

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И МАСШТАБИРУЕМОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ГИДРОДИНАМИКИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАКЕТА ANSYS CFX НА КЛАСТЕРЕ «СКИФ УРАЛ» ЮУРГУ

В.А. Васильев, А.Ю. Ницкий

В настоящее время актуальной является разработка и освоение новых высокоэффективных энергоблоков с повышенными параметрами, так называемых супер сверх критическими параметрами. При давлении пара перед турбиной 30 МПа и температуре 600 °С КПД энергоблока может достигать 45-50%. Одним из примеров является серийно выпускаемый энергоблок фирмы «Siemens» SSP6-6000. На номинальном режиме работы давление пара перед турбиной равно 270 бар, температура пара – 600 °С, при этом КПД блока достигает 45%. Повышение параметров пара на входе паровой турбины требует использования новых конструкций питательных насосов, работающих с температурой питательной воды на входе 200 - 230 °С и давлением на выходе 400-450 бар.

Проблема повреждаемости роторов мощных питательных насосов в настоящее время остается актуальной и на традиционных энергоблоках сверхкритического давления. Причиной является динамическая неустойчивость ротора насоса. Создание новых высоконадежных насосов, отстройка критических частот вращения валопровода от номинальной частоты вращения, определение наиболее вероятных форм колебаний и чувствительности ротора к дисбалансу, разработка мероприятий по предотвращению возникновения автоколебаний ротора, диагностика технического состояния, все это требует углубленного анализа и расчета динамики ротора питательного насоса.

Ротор мощного питательного насоса (рис. 1) обычно рассматривают как упругую систему с распределенными параметрами (массой и жесткостью) и нестационарными связями, обладающего большим числом степеней свободы.

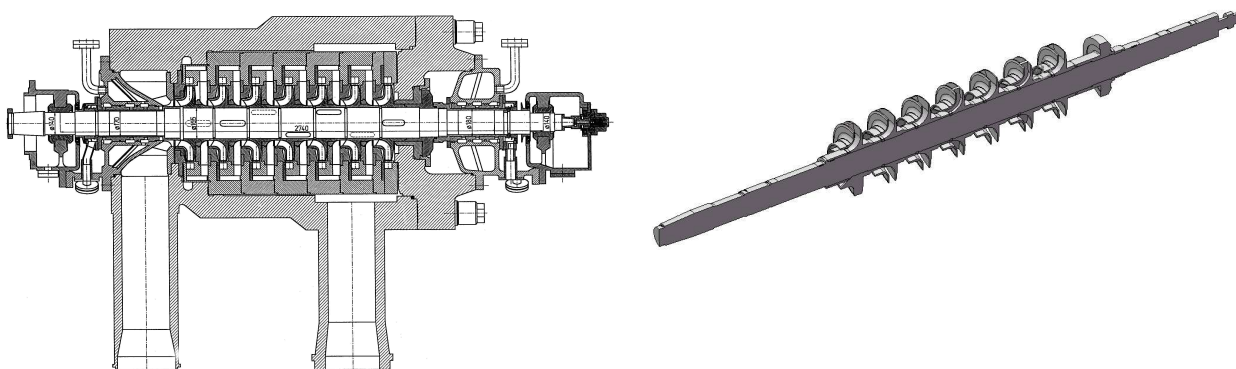


Рис. 1. Разрез мощного питательного насоса и трехмерная модель ротора

Уравнения движения ротора питательного насоса могут быть записаны в следующем виде:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [C]\{q\} = \{F(t)\},$$

где $[M]$, $[B]$, $[C]$ – матрицы масс (инерции), демпфирования и жесткости системы; $\{q\}$, $\{\ddot{q}\}$, $\{\dot{q}\}$ – обобщенные перемещения узлов и их производные; $\{F(t)\}$ – обобщенные силы [1]. Построение математической модели ротора сводится к представлению принципиальной схемы ротора в виде конечно-элементной модели.

Упругие и демпфирующие свойства уплотнений проточной части, в частности, уплотнений разгрузочного устройства рассчитываются с использованием численных методов конечного объема. В общем случае решение задачи динамики ротора требует совместного решения нестационарной задачи динамики ротора и гидродинамики тонких турбулентных слоев проточной части. Время счета и требуемая вычислительная мощность определяется решением задачи гидродинамики тонкого слоя.

