

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ НАСОСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СЛОЖНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «ЖИДКОСТЬ-КОНСТРУКЦИЯ»

Н.В. Безлепкин

ОАО «ЦКБМ», г. Санкт-Петербург, Россия

Введение

Развитие методов численного моделирования и повышение производительности ЭВМ в последние годы открывает все больше возможностей для решения самых сложных инженерных задач. С развитием CAE-пакетов открылись новые возможности к всестороннему анализу влияния физических процессов на проектируемую конструкцию.

Одним из перспективных направлений такого развития видится проведение многодисциплинарных расчетов.

ОАО «ЦКБМ» входит в число лидирующих поставщиков насосного и дистанционно управляемого оборудования для объектов использования атомной энергии российских и международных проектов. Выпускаемая продукция должна отвечать самым высоким требованиям в части безопасности, надежности и эффективности, при этом иметь низкую металлоемкость и себестоимость. Внедрение новых расчетных методик с целью оптимизации конструкций производимого оборудования позволяет вывести процесс проектирования такого оборудования на качественно новый уровень, а учитывая номенклатуру выпускаемой продукции, совместное решение прочностной и гидродинамической задач является приоритетной целью.

Учет сложного взаимодействия «жидкость-конструкция» требуется при моделировании целого ряда задач. Сложность совместной постановки прочностной и гидродинамической задачи заключается в различии расчетных областей и подходов к дискретизации уравнений.

Далее по тексту рассмотрена возможность численного моделирования течения в проточной части осевого насоса в программном комплексе [FlowVision HPC](#) с последующей передачей нагрузок в программный комплекс прочностного анализа ANSYS.

Описание конструкции

Рассматриваемая конструкция представляет собой главный циркуляционный насос – вертикальный агрегат, в состав которого входят насос с лопастной системой осевого типа, предназначенный для обеспечения циркуляции жидкометаллического теплоносителя. Направление движения теплоносителя через насос – сверху вниз, выход из направляющего аппарата насоса – осевой.

Меридианное сечение пространственной модели насосной части представлено на рис. 1.

Гидравлическая часть предназначена для обеспечения необходимых параметров потока теплоносителя. Она состоит из входного направляющего аппарата, осевого РК и выходного направляющего аппарата.

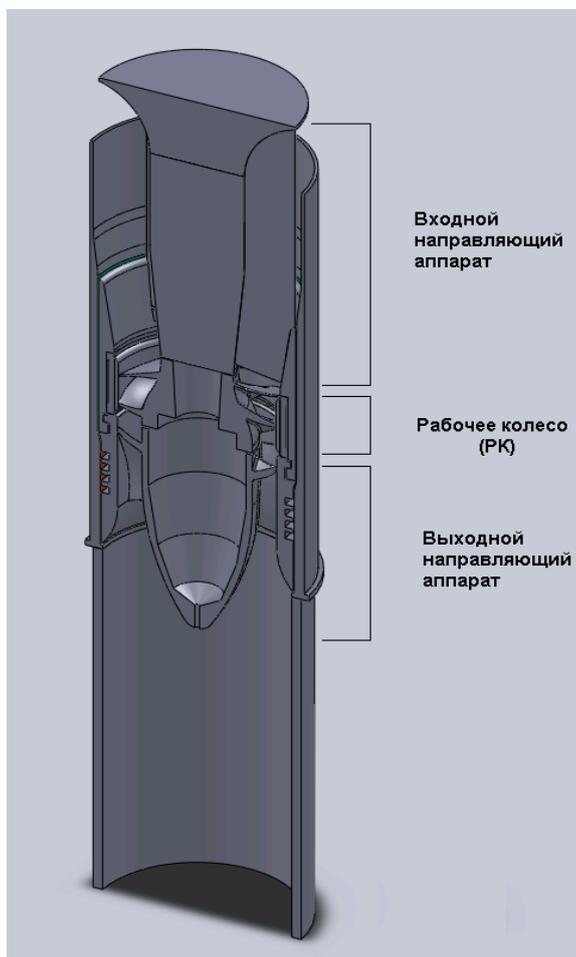


Рис. 1 – Меридианное сечение пространственной модели насосной части

Методика расчета

При проведении совместного прочностного и гидродинамического расчета возникают сложности, связанные с разностью как в постановке задачи в части различия расчетных областей, так и в подходе к дискретизации уравнений.

Моделирование течения жидкости в рамках проточной части насоса выполнено средствами программного комплекса FlowVision HPC.

Прочностная часть задачи представляет собой расчет напряженно-деформированного состояния рабочего колеса насоса. При этом исходными данными для такого расчета, помимо геометрии расчетной модели, являются динамические нагрузки, полученные в узлах конечно-элементной сетки на поверхности рабочего колеса в результате решения гидродинамической задачи.

Для удобства и большей информативности прочностную и гидродинамическую часть задачи рассмотрим последовательно.

Постановку задачи в части построения расчетной модели рассмотрим совместно.

Общая структура совместного прочностного и гидродинамического расчета представлена на рис. 2.

