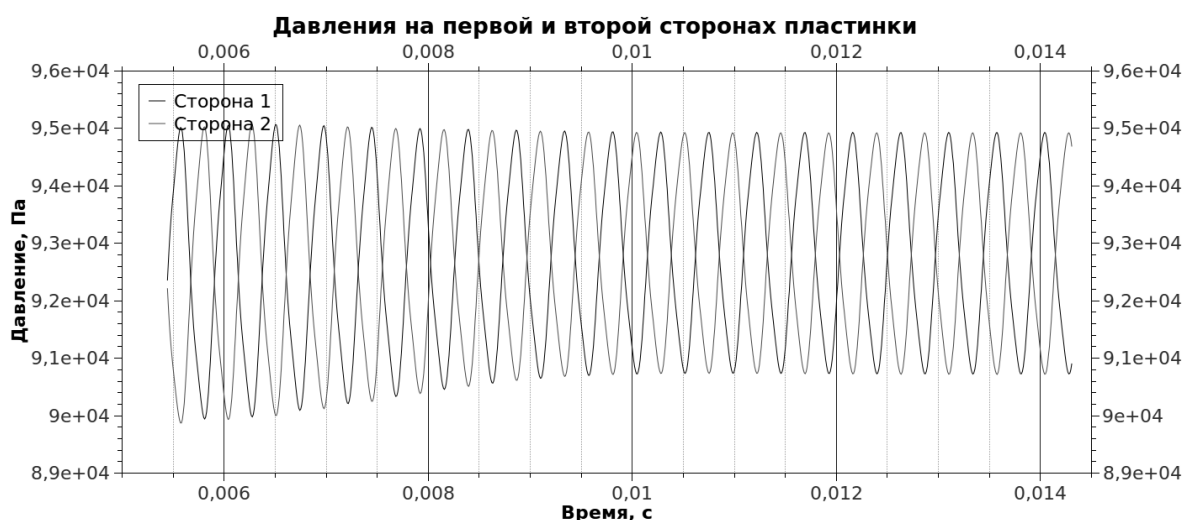


Рис. 2. График пульсаций давлений на крыле для сетки 2 млн ячеек

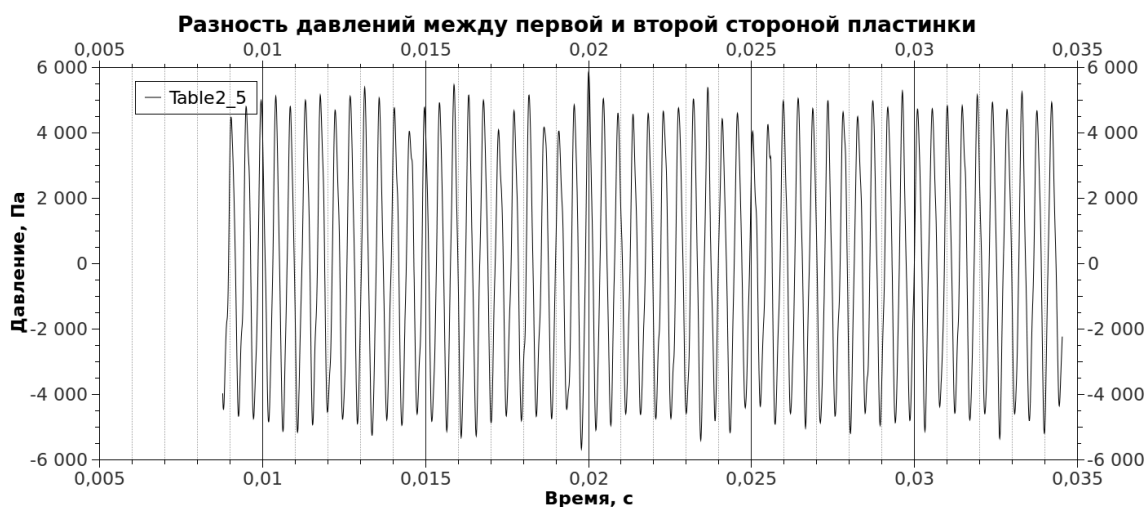


Рис. 3. График результирующего перепада давления на крыле для сетки 2 млн ячеек

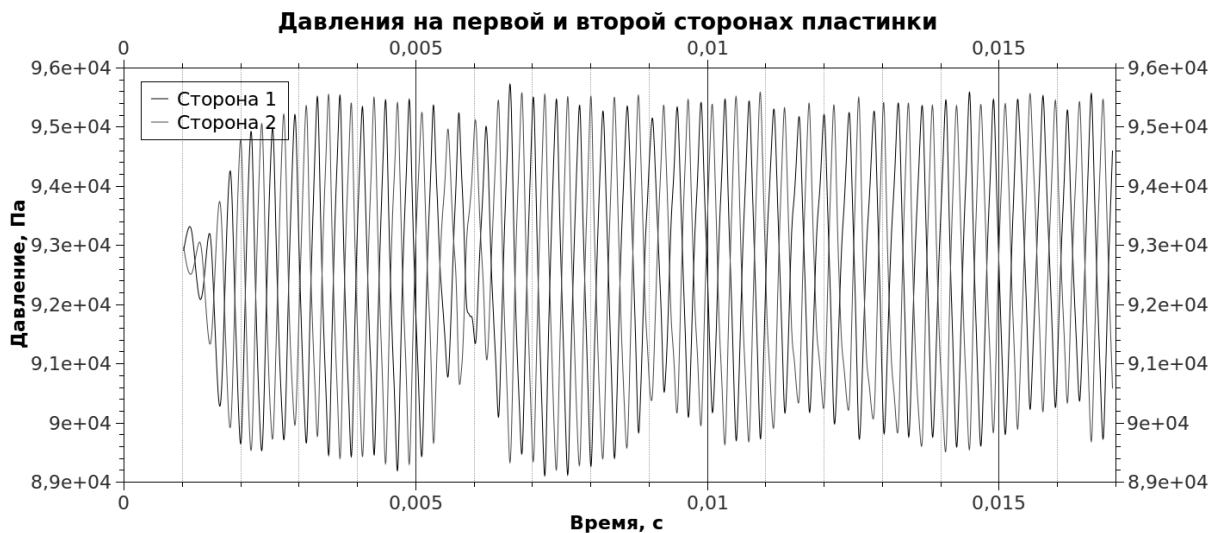