Расчеты гидродинамики проточной части питательного насоса тепловых электрических станций проводились на кластере ЮУрГУ «СКИФ Урал». Основу суперкомпьютера составляют blade-модули T-Blade производства компании «Т-Платформы». В конструкции суперкомпьютера использованы новейшие четырех ядерные процессоры Intel Xeon E5472 (Harpertown). Данные процессоры изготовлены по технологии 45-нм, что позволило снизить напряжение питания CPU и уменьшить тепловыделение по сравнению с 65-нм процессорами. Преимущества нового 45-нм технологического процесса также позволили увеличить объем кэш-памяти второго уровня до 12 Мбайт на процессор, кэш динамически распределяется между ядрами, в

зависимости от нагрузки на них. Суперкомпьютер «СКИФ Урал» имеет LINPACK-производительность: 12,2 TFlops. Технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики вычислительного кластера ЮУрГУ «СКИФ Урал»

Количество узлов	166	
Количество процессоров	332	
Количество вычислительных ядер	1328	
	процессоры	2 x Intel Xeon E5472(4 ядра по 3,0ГГц)
	КЭШ	2x6 Мбайт разделяемый
	ОЗУ	8 Гбайт
	Жесткий диск	120 Гбайт
Тип системной сети	InfiniBand (20 Гбит/с)	
Тип управляющей сети	Gigabit Ethernet	
Операционная система	SUSE Linux Enterprise Server 10	
Реализации MPI	HP MPI v.02.02.05.01	

В качестве хост машины использовался узел представляющий собой 2-х процессорную ЭВМ с объемом ОЗУ 32 Гбайт. Процессоры – двухядерные процессоры Оптрон фирмы АМД. Технические характеристик ЭВМ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики вычислительного узла Хост машины

Количество узлов	1	
Количество процессоров	2	
Количество вычислительных ядер	4	
	процессоры	2 x AMD Opteron E5472(2 ядра по 2,4ГГц)
	КЭШ	2x6 Мбайт разделяемый
	ОЗУ	32 Гбайт
	Жесткий диск	60 Гбайт
Тип системной сети	InfiniBand (20 Гбит/с)	
Тип управляющей сети	Gigabit Ethernet	
Операционная система	WINDOWS	
Реализации MPI	HP MPI v.02.02.05.01	

Для проведения вычислительных экспериментов в качестве тестовой задачи использованы задача расчета гидродинамики тонкого турбулентного потока жидкости в щелевом уплотнении мощного питательного насоса. Тесты ориентированы на использование известного параллельного пакета, широко используемого на различных суперкомпьютерных платформах – пакета инженерного анализа ANSYS CFX. В отличие от использования синтетических тестов, таких как LINPACK, основанных, как правило, на решении системы линейных уравнений большой размерности, гидродинамическая задача большой размерности представляет собой сложную математическую модель реальных объектов и конструкций.

Цель данной работы – исследование эффективности суперкомпьютера ЮУрГУ «СКИФ Урал», на базе четырехядерных процессоров E5472 и определение необходимых и достаточных условий решения совместных задач гидродинамики и динамики ротора на вычислительном кластере ЮУрГУ.

С целью оценки влияния размера задачи на эффективность использования вычислительной мощности кластера анализ проводился на трех задачах разного размера. Малая задача – 46000 узлов, средняя задача – 328392 и, наконец, большая задача - 9 903 873 узлов.

Характеристики тестовых задач:

- малая задача. Расчет гидродинамики тонкого турбулентного слоя в радиальной щели стендовой установки малая задача;
- Средняя задача. Расчет гидродинамики уравновешивающего устройства питательного насоса СВПТ 1150;
- Большая задача. Расчет гидродинамики тонкого турбулентного слоя в радиальной перекошенной щели стендовой установки большая задача.

1. Малая задача. Расчет гидродинамики тонкого турбулентного слоя в радиальной щели стендовой установки. Малая задача. 46 000 узлов.

Модельный ротор (рис. 2.) представляет собой консольный стержень с диском на свободном конце. Диск диаметром 130 мм образует с корпусом радиальную щель зазором от 200 до 500 мкм. Внутренний радиус щели 66мм, внешний 93мм, длина радиального зазора 27 мм. На вход радиальной щели подавалась жидкость – вода с температурой порядка 40°С.