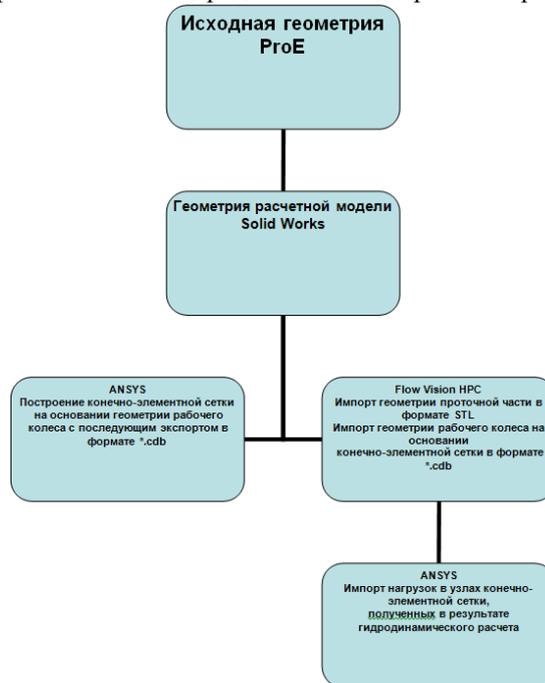


Рис. 2 – Общая структура совместного прочностного и гидродинамического расчета

Построение расчетной модели. Solid Works

Solid Works, в условиях поставленной задачи, используется для построения геометрической модели проточной части ГЦНА. Конструкторская модель импортируется в SW в формате parasolid.xt и включает в себя проточную часть насоса и рабочее колесо (ротор). Проблемы, возникающие при экспорте из ProE, заключаются в невозможности распознать исходную геометрию средствами Feature Works, и, как следствие, в отсутствии твердотельной геометрии. Импортированная геометрия представлена набором поверхностей. Учитывая идентичность геометрического ядра SW и FlowVision HPC, необходимым для постановки задачи является получение твердотельной модели, полностью распознанной Feature Works. Так же необходимо учитывать взаимное расположение рабочего колеса и статорной части для корректного размещения указанной геометрии при постановке гидродинамической задачи.

Для создания полноценной расчетной модели требуется практически полное ее перестроение, производимое в несколько этапов:

- В SW создается расчетная модель, на основании импортированной исходной геометрии проточной части и перестраивается до получения твердотельной модели.
- В SW создается расчетная модель, на основании импортированной исходной геометрии рабочего колеса и перестраивается до получения твердотельной модели.
- В SW создается сборка, представляющая собой как роторную, так и статорную часть агрегата. В ней определяется взаимное положение ротора и статора и общая система координат.
- При погашенной статорной части, производится экспорт геометрии рабочего колеса в формате parasolid.xt.
- Путем вычитания геометрии проточной части насоса из твердого тела, размерами превышающими размеры агрегата, получен объем жидкости, заключенной в рамках описанной конструкции.

На рис. 3 показана расчетная модель, представляющая собой объем жидкости, заключенной в рамках описанной конструкции.

Построение расчетной модели. ANSYS

Построение расчетной модели рабочего колеса и построение конечно-элементной сетки, основанной на полученной геометрии, производится средствами ANSYS. При этом в ANSYS импортируется геометрия рабочего колеса в формате parasolid.xt, перестроенная средствами SW.

Расчетная модель рабочего колеса разбита на конечные элементы типа SOLID87 (трехмерные, четырехгранные, 10-ти узловые).

Указанный тип конечного элемента выбран исходя из необходимости передачи конечно-элементной сетки в программный комплекс FlowVision HPC в формате *.cdb.

Сгенерированный ANSYS *.cdb файл несет в себе информацию о типе конечного элемента, номерах и координатах узлов конечно-элементной сетки.

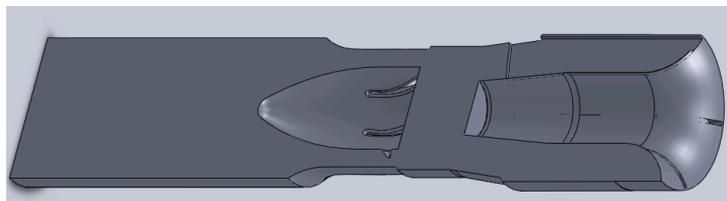


Рис. 3 – Расчетная модель, представляющая собой объем жидкости, заключенной в рамках описанной конструкции

На этом этапе, помимо всего прочего, необходимо обеспечить импорт системы координат и соответствие масштабов. На рис. 4 представлена расчетная модель рабочего колеса.

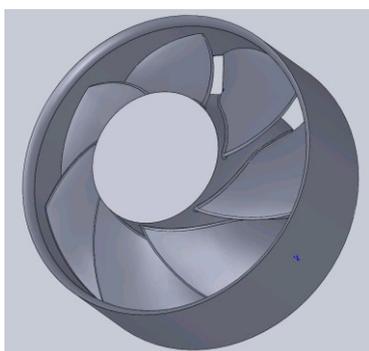


Рис. 4 – Расчетная модель рабочего колеса

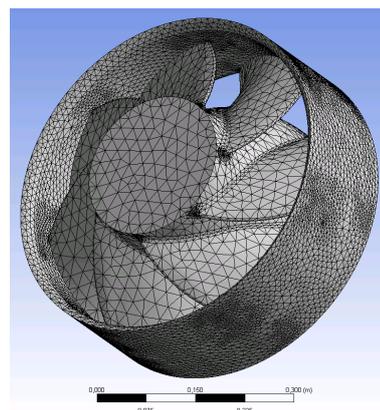


Рис. 5 – Конечно-элементная модель рабочего колеса

На рис.5 представлена конечно-элементная модель рабочего колеса.

