

# РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В БЕСФЛАНЦЕВЫХ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

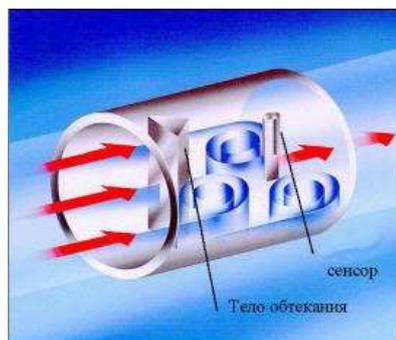
*Е.В. Сафонов, К.А. Бромер, В.А. Дорохов*

В работе изложены результаты по созданию виртуального стенда и отработке CFD моделей проточных частей бесфланцевых расходомеров на суперкомпьютере «Горнадо ЮУрГУ». Представлена структура виртуального стенда для проведения параметрических расчетов. Представлены результаты численного моделирования течения в проточной части бесфланцевого вихревого расходомера для сжимаемой (воздух) и несжимаемой среды (вода).

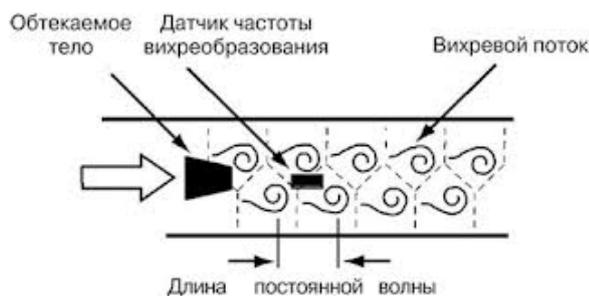
*Ключевые слова:* вихревой расходомер, тело обтекания, дорожка кармана, моделирование внутренних течений, виртуальный стенд, кластер, CFD

## Введение

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



а) схема проточной части



б) схема образования вихрей

**Рис. 1.** Проточная часть вихревого расходомера

Вихревые расходомеры предназначены для измерения объемного расхода жидких или газообразных сред. Принцип действия вихревого расходомера основан на зависимости частоты срыва вихрей с поверхности плохообтекаемого 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.

Особенность исследования заключается в том, что разрабатываются и анализируются модели бесфланцевых расходомеров, имеющих ступенчатый и конусный переход с

большого диаметра подводящего трубопровода на диаметр проточной части расходомера (рис. 2, 3).

Для отработки и поверки расходомеров в настоящее время применяются 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 является крайне дорого и трудозатратно, поэтому стоимость проливной поверки достаточно высока и сопоставима с ценой самого расходомера.

Задача по отработке конструкции вихревого расходомера может быть решена с помощью виртуального испытательного стенда (ВИС). Идея виртуального стенда позволяет решить вопрос об использовании суперкомпьютеров для решения сложных задач инженерного моделирования путем аренды вычислительных и программных ресурсов в режиме удаленного доступа у центров коллективного пользования. В случае использования ВИС конечному пользователю посредством Интернет предоставляется специализированный графический интерфейс, предназначенный для задания параметров вычислительных моделей, запуска вычислений на кластере и отображения результатов расчета.

В данной статье рассматривается технология виртуального испытательного стенда для численного моделирования гидродинамических процессов в вихревых расходомерах с помощью Ansys CFX. В разделе 1 рассматривается расчетная модель расходомера, описывается интерфейс и схема организации передачи файлов. В разделе 2 приводится сравнение экспериментальных данных численного и физического эксперимента. В заключении делается вывод о значимости использования виртуального испытательного стенда и о точности расчетов.

## 1. Технология виртуального испытательного стенда

Для создания ВИС использовались технологии, обеспечивающие автоматизированную генерацию проблемно-ориентированных сервисов на основе оболочки CAEVan и позволяющих использовать программные системы для инженерного проектирования и анализа в распределенных вычислительных средах [1, 2]. Данная технология представляет собой комплекс моделей, методов и алгоритмов, направленных на автоматизированное создание иерархий распределенных проблемно-ориентированных оболочек для работы с CFD пакетами на основе сервисно-ориентированного подхода и концепции облачных вычислений.