Рис. 4. График пульсаций давлений на крыле для сетки 6 млн ячеек

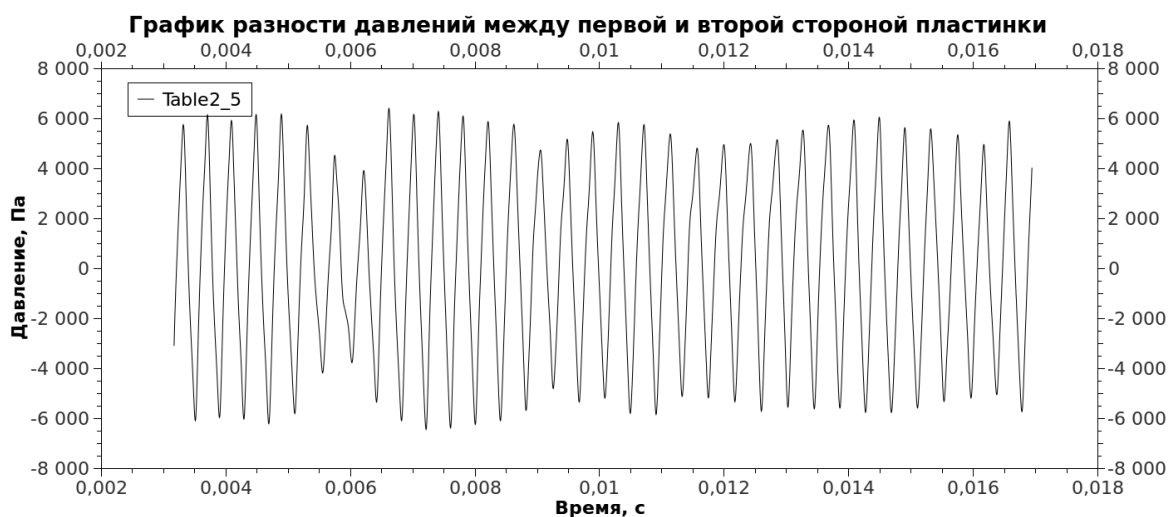


Рис. 5. График результирующего перепада давления на крыле для сетки 6 млн ячеек

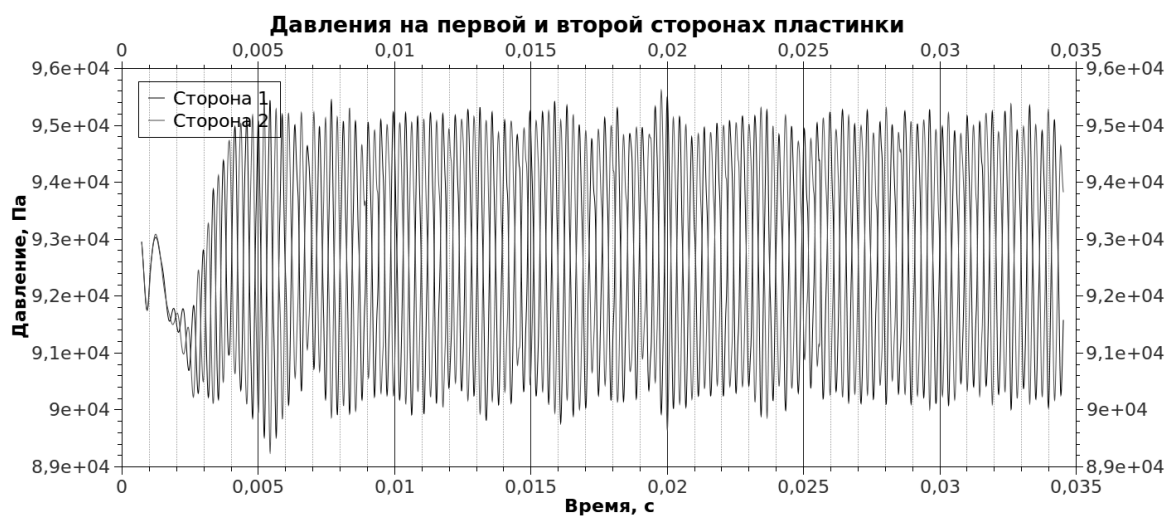


Рис. 6. График пульсаций давлений на крыле для сетки 18 млн ячеек