Постановка задачи. FlowVision HPC

Расчетная модель проточной части, представляющая собой объем жидкости, заключенный в рамках указанной конструкции, импортируется в программный комплекс FlowVision HPC в формате STL.

Расчетная модель рабочего колеса, содержащая информацию о конечно-элементной сетке, построенной средствами Workbench, импортируется в программный комплекс FlowVision HPC в формате *.cdb в качестве импортированного объекта. На его основании создается подвижное тело, моделирующее вращение рабочего колеса.

Т.к. при построении обеих моделей использовалась общая система координат, взаимное расположение роторной и статорной частей сохраняется.

На этом этапе важно проверить геометрию и подвижные тела на самопересечения.

Расчетная модель гидродинамической задачи представлена на рис. 6.

После успешного импорта геометрии расчетной модели в программный комплекс FlowVision HPC, производится постановка задачи в части определения ГУ, физических переменных и параметров расчета.

Прежде всего, определим опорные величины – температуру и давление перекачиваемой среды.

Несмотря на специфический состав перекачиваемой среды, все основные параметры и свойства (такие как молярная масса, плотность, вязкость и т.д.) определяются через интегрированный в FlowVision редактор базы веществ.

Важным для постановки задачи является параметр угол группировки, определяющий количество групп в регионах. Впоследствии, объединим имеющиеся группы на основании граничных условий и исходных данных.

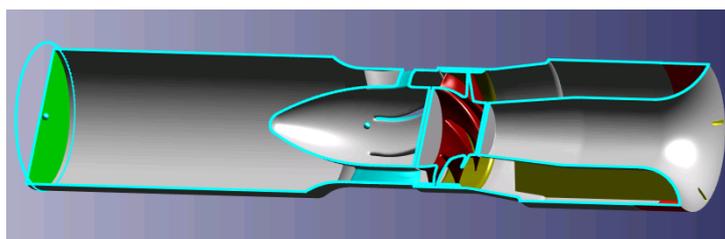


Рис. 6 – Расчетная модель гидродинамической задачи

В исходной конструкции существует ряд областей – узкие кольцевые полости, щели и т.п., геометрические размеры которых не позволяют качественно разрешать их расчетной сеткой. Для ускорения расчета и уменьшения размерности задачи в таких областях используется модель зазора, позволяющая существенно экономить вычислительные ресурсы.

На рис. 7 представлен регион, с геометрией, объединенной в группы на основании граничных условий.

После того как треугольники объединены в соответствующие группы по углу группировки, количество и геометрия этих групп удовлетворяют потребностям расстановки граничных условий на треугольниках, перейдем к определению и расстановке непосредственно ГУ.

На основании анализа конструкции и требований к расчетной сетке, выделены следующие ГУ:

1. Стенка – моделирует стенки конструкции
2. Вход – моделирует вход в насос, на входе задается нулевое, относительно опорного, давление.
3. Выход – моделирует поперечное сечение напорного патрубка, на выходе задается нормальная массовая скорость с отрицательным знаком.
4. Колесо – моделирует внешний бандаж рабочего колеса. Уровень адаптации 2, слоев ячеек 6.
5. Лопатки колеса – моделирует лопатки рабочего колеса. Уровень адаптации 2, слоев ячеек 6.
6. Лопатки статора. Уровень адаптации 2, слоев ячеек 4.
7. Лопатки на входе. Уровень адаптации 2, слоев ячеек 4.

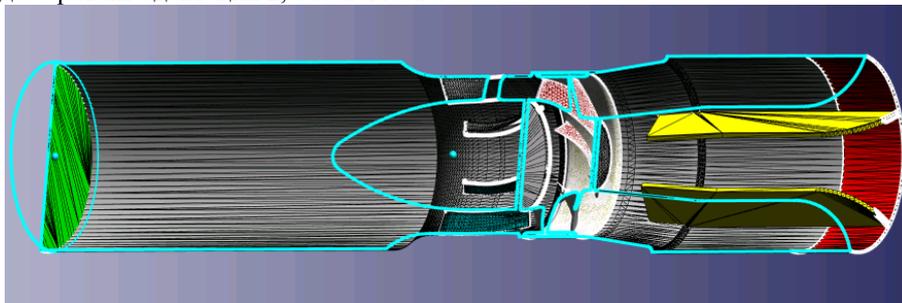


Рис. 7 – Регион, с геометрией, объединенной в группы на основании граничных условий

Таким образом, все граничные условия расставлены, а задания параметра адаптации позволяет разрешать сетку в особо критичных местах.

Отдельно остановимся на начальной сетке, т.к. качество ее построения существенно сказывается на сходимости решения и получаемых результатах. Сильное измельчение сетки негативно сказывается как на размерности задачи, так и на времени счета и шаге по времени. Грубая сетка может давать нефизичные результаты. Интегрированный в FlowVision редактор начальной сетки позволяет сгенерировать начальную сетку, сгустив ее в критичных местах, а определенный в ГУ параметр адаптации позволит построить расчетную сетку, удовлетворяющую условиям поставленной задачи.