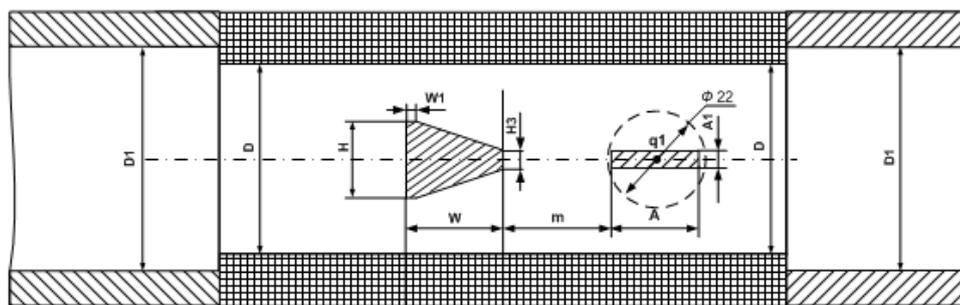


Рис. 2. Эскиз проточной части бесфлацевого расходомера со ступенчатым входом

Проблемно-ориентированная оболочка САЕВеап представляет собой клиентский графический интерфейс, в котором пользователь может задавать параметры моделируемого процесса, посредством доступа через каналы сети интернет, защищенных системой аутентификации пользователей и шифрованием передаваемых данных.

При этом для работы с проблемно-ориентированной оболочкой не требуется установки какого-либо программного обеспечения на компьютер пользователя, поскольку для этого достаточно стандартного интернет-обозревателя. На рис. 4 представлены элементы графического интерфейса ВИС по расчету бесфланцевых расходомеров.

В ходе выполнения работ было разработано три вычислительных сервиса различного назначения:

- вычислительный сервис для экспериментов на воде;
- вычислительный сервис для экспериментов на воздухе;
- вычислительный сервис для прямого доступа к решателю ANSYS CFX.

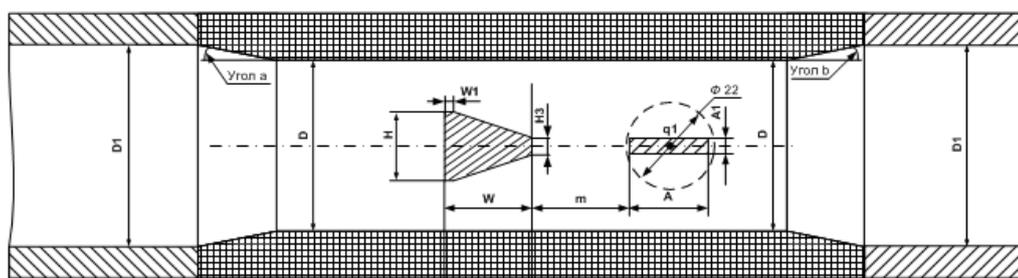


Рис. 3. Эскиз зауженной проточной части бесфланцевого расходомера

Графический интерфейс позволяет задавать геометрические размеры всех внутренних частей проточной камеры, а также их расположение друг относительно друга также следующие параметры CFD расчета: давление среды (Па); скорость среды (м/с); количество шагов расчета; продолжительность каждого шага (с); модель турбулентности (SST,  $k-\epsilon$ ; максимальное количество итераций на один шаг; минимальное количество итераций на один шаг; критерий сходимости; продолжительность реального времени процесса моделирования).