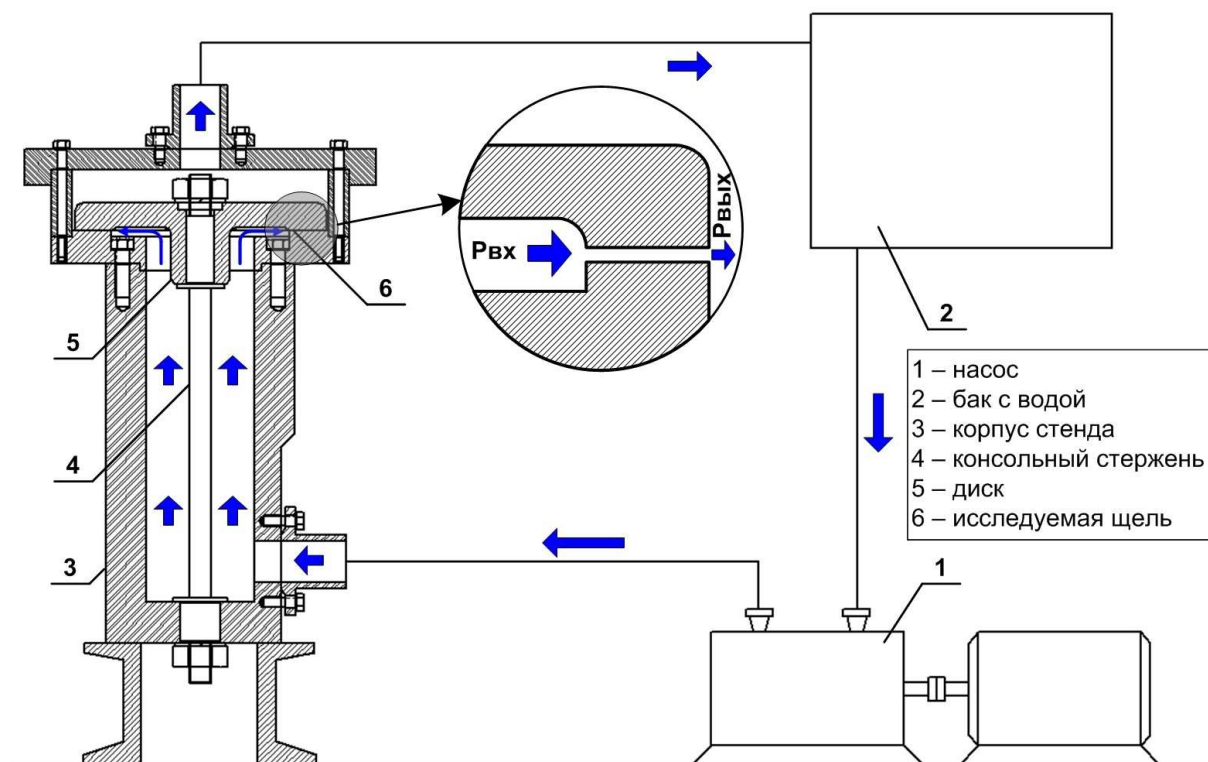


Рис. 2. Принципиальная схема стендовой установки и модельного ротора

2. Средняя задача 360 000 узлов. Расчет гидродинамики уравнивающего устройства насоса СВПТ 1150.

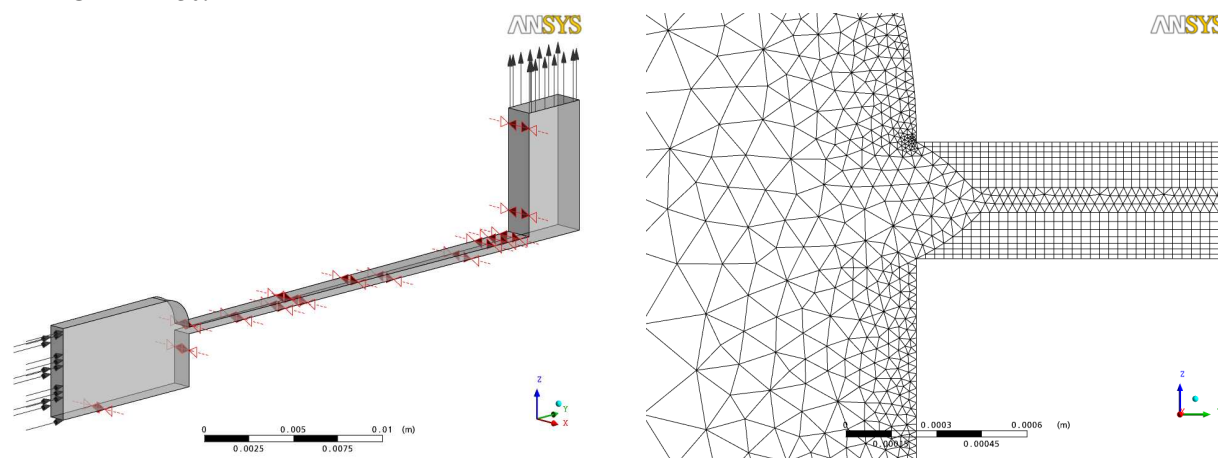


Рис.3. Пример сетки в радиальной щели уплотнения стенда.

