

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОГРУЖНЫХ НЕФТЯНЫХ НАСОСАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ

В.Я. Модорский, П.В. Писарев, Д.Ф. Гайнутдинова, С.Н. Пещеренко

Одной из основных проблем нефтедобывающей отрасли России является снижение надежности погружного оборудования, работающего в скважинах. В связи с этим возникает необходимость в проведении расчетов с использованием суперкомпьютерной техники для прогнозирования динамических процессов в трактах погружных насосов.

Цель исследования заключается в изучении влияния входных параметров на характеристики потока жидкости в трактах погружных насосов, а также в анализе масштабируемости данного класса задач в статической и динамической постановках.

В рамках данной работы учитывается работа крыльчаток пяти ступеней в системе "ротор-статор". Количество конечных элементов для одной ступени составляет 25 млн., количество элементов всей расчетной конструкции составляет 130 млн. Использование «тяжелых» сеток потребовало применения многопроцессорной вычислительной техники. В качестве аппаратного обеспечения использовался кластер ПНИПУ со следующими характеристиками:

- 88 вычислительных узлов;
- 128 четырехядерных процессоров AMD «Barcelona-3» (512 ядер);
- 48 восьмиядерных процессоров «Intel Xeon E5-2680» (384 ядра);
- Пиковая производительность 20 Тфлопс;
- Производительность в тестовом пакете Linpack - 15 Тфлопс;
- Объем системы хранения информации 12 ТБ;
- Объем оперативной памяти 2816 Гбайт (32 Гбайт/узел);
- Windows HPC Server 2008 в качестве исполнительской среды;
- В качестве коммуникационной среды использовалась локальная сеть Infiniband 2.

Для решения задач по расчету гидродинамических характеристик в свободном объеме погружного нефтяного насоса, с учетом допущений была принята следующая расчетная модель:

- Конструкция полагается трехмерной (x, y, z);
- Расчет нестационарный;
- Стенки конструкции не поглощают и не выделяют тепло;
- Сила трения между стенками и рабочей жидкостью не учитывается;
- Рабочее тело представляет собой вязкую сжимаемую жидкость (вода);
- Стенки конструкции не деформируются;
- Сила тяжести не учитывается;
- Давление на входе подается через осевой вход;
- Реализуется Лагранжев подход;
- Колесо представляет собой вращающееся тело.

Для решения задач по расчету гидродинамических процессов в погружных нефтяных насосах была построена трехмерная расчетная область, состоящая из пяти одинаковых ступеней. Для ее построения использовался препроцессор инженерного пакета Solid Works (рисунок 1). Далее геометрическая модель была экспортирована в формате PARASOLID в систему инженерного анализа ANSYS CFX. Затем расчетная область разбивалась расчетной сеткой, задавались граничные условия и другие необходимые параметры для расчета задачи. В полученной расчетной области решаются уравнения принятой математической модели.

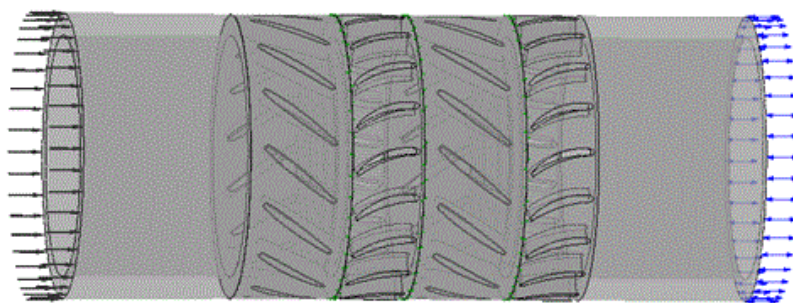


Рис. 1. Общий вид твердотельной модели, первой ступени

Структура расчетной сетки следующая. Для лучшей сходимости решения и снижения погрешностей получаемых результатов необходима сетка, ячейки которой имеют форму, близкую к форме равностороннего тетраэдра для прилегающих объемов и гексаэдральную для проточной части. При измельчении сетки желательно избегать резких отличий геометрических размеров соседних ячеек – их линейные размеры не должны отличаться более, чем в 2 раза. В расчетах используется адаптивная локально-измельченная сетка (рисунок 2). На первом этапе разбиения расчетной области, создается начальная расчетная сетка, далее указываются критерии измельчения сетки, в соответствии с которым происходит разбиение ячеек начальной сетки до нужной степени.