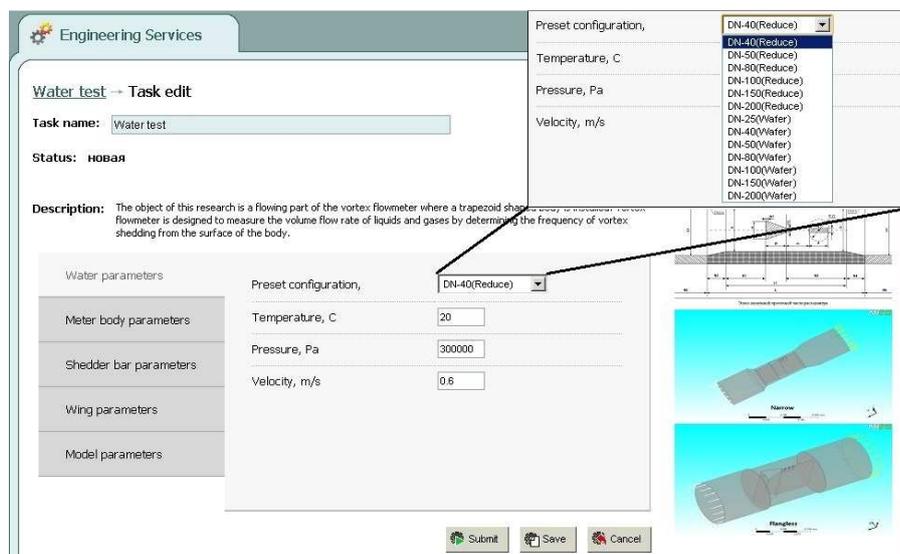


Рис. 4. Интерфейс вычислительного сервиса по воде. Параметры среды

Процесс компьютерного моделирования турбулентных течений в проточной части вихревого расходомера осуществляется в CFD-пакете Ansys CFX, поэтому для создания виртуального испытательного стенда с проблемно-ориентированной оболочкой реализовано автоматическое построение геометрии и расчетной сетки в соответствии с заданными параметрами и запуск процесса моделирования.

Для автоматизации обозначенных процессов были разработаны параметризованные шаблоны геометрии (SolidWorks), расчетной сетки (ICEM CFD) и сценарии (Shell script), выполняющие действия по обновлению геометрии и построению расчетной сетки. Схема, представленная на рис. 5, работает следующим образом.

На основе шаблона геометрии \*.sldprt, файла сценария и параметров геометрии в соответствии с эскизом (см. рис. 2, 3) запускается процесс генерации выбранной геометрии с последующим сохранением ее в формате ParaSolid в файлы InOut.x\_b и flowmeter\_geometry.x\_b. Данное действие выполняет SolidWorks.

На основе файла геометрии (flowmeter\_geometry.x\_b – расходомер, InOut.x\_b – входной, выходной участок) и сценария построения расчетной сетки (mesh.rpl, inout.rpl) в модуле ICEM производится построение новой расчетной сетки с сохранением в файл формата \*.cfx5 (flowmeter.cfx5, inout.cfx5).

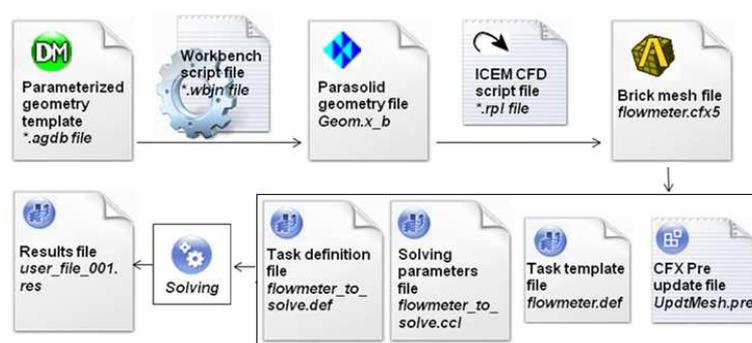


Рис. 5. Схема процесса автоматизации в ВИС

В программный модуль Ansys CFX Pre подгружается шаблон CFD модели flowmeter.def, в который с помощью скрипта update\_mesh.pre импортируется новая расчетная сетка и задаются параметры модели.

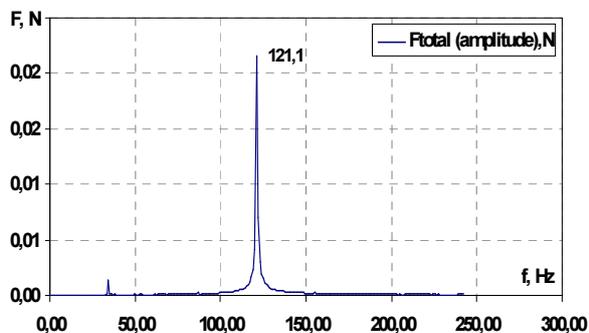
В файле flowmeter.def заранее указан тип среды: вода или воздух. В результате работы данного блока образуются файл постановки задачи flowmeter\_to\_solve.def и файл настроечных параметров flowmeter\_to\_solve.ccl, в котором внешней консольной программой прописываются значения параметров расчета. Далее запускается сценарий расчета на основе сгенерированного def файла на узлах суперкомпьютера.