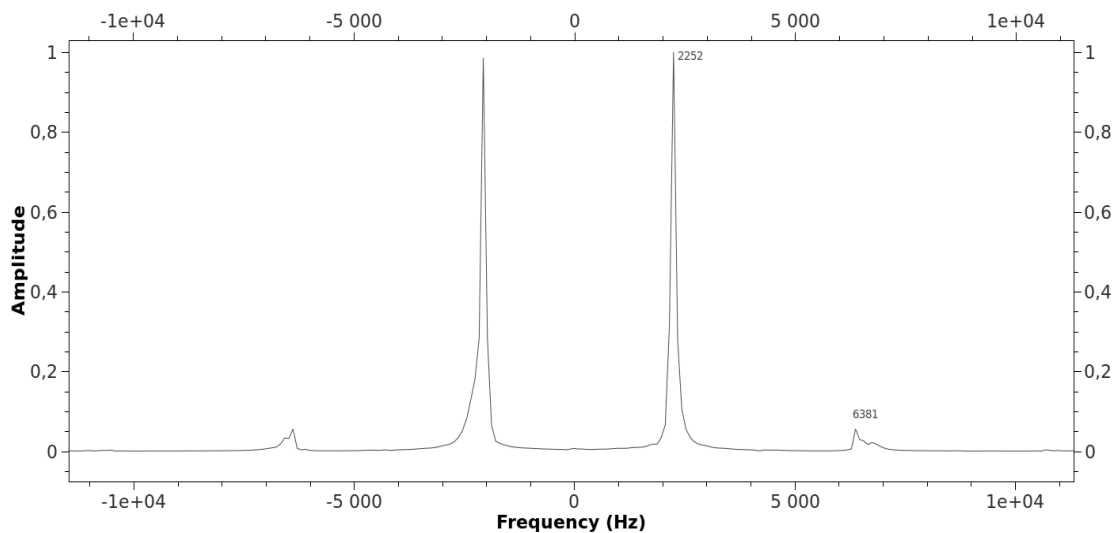


Рис. 7. График амплитудно-частотной характеристики для сетки 2 млн ячеек

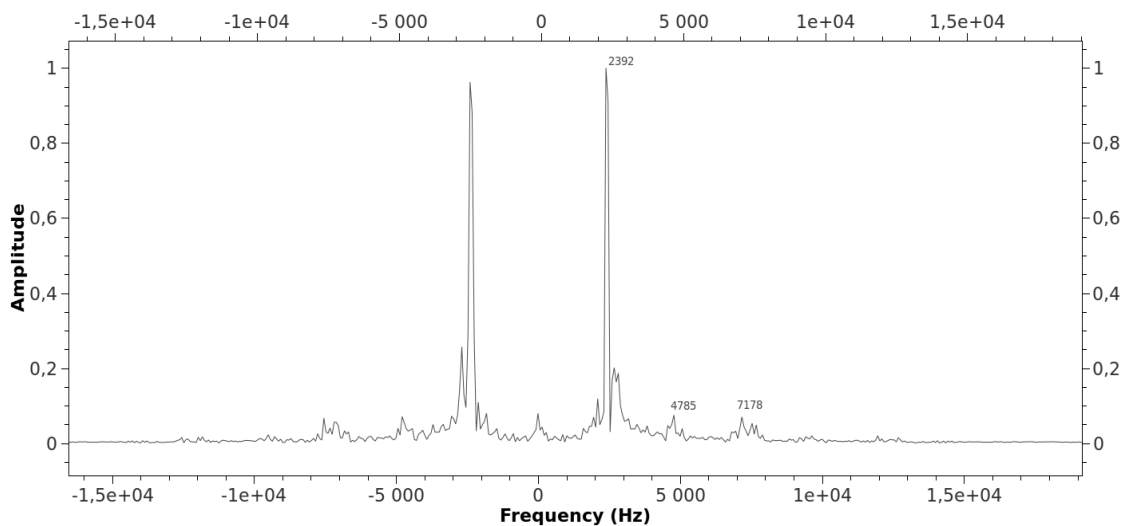


Рис. 8. График амплитудно-частотной характеристики для сетки 6 млн ячеек

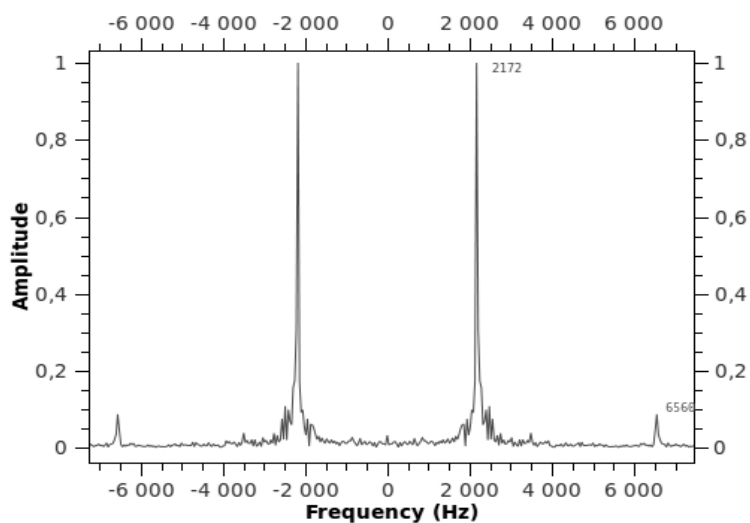


Рис. 9. График амплитудно-частотной характеристики для сетки 18 млн ячеек

Анализ амплитудно-частотных характеристик указывает на наличие пиков в области частот 6–7 кГц, соответствующих вторичным вихрям, генерируемым крылом сенсора. Наглядная картина образования вторичных вихрей при обтекании крыла представлена на рис. 10.