Упругие и демпфирующие свойства уплотнений проточной части, в частности, уплотнений разгрузочного устройства рассчитываются с использованием пакета CFX. Расчеты полей давления, полей скоростей в щелевом уплотнении уравнивающего устройства насоса СВПТ 350-850 проводились для цилиндрической щели диаметром 180 мм, длиной 185мм, радиальной щели, наружный диаметр которой составлял 300мм и внутренний 250 мм. Зазор цилиндрической и радиальной щелей принят по данным [7] соответственно 350 и 120 мкм. Перекачиваемая среда - питательная вода, температура 170°С, давление на входе в цилиндрическую щель 34,4 МПа, давление на выходе из радиальной щели 2,15 МПа.

Задача решалась в осесимметричной постановке (рис. 4) с заданием граничных условий по давлению на входе и выходе. Сетка строилась на одноградусном секторе, размер сетки составил 328392 узлов, 242663 элементов.

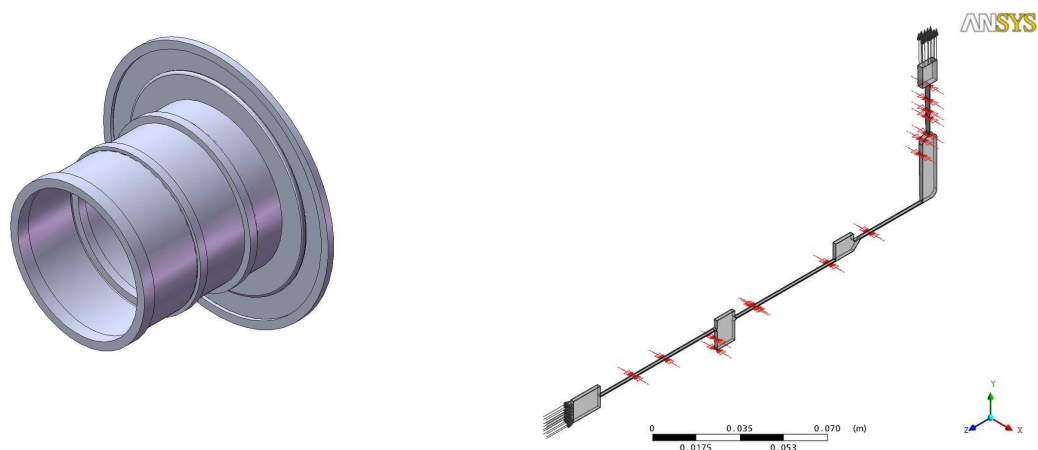


Рис.4. Геометрия щели уравнивающего устройства питательного насоса СВПТ 350-850

3. Большая задача 10 000 000 узлов. Перекошенная радиальная щель модельного уплотнения.

Сетка разбивается только на объеме жидкости в зазоре, для которого проводятся расчеты. Для параллельного зазора возможно решение плоской задачи. В этом случае существенно сокращается число узлов сетки, требуемая память, вычислительная мощность и время счета. Для перекошенной щели сетка строится из двух подобластей, которые затем стыкуются, как показано на рисунке 8. Общее число узлов на перекошенной радиальной щели составило 9 903 873. Необходимая оперативная память 31,6 Гбайта. Время счета на 16 узлах кластера «Скиф Урал» составляет порядка 4 часов.