Все дальнейшие обращения к суперкомпьютеру производятся через сервер распределенных расчетов Unicore 6.3.

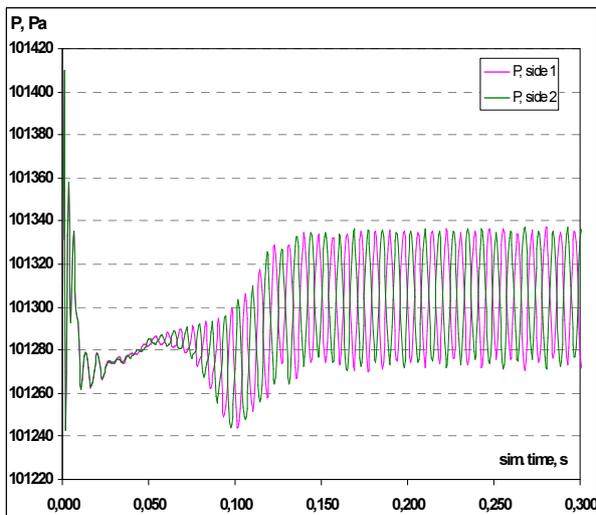
## 2. Результаты тестирования ВИС

В данной статье отображены результаты расчетов с использованием ВИС для расходомера Ду50 при продувке воздухом. Сравнение результатов численного моделирования гидродинамических процессов в проточной части расходомера с результатами натуральных испытаний приведены на рис. 8.

В ходе исследования определялись частота и амплитуды пульсаций давления в потоке за телом обтекания (рис. 6, 7), зависимости для безразмерных чисел Струхалия и Рейнольдса (рис. 8).



**Рис. 6.** Спектр результирующей силы, действующей на сенсор ДУ 50

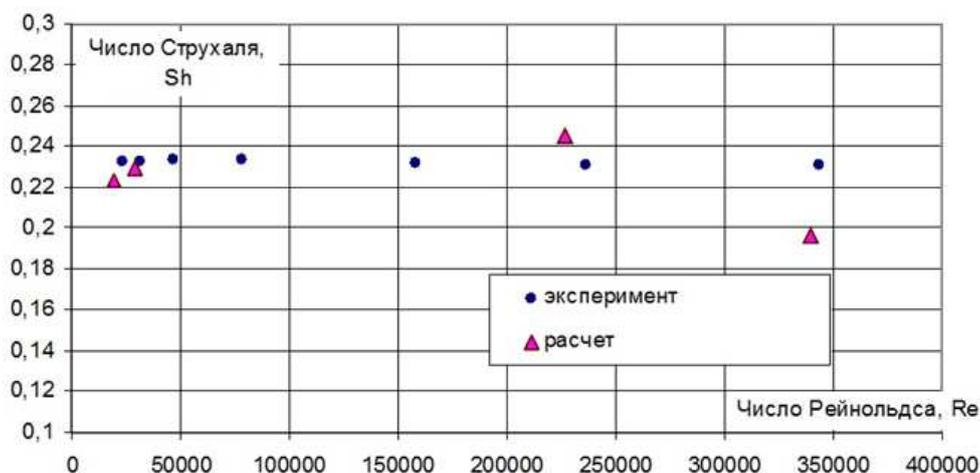


**Рис. 7.** Реализация во времени статического давления с двух сторон сенсора ДУ 50

Результаты моделирования процессов в проточной части расходомеров представлялись интегральными параметрами в виде частоты колебаний давления, графиков изменения давления во времени, графиков спектров частот пульсаций давления, а также зависимостями числа Струхалия ( $Sh$ ) от числа Рейнольдса ( $Re$ ), рассчитанными по параметрам потока перед телом обтекания как

$$Sh = \frac{f \cdot H}{V_{cp}} \quad \text{и} \quad Re = \frac{V_{cp} \cdot D}{\nu},$$

где  $f$  – частота генерации вихрей,  $H$  – поперечный размер тела обтекания;  $\nu$  – кинематическая вязкость при температуре среды;  $D$  – диаметр проточной части;  $V_{cp}$  – осредненная скорость по сечению.