На рис. 8,9 представлена начальная и расчетная сетка в меридиональном сечении агрегата.



Рис. 8 – Начальная сетка в меридиональном сечении агрегата

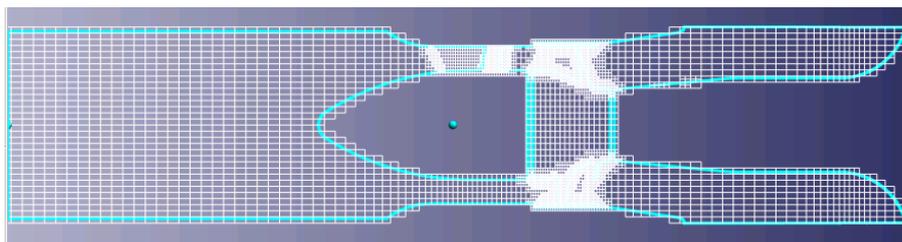


Рис. 9 – Расчетная сетка

Использование редактора начальной сетки и включения в ГУ параметров адаптации существенно упрощает создание расчетной сетки, отвечающей требованиям поставленной задачи, а использования модели зазора позволяет существенно экономить вычислительные ресурсы.

После того как в среду программного комплекса FlowVision HPC была успешно импортирована расчетная модель проточной части и геометрия рабочего колеса вместе со сгенерированной Workbench конечно-элементной сеткой, определены граничные и начальные условия, и построена начальная расчетная сетка необходимо настроить параметры расчета.

Управление расчетом производится из вкладки «Солвер». Здесь необходимо определить шаг по времени.

Исходя из условий поставленной задачи, а так же учитывая сложную геометрию проточной части и наличие в задачи подвижного тела в виде ротора (рабочего колеса), шаг по времени задан числом CFL. При этом конвективное CFL задано равным 50, а поверхностное равным 0,5. Такие значения конвективного и поверхностного числа CFL позволяют избежать нефизичных результатов, связанных с изменением объема расчетной ячейки в связи с попаданием в этот объем твердого тела.

Здесь же можно установить ограничения для расчета по абсолютным величинам переменных, что в некоторых случаях ускоряет сходимость решения.

Для получения прочностных нагрузок в узлах конечно-элементной сетки ротора используется вкладка «Экспорт нагрузок». На данном этапе необходимо определить параметры экспорта, а конкретнее, геометрию, на которой требуется получить искомые величины.

Полученные результаты сохраняются в текстовый файл, содержащий информацию об узлах, их координатах и прочностных нагрузках в узлах. Импорт нагрузок в ANSYS происходит после доработки строк в файле необходимой служебной информацией. В ходе выполнения данного расчета были выявлены проблемы, касающиеся содержания текстового файла, а конкретнее нулевые нагрузки в узлах конечно-элементной сетки.

В настоящее время данная проблема решается разработчиками и будет доступна в ближайшей версии FlowVision HPC 3.08.02.

Результаты гидродинамического расчета

В результате проведенного средствами программного комплекса FlowVision HPC гидродинамического расчета проточной части получены векторные поля скоростей, давлений и линии тока жидкости по всему объему расчетной области.

Полученные результаты дают представления о качественной картине течения и позволяют количественно оценить распределение искомых переменных в пределах расчетной модели.

Помимо прочего, получено поле распределения давлений по поверхности рабочего колеса, что позволяет перейти к решению прочностной задачи.

Результаты гидродинамического расчета проточной части представлены на рис. 10 – 16.