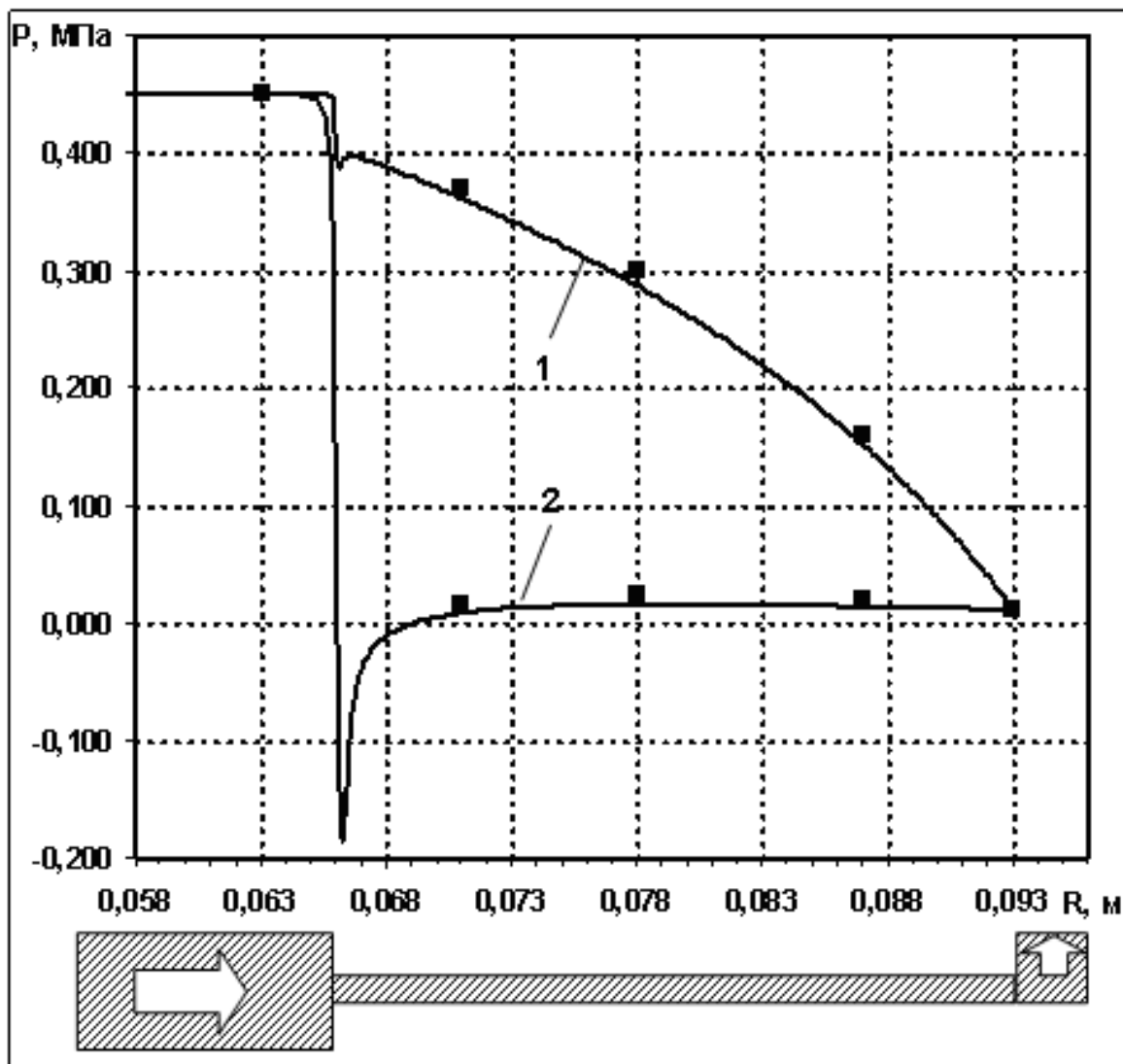


Рис. 5. Распределение давления по длине щели в сечениях конфузур, диффузур

Результаты сравнительного анализа эффективности вычислений с использованием кластера «Скиф Урал».

Эффективность расчета, в значительной степени, зависит от процесса генерации сетки и оптимизации процесса распараллеливания сетки для последующего использования мощных кластерных систем. Эффективность разделения сетки при использовании пакета «ANSYS CFX» зависит от: метода разделения и числа блоков сетки при разделении.