При формировании расчетной сетки отслеживались следующие параметры отвечающие за качество:

Skewness (асимметрия ячейки) – степень несоответствия реального тетраэдра равностороннему, что определяется по формуле:

$$\text{Skewness} = (\text{optimal cell size} - \text{actual cell size}) / \text{actual cell size} \quad (1)$$

где Skewness-асимметричность, optimal cell size-оптимальный размер ячейки, actual cell size-действительный размер ячейки.

При построении расчетной сетки учитывалось, что показатель Skewness должен стремиться к нулю. Вторым контрольным параметром является Aspect Ratio-отношение длинной стороны профиля элемента к короткой. Идеальным считается отношение, стремящееся к единице.

Общее количество расчетных элементов модели составило 130 млн. элементов, в том числе для первой ступени - 25 млн. элементов. При адаптации учитывалось, что численный эксперимент считается сходящимся, в том случае, когда результат моделирования не изменяется при дальнейшем измельчении конечно-элементной сетки. При построении расчетной сетки адаптации проводились в областях высоких градиентов переменных.

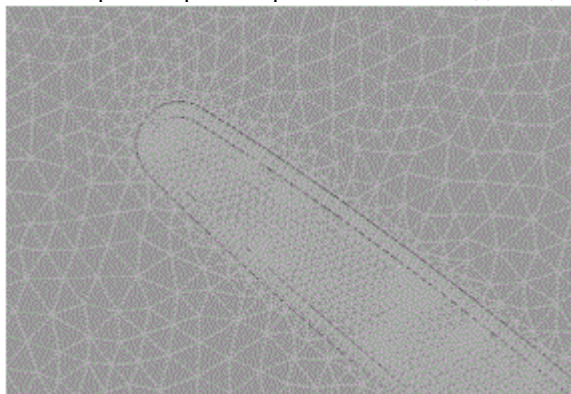


Рис. 2. Адаптивная локально-измельченная сетка

Для проведения численного эксперимента были заданы следующие граничные условия:

- Движение крыльчатки задавалось постоянным, со скоростью вращения $n = 2910$ об/мин;
- Для граничного условия «Вход» была использована зависимость расхода от времени. Данная зависимость соответствует рабочей характеристике расхода на входе;
- Для граничного условия «Выход» из первой ступени задавалось граничное условие «свободный выход».

В рамках вычислительных экспериментов исследовалось влияние расхода на входе в первую ступень на динамические процессы в тракте погружного насоса.

Для данного класса задач также проводилось исследование масштабируемости (см. рисунок 3,4). Количество используемых ядер варьировалось от 2 до 128.