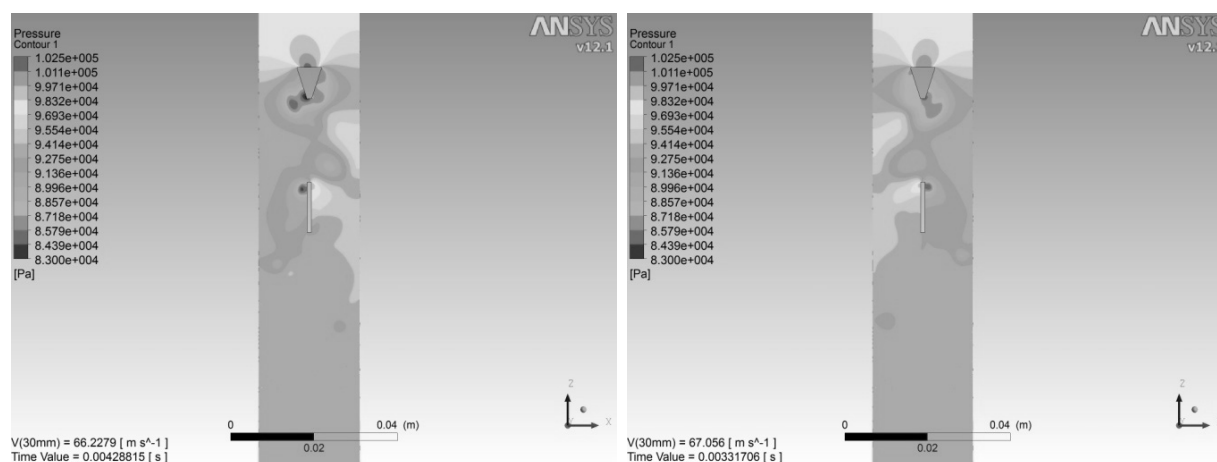


Рис. 10. Вторичные вихри, возникающие на крыле сенсора вихревого датчика расхода

2. Сравнение результатов численного моделирования. Анализ частотных характеристик, полученных при численном моделировании с применением расчетных пакетов ANSYS CFX и Cosmos Floworks, указывает на удовлетворительное согласование результатов численного моделирования между собой и данными физического эксперимента (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительная таблица результатов

Наименование эксперимента	Частота, f, Гц	Средняя скорость, м/с	Sh	Модель турбулентности	Точность, %
Физический эксперимент	2350,37	63,87	0,213	–	–
Cosmos Floworks (2,2 млн ячеек)	2175	64,6	0,195	k-e	8,5
ANSYS CFX (2 млн ячеек)	2252	64,38	0,203	SST	4,7
ANSYS CFX (6 млн ячеек)	2392	63,68	0,218	SST	2,4
ANSYS CFX (18 млн ячеек)	2172	64,00	0,197	k-e	7,5

Анализ полученных данных дает представление о требуемых временных затратах для численного моделирования. Повышение количества ячеек ведет к повышению точности расчета, но также требует дополнительного времени, что не всегда оправдано с точки зрения требуемой погрешности. Характеристики затраченного времени при использовании суперкомпьютера представлена в табл. 3.

Эффективность применения суперкомпьютера определяется временем, затраченным на проведение численного моделирования течения в проточной части вихревого расходомера. При использовании персональной ЭВМ с 4-ядерным процессором (8 виртуальных процессоров), 8 Гб ОЗУ, время полного расчета (для установившегося процесса по времени 0,1 с) одного варианта модели проточной части и тела обтекания на расчетной сетки до 2,2 млн ячеек занимало до 100 ч машинного времени, время расчета на суперкомпьютере «СКИФ-УРАЛ» (7 процессоров) – 28 ч. Наиболее оптимальным по используемым ресурсам (машинное время – точность моделирования) следует принять вариант с использованием расчетной сетки с 6 млн ячеек, модель турбулентности SST, при использовании максимального количества процессов суперкомпьютера. В то же время, отработка расчетных моделей для разных типоразмеров проточных частей может проводиться и на персональной ЭВМ с 4-ядерным процессором при использовании CFD пакета Cosmos Floworks.