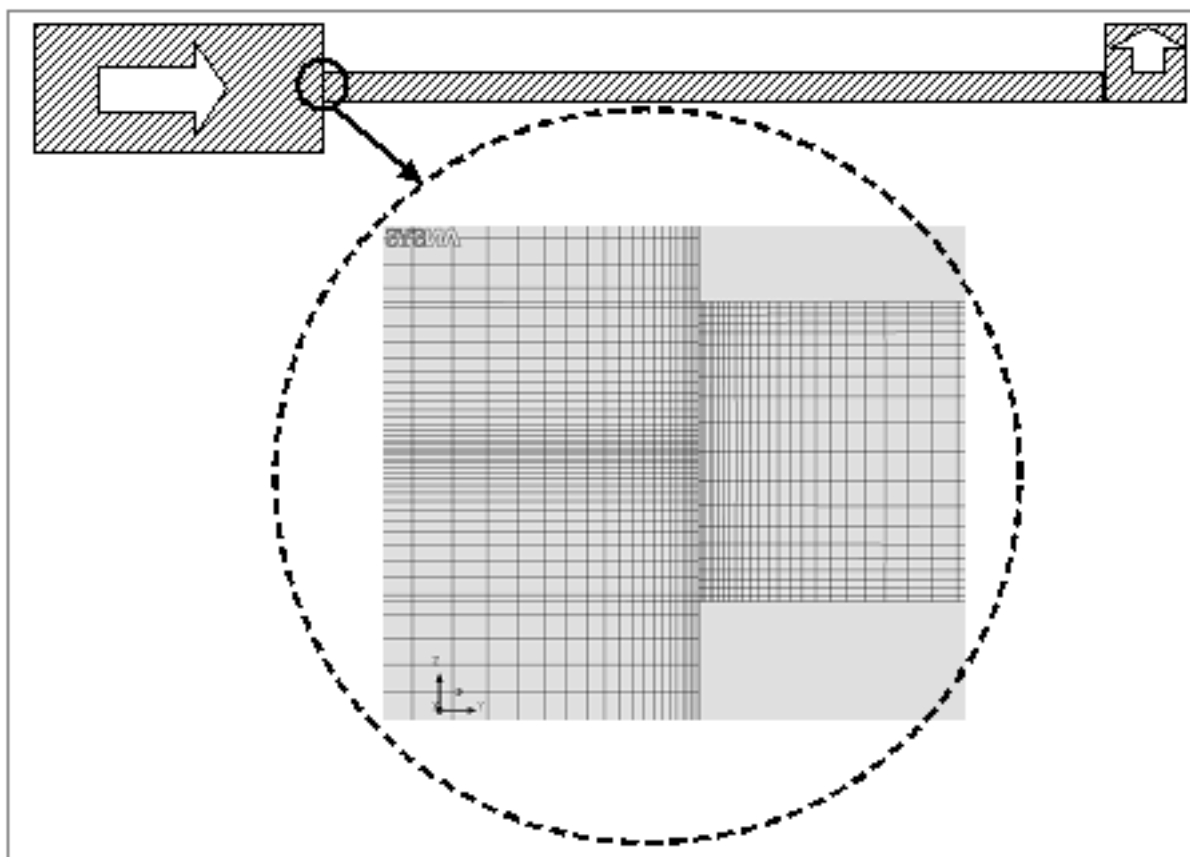


Рис. 6. Участок расчетной сетки на стыке 2х доменов – входной зоны и щелевого уплотнения

В свою очередь, эффективность работы в параллельном режиме зависит также от размера задачи или числа узлов сетки, типа элемента используемого при генерации сетки. Например, для четырёхгранных сеток «tetrahedral» рекомендуется не использовать меньше 30 000 узлов на блок сетки (на вычислительное ядро), для шестигранных сеток «hexahedral», минимальное количество узлов на блок рекомендовано не менее 75 000 узлов. Количество узлов на процессор не является жестким. При решении реальной задачи может быть больше или меньше.

Кроме того, узел кластера, содержащий два процессора, может иметь ограничение по масштабированию из-за недостаточной пропускной способности шины. По существу два центральных процессора могут потребовать больше ресурсов доступа к памяти, чем может обеспечить шина памяти.

- *Масштабирование задачи на кластере в зависимости от числа используемых вычислительных ядер.*

Вычисления проводились на большой задаче с числом узлов равным 10 000 000. Результаты приведены на рисунке 7. Интенсивность вычислений оценивалась по числу итераций в час. Получены две кривые. Первая с насыщением на уровне 200 ядер. Вторая кривая показывает рост производительности до 300 ядер. Отличие в эффективности использования кластера зависит от способа загрузки вычислительных ядер. Первая кривая соответствует использованию полной вычислительной мощности каждого узла с загрузкой всех восьми ядер. Вторая кривая соответствует специальной загрузке, при которой на каждом отдельном узле загружается только 4 ядра. Более эффективным является второй вариант загрузки кластера. Это свидетельствует о вероятных проблемах связанных с совместной работой процессоров на узле кластера.