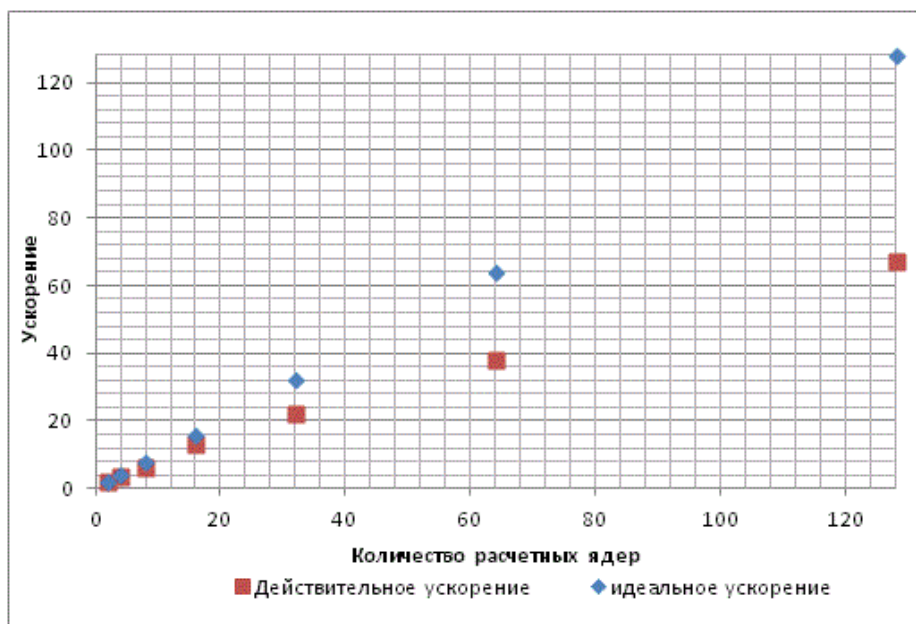


Рис. 3. График ускорения при установившемся статическом расчете

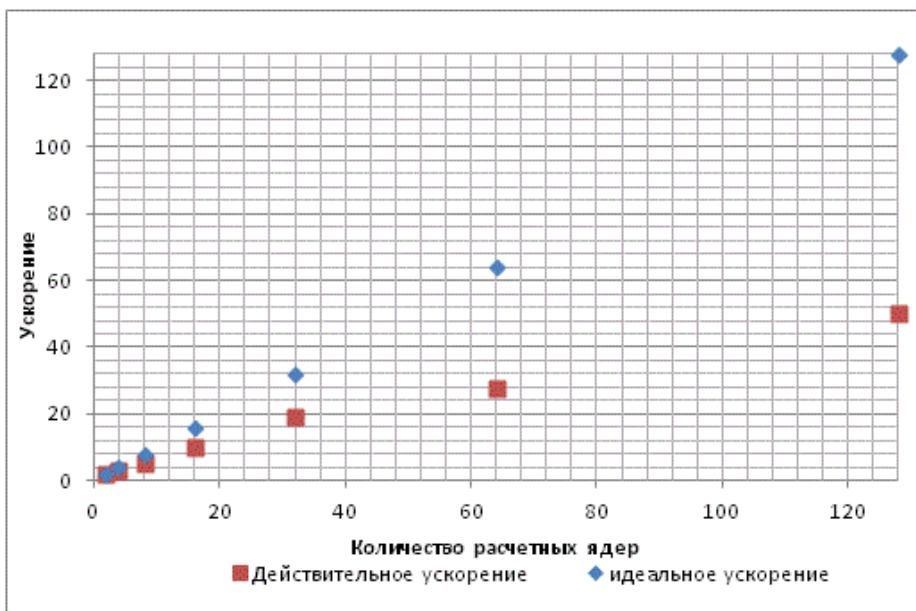


Рис. 4. График ускорения при нестационарном расчете

Из графиков видно, что эффективность вычислений при решении данной задачи на кластере ПНИПУ в ANSYS CFX приемлема при использовании от 2 до 64 ядер при статическом расчете, а при последующем увеличении количества ядер до 128 она несколько снижается. Для динамического анализа наблюдается заметный рост эффективности вычислений лишь до 32 ядер.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Модорский В.Я., Щенятский Д.В., Арбузов И.А., Бульбович Р.В., Кириевский Б.Е., Писарев П.В., А.А. Ташкинов. Численное моделирование колебательных процессов в центробежном насосе//Научно-технический вестник Поволжья №3, 2012, Казань, с.44-49.
2. Арбузов И.А., Ташкинов А.А., Щенятский Д.В., Кириевский Б.Е., Бульбович Р.В., Модорский В.Я., Писарев П.В. Численное моделирование колебательных процессов в соединительном канале модельного насоса//Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 100-103.
3. Арбузов И.А., Ташкинов А.А., Щенятский Д.В., Кириевский Б.Е., Бульбович Р.В., Модорский В.Я., Писарев П.В. Анализ влияния конструкции входа в соединительный канал на колебательные процессы в первой ступени модельного двухступенчатого насоса//Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 108-111.