**Рис. 8.** Зависимость безразмерной частоты пульсаций ( $Sh$ ) от числа Рейнольдса ( $Re$ ) для проточной части ДУ50 для численного и физического экспериментов

В результате численного моделирования установлено, что устойчивый вихревой след с приемлемой амплитудой давления генерировался телом обтекания для всего диапазона рабочих величин  $Re$ .

## Заключение

Статья посвящена проблеме сокращения затрат на разработку новых или модернизацию существующих вихревых расходомеров путем использования программного обеспечения, реализующего моделирование гидрогазодинамических процессов в многомерной постановке (CFD-технология) с привлечением вычислительных возможностей современных многопроцессорных вычислительных устройств.

Предложено решение этой проблемы за счет создания ВИС, привлечения суперкомпьютера и CFD пакетов. С помощью ВИС проведено численное моделирование гидродинамических процессов в проточной части бесфланцевого вихревого расходомера, а также выполнены физические проливки расходомеров на стенде.

Сравнение данных численного и физического экспериментов показало удовлетворительное количественное совпадение. Относительная погрешность численного моделирования составляет не более  $\pm 8,0$  % для крайних точек интервала скоростей потока и не более  $\pm 5$  % для середины диапазона скоростей потока.

Таким образом, применение ВИС с программным обеспечением CFD, реализующего моделирование гидрогазодинамических процессов в проточной части расходомера, позволяет сократить затраты на создание и модернизацию вихревых расходомеров при разработке и серийном производстве.

В качестве направлений будущих исследований целесообразно сосредоточится на оптимизации расчетной сетки цифровых 3D-моделей при моделировании гидрогазодинамических процессов, сокращении машинного времени при моделировании гидрогазодинамических процессов в вихревых расходомерах, модернизации интерфейса виртуального испытательного стенда, оптимизации процедур и процессов взаимодействия виртуального стенда с CFD программой ANSYS CFX при запуске расчетов через удаленный доступ.

*Работа выполнена по государственному заданию в рамках тематического плана исследований ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) № 7.5141.2011/01201255644.*

## Литература

1. Kesselman, C. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations / C. Kesselman, I. Foster, S. Tuecke // International Journal of Supercomputer Applications and High Performance Computing. — 2001. — Vol. 15. — №. 3. — P. 200–222.
2. Радченко Г.И. Методы организации грид-оболочек системного слоя в технологии CAEBeans / Г.И. Радченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». — 2008. — № 15 (115), Вып. 1. — С. 69–80.

Сафонов Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой двигателей летательных аппаратов, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), e-safonov@yandex.ru.

Бромер Константин Александрович, инженер кафедры двигателей летательных аппаратов, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), bromer75@mail.ru.

Дорохов Валентин Александрович, программист Суперкомпьютерного центра, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), dorohovv85@mail.ru

## DEVELOPMENT OF VIRTUAL TEST BENCH FOR CFD IN FLANGELESS VORTEX FLOWMETER WITH APPLICATION OF HIGH-PERFORMANCE COMPUTING

*E. V. Safonov*, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

*K.A. Bromer*, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

*V.A. Dorokhov*, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation).

This paper describes results of development of virtual test bench and using of CFD models for inner part of flangeless vortex flowmeter for virtual test bench running on Tornado SUSU supercomputer. The structure of virtual test bench is presented. The results of numerical simulation of flow (air and water) in inner part of flangeless vortex flowmeter are introduced.

*Keywords:* vortex flowmeter, blunt body, Karman vortex street, simulation of fluid, virtual bench, cluster, CFD

### References

1. Kesselman C., Foster I., Tuecke S. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations // International Journal of Supercomputer Applications and High Performance Computing. 2001. Vol. 15. № 3. P. 200–222.
2. Radchenko G.I. Methodi organizacii grid-tehnologii systemnogo sloya v tehnologii CAEBeans [Methods of organization grid- cloud of system in CAEBeans technology]. Vestnik Yuzho-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye" [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2008. No. 15(115). Issue 1. – P.69 – 80.

*Поступила в редакцию 11 октября 2013 г.*