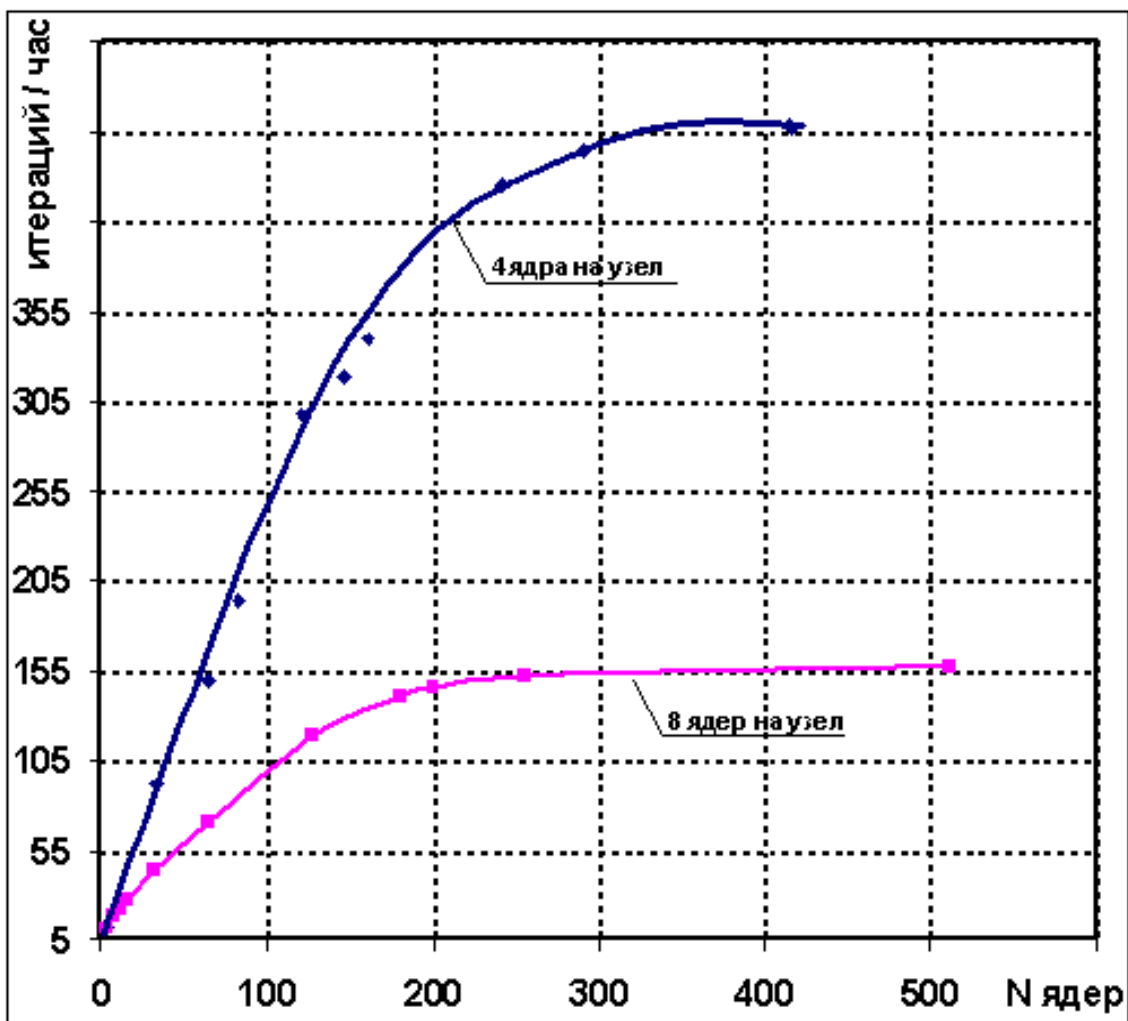


Рис. 7 Масштабирование большой задачи в зависимости от использования числа ядер внутри узла кластера

– *Масштабирование задачи внутри узла кластера.*

Вычисления проводились на малой задаче с числом узлов равным 46 000. Результаты приведены на рисунке 8. Интенсивность вычислений оценивалась по числу итераций в минуту. Получены две кривые. Первая с насыщением на уровне 5 ядер. Вторая кривая показывает рост производительности до 8 ядер. Отличие в эффективности использования узла кластера зависит от способа загрузки вычислительных ядер. Первая кривая соответствует использованию вычислительных ядер только одного отдельно взятого узла. Первое ядро – ядро Хост машины. Вторая кривая соответствует специальной загрузке, при которой к первому узлу Хост машины последовательно подключаются по одному вычислительному ядру разных узлов. Более эффективным является второй вариант загрузки узла кластера. Узел кластера, содержащий два процессора, имеет ограничение по масштабированию вероятнее всего, из-за недостаточной пропускной способности шины. По существу два процессора одного узла требуют больше ресурсов доступа к памяти, чем может обеспечить шина памяти.