Таблица 3

Параметры расчетов на суперкомпьютере

№	Количество элементов расчетной сетки	Время счета, ч	Количество используемых процессоров	Физическое время (время процесса), с.	Модель турбулентности	Средняя скорость потока по сечению в 30мм от тела обтекания, м/с.	Частота колебаний давления среды на поверхности крыла, Гц.	Частота колебаний суммарного давления, действующего на крыло, Гц.
1	18 млн (tetra)	90	60	0,0345	k-ε	64,00	2172	2172
2	6 млн (tetra, призматический слой, локальное измельчение)	26	128	0,0169	SST	63,68	2453	2392
3	2 млн (tetra, призматический слой)	28	7	0,0143	SST	64,34	2238	2252
4	2,2 млн (tetra)	100	4	0,1	k-ε	64,6	2165	2175

Выводы

1. Анализ полученных результатов в ANSYS CFX и Cosmos Floworks, указывает на удовлетворительное согласование результатов численного моделирования между собой и данными физического эксперимента. Относительная погрешность данных численного моделирования не превышает 9 %, при этом наибольшее совпадение получено на расчетной сетке, содержащей 6 млн ячеек и использующей SST-модель турбулентности (расхождения не более 2,4 %).

2. Сравнение данных численного и физического экспериментов показало удовлетворительное количественное совпадение. В качестве рабочей сетки рекомендовано принять сетку, содержащую 6 млн ячеек и использующую SST-модель турбулентности.

Литература / References

1. Von Karman T. [Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt]. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, ser. Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1911, pp. 509–517.

2. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справ. Л.: Машиностроение, 2004. 701 с. [Kremlevsky P.P. *Rashodomery i schetchiki kolichestv* (All Types of Flowmeters). Leningrad, Mashinostroenie, 2004. 701 p.]

3. Pankanin G.L., Kulinczak A., Berlinski J. [Investigations of Karman Vortex Street Using Flow Visualization and Image Processing]. *Sensors and Actuators*, 2007, iss. 138, pp. 366–375. DOI: 10.1016/j.sna.2007.05.005

4. Turner J.T., Popiel, C.O., Robinson D.I. [Evolution of an Improved Vortex Generator]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1993, iss. 4, pp. 249–259. DOI: 10.1016/0955-5986(93)90032-E

5. Zhang H.J., Huang Y.M., Sun Z.Q. [A Study of Mass Flow Rate Measurement Based on the Vortex Shedding Principle]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2006, iss. 17 (1), pp. 29–38. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2005.08.002

6. Pankanin G.L. [The Vortex Flowmeter: Various Methods of Investigating Phenomena]. *Measurement Science and Technology*, 2005, no. 16 (3), pp. 1–16.

7. Chaplin J.R. [Computer Model of Vortex Shedding from a Cylinder]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1973, pp. 155–165.

8. El Wahed A.K., Johnson M.W., Sproston J.L. Numerical Study of Vortex Shedding from Different Shaped Bluff Bodies. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1993, vol. 4, no. 4, pp. 233–240. DOI: 10.1016/0955-5986(93)90030-M