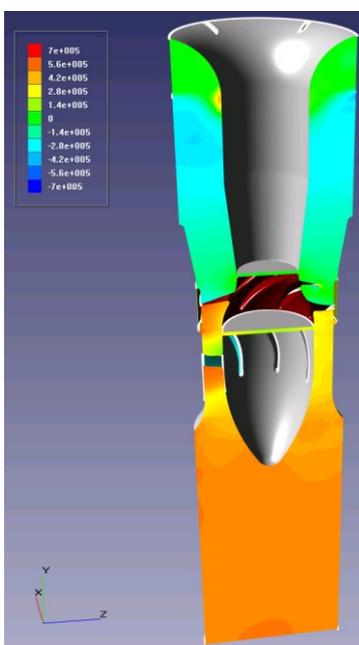


Рис. 10 - Поле давлений в меридиональном сечении агрегата

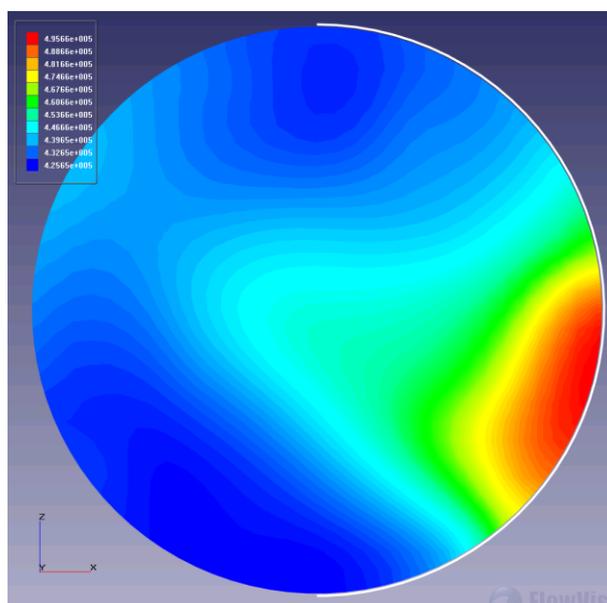


Рис. 11 – Поле давлений в сечении агрегата по диаметру напорного патрубка

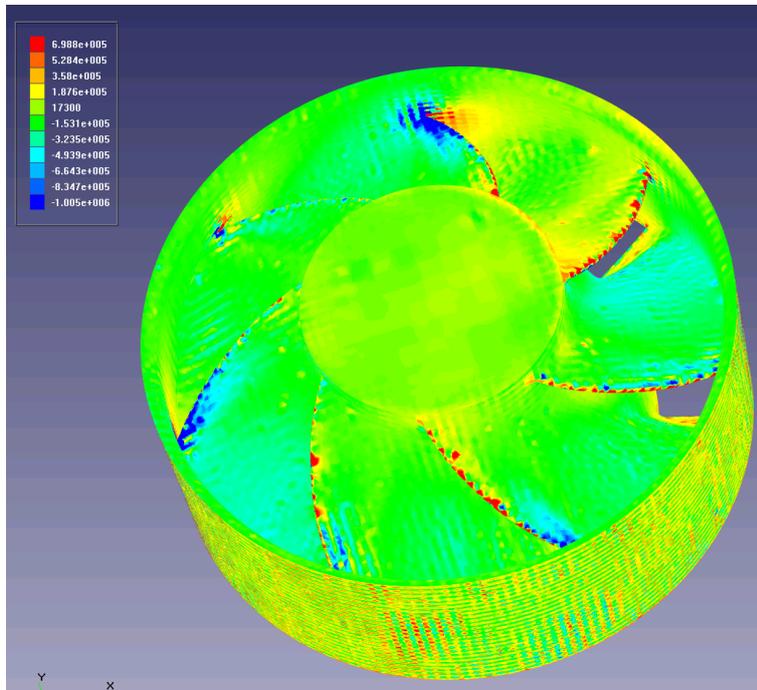


Рис. 12 – Поле давлений по поверхности лопаток рабочего колеса

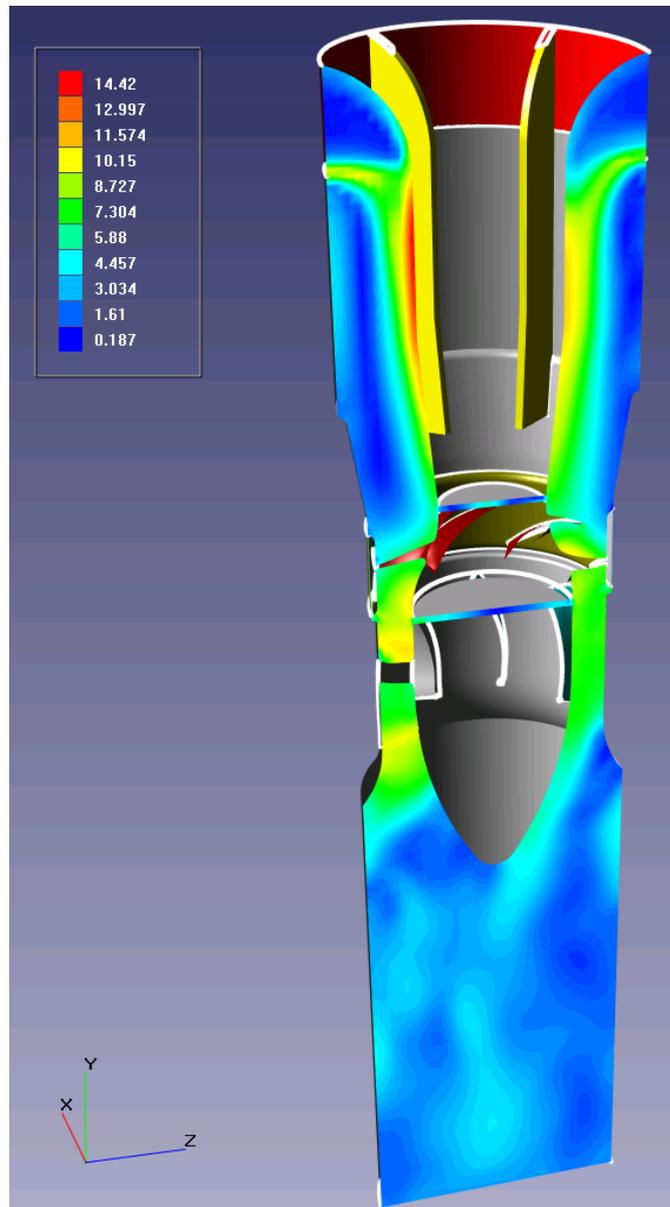


Рис. 13 – Поле скоростей в меридиональном сечении агрегата

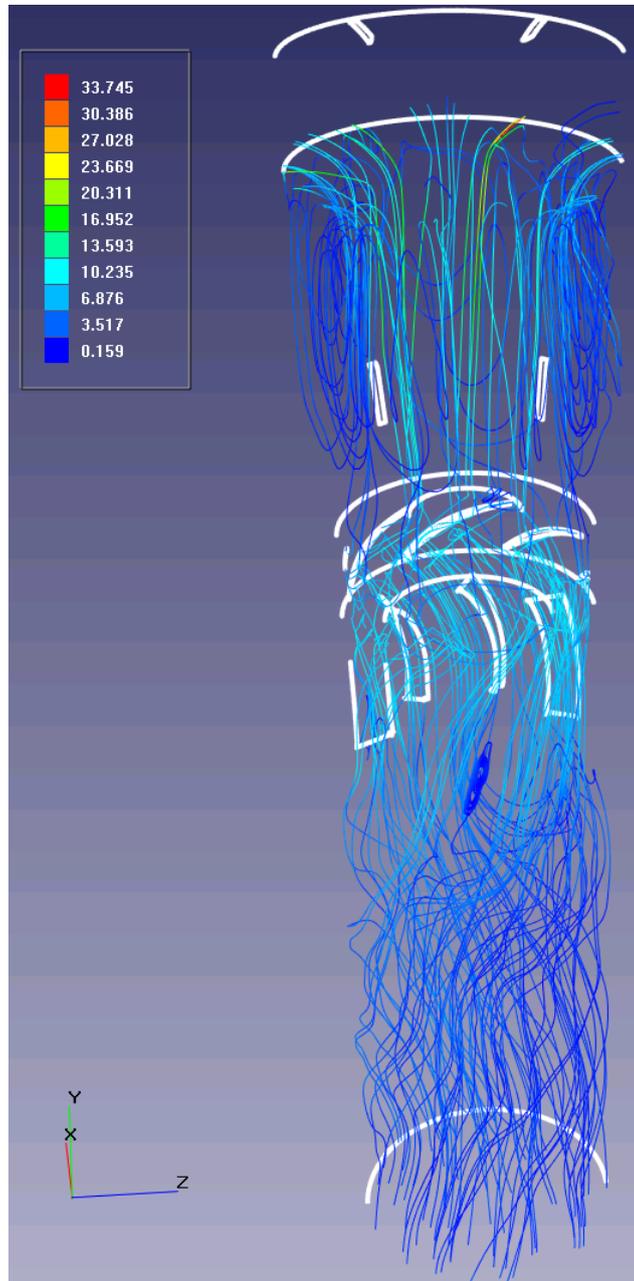