9. Hebrard P., Malard L., Strzelecki A. [Experimental Study of a Vortex Flowmeter in Pulsatile Flow Conditions]. *Flow Measurement Instruments*, 1992, no. 3, pp. 173–186. DOI: 10.1016/0955-5986(92)90033-2
10. Johnson W., Sproston J.L., Wahed A.E. Computation of flow in a vortex shedding flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1990, vol. 1, pp. 201–208.
11. Pankanin G.L., Berliński J., Chmielewski R. Simulation of Karman Vortex Street Development Using New Model. *Metrology & Measurement Systems*, 2006, vol. XIII (1), pp. 35–47.
12. Xiangdong Liu, Yongping Chen, Chengbin Zhang, Mingheng Shi, Yingli Hao. Numerical Study on Flow Patterns and Void Fraction Distribution in Gas-Liquid Two-Phase Flow in Horizontal Pipe under Different Gravities. *J. Chin. J. Space Sci.*, 2012, vol. 03, pp. 383–390.
13. Jan Y., Sheu J.T.W.H. A Numerical Confirmation of the Dual Body Vortex Flowmeter Design. *Comput. Fluids*, 2004, vol. 33, pp. 1157–1174. DOI: 10.1016/j.compfluid.2003.09.004
14. Pankanin, G.L. Experimental and Theoretical Investigations Concerning the Influence of Stagnation Region on Karman Vortex Shedding. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2007, pp. 55–57. DOI: 10.1109/IMTC.2007.379231
15. Cambier P., Vandermar S., Lavante E.V., Banaszak U., Krisch H., Tournillon S. Numerical and Experimental Study of Effects of Upstream Disturbance on Accuracy of Vortex-Shedding Flow Meter. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, 2009, vol. 1, pp. 15–18.
16. Benson R.A. The Optimization of Blockage Ratio for Optimal Multiple Bluff Body Vortex Flowmeters. *Proc. 4th Int. Symp. on Fluid Control, Fluid Measurement and Visualization FLUCOME'94*, 1994, pp. 887–891.
17. Kalkhof, H.G. Influence of the Bluff Body Shape on the Measurement Characteristics of Vortex Flowmeters. *Proc. Conf. on Metering of Petroleum and its Products*, 1985, pp. 45–56.
18. Cousins T., Foster S.A., Johnson P.A. A Linear and Accurate Flowmeter Using Vortex Shedding. *Proc. Power Fluid for Process Control Symposium*, 1973, pp. 45–56.
19. Lavante E.V., Perpeet S., Hans V., Poppen G. Optimization of Acoustic Signals in a Vortex-Shedding Flowmeter Using Numerical Simulation. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1999, no. 20, pp. 402–404. DOI: 10.1016/S0142-727X(99)00004-1
20. Sun Z.Q., Zhang H.J., Zhou J.M. Evaluation of Uncertainty in a Vortex Flowmeter Measurement. *Measurement*, 2008, no. 41 (4), pp. 349–356. DOI: 10.1016/j.measurement.2007.03.001

Шулев Игорь Станиславович, инженер НОЦ «Аэрокосмические технологии», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shulev.igor@mail.ru.

Сафонов Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, e-safonov@yandex.ru.

Поступила в редакцию 10 мая 2016 г.

DOI: 10.14529/engin160205

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF MODEL FOR INVESTIGATION OF GAS-DYNAMIC PROCESSES IN FLOW PART OF VORTEX FLOWMETER VIA NUMERICAL SIMULATION

I.S. Shulev, shulev.igor@mail.ru

E.V. Safonov, e-safonov@yandex.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper presents results of numerical modeling of flow of the vortex flowmeter for the three grids with different number of cells. The essence of the problem to be solved is to determine the influence of the number of grid cells for the geometry of the flow on the accuracy of the simulation results, and more specifically on the amplitude-frequency characteristics of a vortex

flowmeter. To resolve we use the comparison of numerical calculations for the three types of grids one running and one of the current regime. Numerical simulation of the flow of the vortex flowmeter with flow around the body in the form of a wing, carried out with the help of a supercomputer "SKIF-URAL" on the software ANSYS CFX and Cosmos Flow Simulation. To check the reproducibility calculations carried out on three types of grids containing 2 million. Cells, 6 million. And 18 million cells. The frequency of the oscillations of the vortices obtained by applying the method of frequency analysis based on Fourier expansion for the resulting pressure drop on the wing. Results are presented for the incompressible medium (water) as a dependency of the amplitude-frequency characteristics of the time. The dependence of the accuracy of the numerical simulation results, depending on the amount of grid cells. Analysis of the results indicates a satisfactory agreement between the results of numerical simulation and a data of experiment. Relative error data of numerical modeling does not exceed 9%, and the longest match is obtained on computational grid containing 6 million. Cell and using SST-turbulence model (difference of not more than 2.4%). Comparison of the data of numerical and physical experiments showed satisfactory quantitative agreement. As a working mesh is recommended to take a grid containing 6 million cells and using SST-turbulence model.

Keywords: vortex flowmeter, Karman vortex street, simulation of fluid, CFD, supercomputer.

Received 10 May 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шулев, И.С. Определение оптимальных параметров цифровой модели при исследовании гидродинамических процессов в проточной части вихревого расходомера с помощью методов численного моделирования / И.С. Шулев, Е.В. Сафонов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 43–51. DOI: 10.14529/engin160205

FOR CITATION

Shulev I.S., Safonov E.V. Determination of Optimal Parameters of Model for Investigation of Gas-Dynamic Processes in Flow Part of Vortex Flowmeter Via Numerical Simulation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 43–51. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160205