Рис. 14 – Линии тока рабочей среды в рамках описанной конструкции

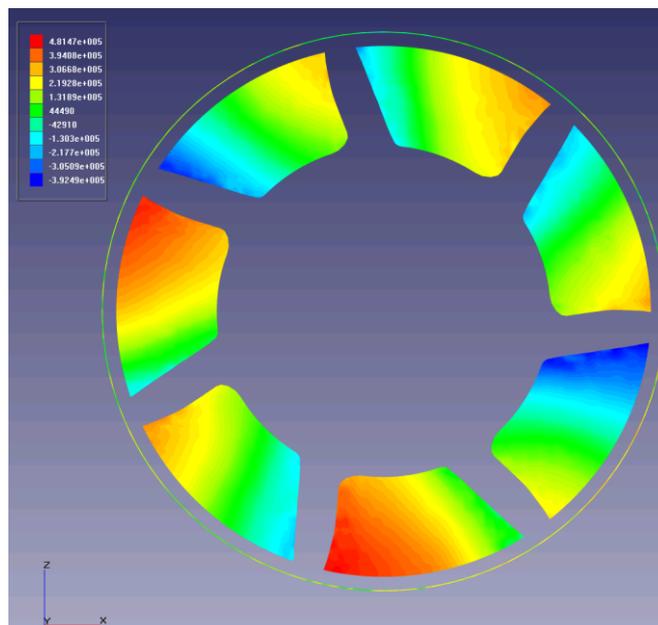


Рис. 15 – Поле давлений в продольном сечении рабочего колеса

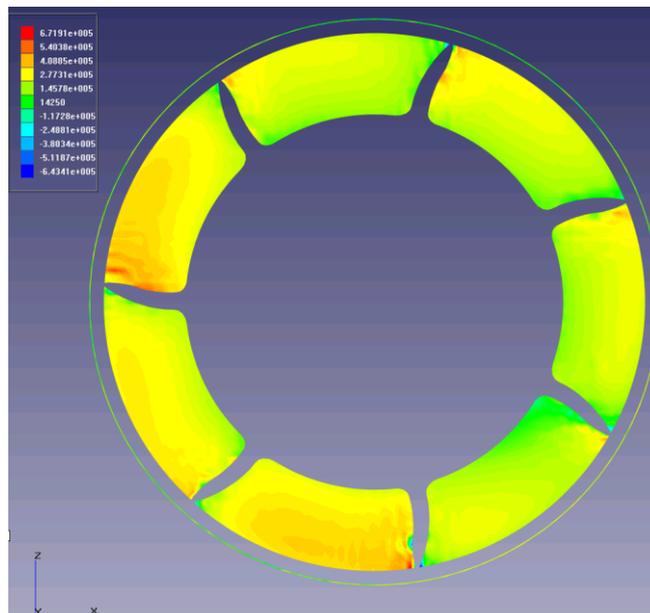


Рис. 16 – Поле давлений в продольном сечении рабочего колеса (2)

Постановка задачи. ANSYS

Полученные в результате гидродинамического расчета данные, дают представление о сформировавшемся в рамках исходной конструкции режиме течения.

Полученное на поверхности рабочего колеса поле давлений свидетельствует о наличии сильного взаимодействия «жидкость-конструкция».

Качественное и количественное описание такого взаимодействия основывается на прочностном анализе конструкции ротора. Распределение давлений по поверхности рабочего колеса является граничным условием для прочностного анализа.

Для экспорта нагрузок из программного комплекса FlowVision HPC в прочностной пакет ANSYS может быть проведена как в автоматическом режиме (непосредственная передача нагрузок на узлы конечно-элементной сетки путем редактирования текстового файла, генерируемого FlowVision под синтаксис ANSYS), так и в ручном (задание нагрузок на поверхности рабочего колеса в соответствии с картиной распределения давления).

В настоящий момент возможность передачи нагрузок в автоматическом режиме невозможна и будет реализована в следующей версии FlowVision HPC.

В связи с этим, задание нагрузок производится в ручном режиме, что снижает точность прочностного анализа, однако позволяет качественно оценить возникающие в рамках рабочего колеса напряжения. При задании нагрузок указанным способом, удобным оказалось задание параметра непрозрачности для соответствующего диапазона переменной.

На рис. 17 показано задание нагрузок в ручном режиме.

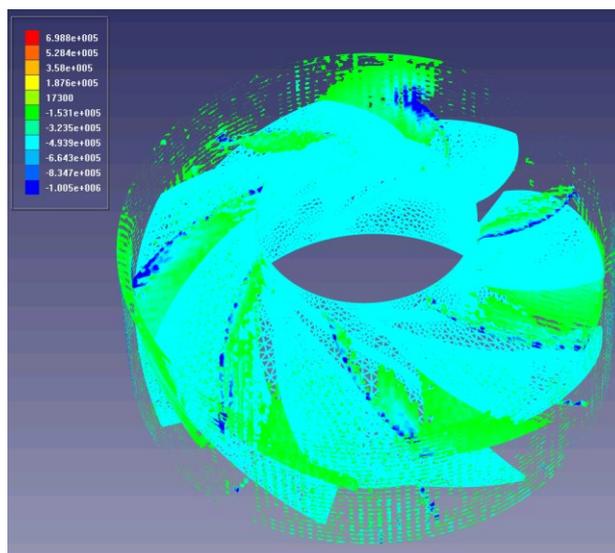


Рис. 17 – Задание нагрузок в ручном режиме

Результаты прочностного расчета

Расчетная модель рабочего колеса разбитая конечно-элементной сеткой построена на этапе постановки гидродинамической задачи.

После определения свойств материалов конструкции и задания граничных условий, полученных в результате гидродинамического расчета, постановка задачи в ANSYS завершена.

Результаты прочностного расчета представлены на рис. 18 – 20.

На рис. 18 представлено поле статических деформаций рабочего колеса.

На рис. 19 представлено поле статических узловых перемещений рабочего колеса.

На рис. 20 представлена интенсивность статических узловых напряжений рабочего колеса.

Заключение

В данном докладе описана методика проведения совместного прочностного и гидродинамического расчета средствами программных комплексов FlowVision HPC и ANSYS, от подготовки расчетных моделей до получения конкретных результатов.

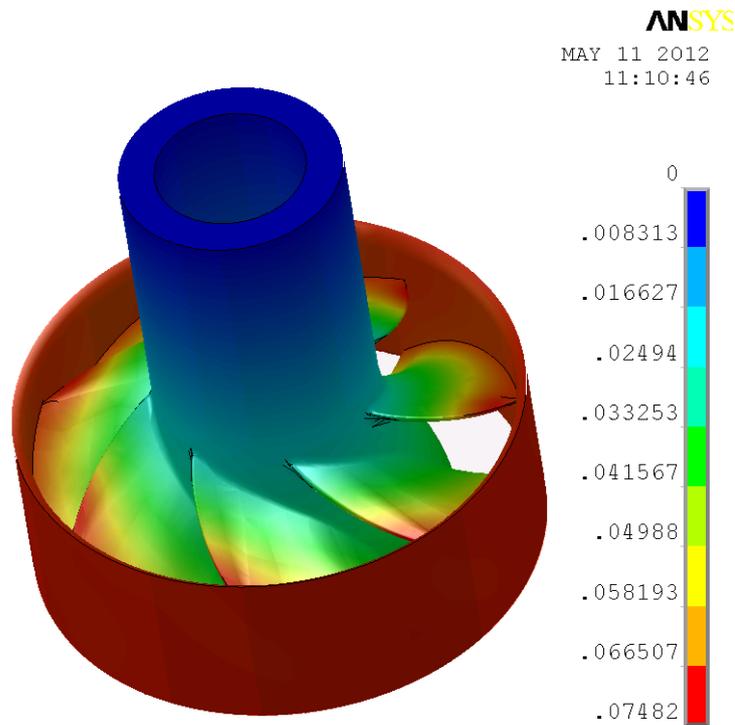


Рис. 18 – Поле статических деформаций рабочего колеса

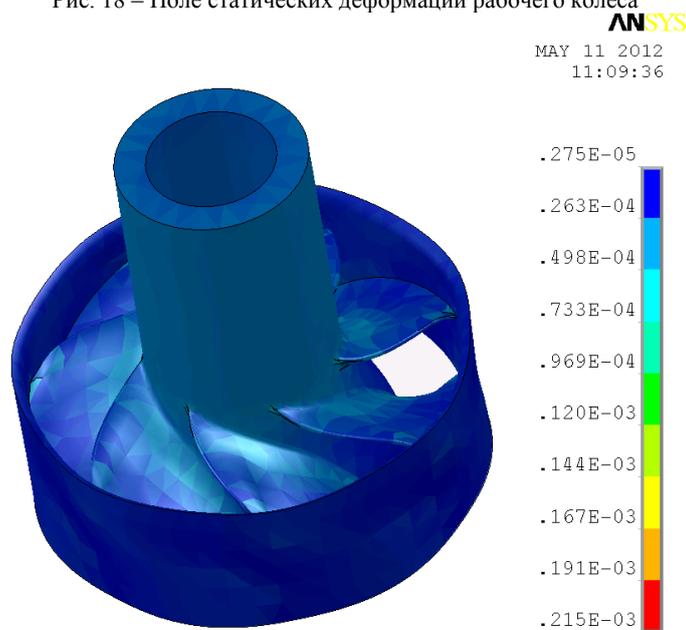


Рис. 19 – Поле статических узловых перемещений рабочего колеса

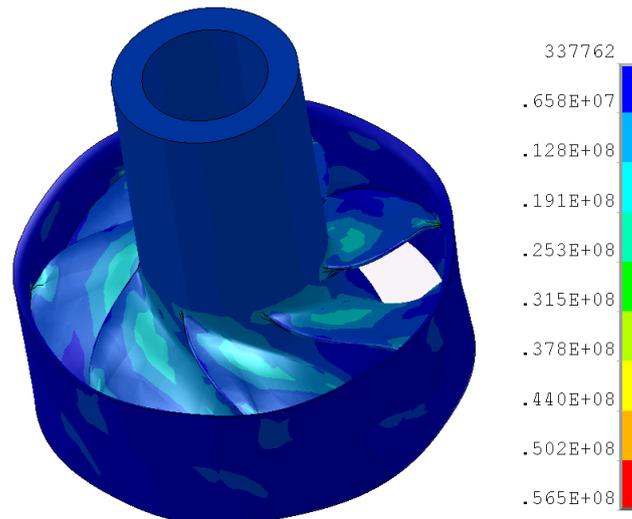


Рис. 20 – Интенсивность статических узловых напряжений рабочего колеса

Проведение таких совместных расчетов позволяет оптимизировать исходную конструкцию в части эффективности, надежности и металлоемкости за счет уменьшения консервативных запасов.

Следует отметить, что данные, полученные в результате гидродинамического расчета, выполненного средствами программного комплекса FlowVision HPC, носят скорее экспериментальный, чем теоретический характер. Последнее позволяет существенно сократить время на проектирование агрегата, т.к. открывает возможности к оценке его эффективности еще на этапе эскизных проектов. Возможность с высокой точностью определять напряжения, возникающие в рамках исследуемой конструкции, так же позволяет избежать серьезных ошибок при проектировании и дает качественное представление о напряженном состоянии конструкции.

На основании проведенных расчетов выявлено, что возможность прямого экспорта нагрузок между указанными программными комплексами на данный момент реализована не полностью. Реализация этой возможности в полной мере, помимо повышения точности прочностного анализа, открывает пути к проведению совместного прочностного, теплового и гидродинамического расчета, т.е. к возможности практически полного математического описания, как самой конструкции, так и происходящих в ее рамках физических процессов.

Приоритетной задачей является организация двухсторонней связи между прочностным и гидродинамическим анализом на уровне программных пакетов.

Совместные расчеты открывают широкие перспективы в части оптимизации проектируемых конструкций, позволяет добиться высоких технических и экономических показателей, а так же выявлять недостатки конструкции на этапе эскизного проекта и существенно сократить время проектирования с одновременным повышением качества конечного продукта.

Список литературы

1. Жлутков С.В., Аксенов А.А., Харченко С.А., Москалев И.В., Сушко Г.Б., Шишаева А.С. Моделирование отрывных течений в программном комплексе Flow Vision HPC, Вычислительные методы и программирование, 2010, Т 11, №2.
2. Шпихтинг, Г. (1974) «Теория пограничного слоя», Москва, Наука.
3. Wilcox, D.C. (1994) «Turbulence modeling for CFD», DCW Industries, Inc.
4. Sommer, T.P., So R. M. C. and Zhang, H.S. (1993) «Near-wall variable Prandtl turbulence model for compressive flows», AIAA Journal, vol. 31.
5. Menter, F.R., Kuntz, M. and Lantgry, R. (2003) «Ten years of Industrial Experience with the SST Turbulence model», Turbulence, Heat and Mass transfer 4, Begel House, Inc.