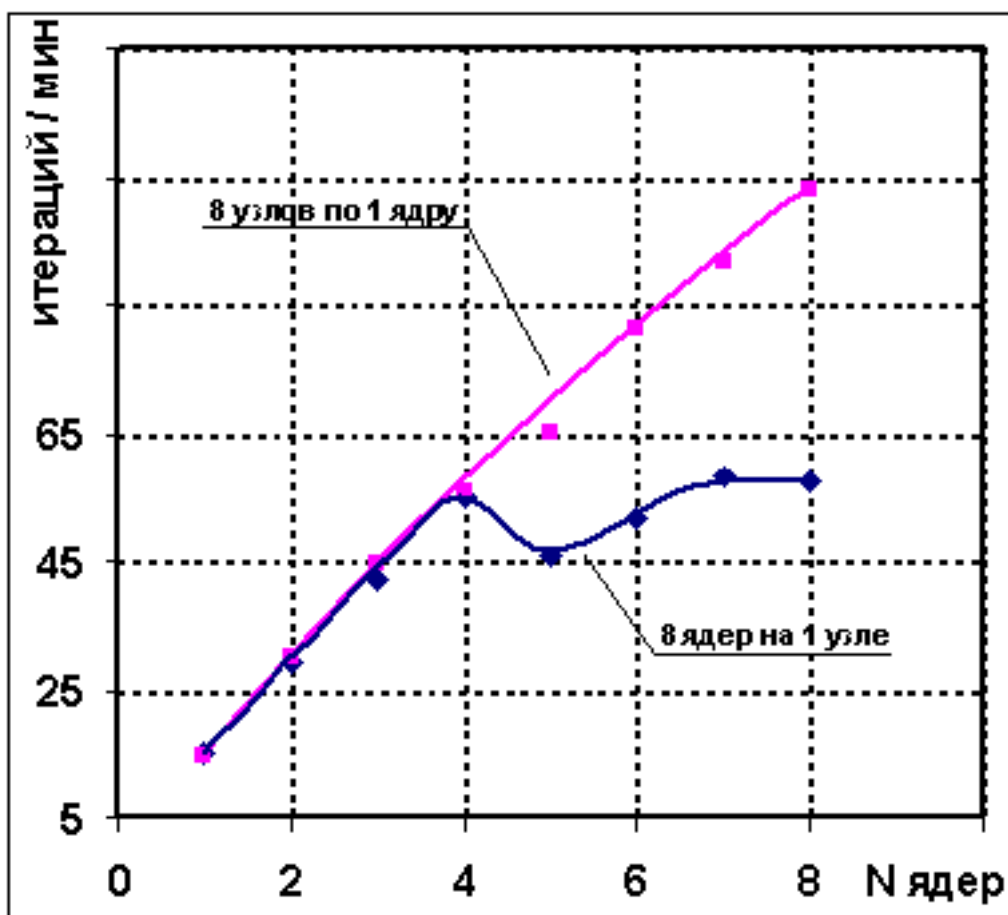


Рис. 8. Масштабирование малой задачи при различном способе подключения вычислительных ядер

– *Эффективность параллельных вычислений на малых задачах.*

Эффективное использование кластеров ограничивается размером задачи. Разбиение сетки приводит к созданию областей перекрытия в зонах связи между блоками. Процентное отношение количества наложенных (перекрытых) узлов к общему количеству узлов сетки в оптимальном варианте должно быть меньше 10 %. Величина перекрытия больше 20 % будет тормозить вычисления и потому не рекомендуется. Величина перекрытия при проведении вычислений сохраняется в диагностической информации и может быть выведена либо в выходной файл, либо на экран монитора.

Тестовые вычисления проводились на малой задаче с числом узлов равным 46 000. Загрузка вычислительных ядер проводилась по самой эффективной схеме – по одному ядру на узел. Результаты приведены на рисунке 9. Эффективное ускорение было получено при работе кластера на 20 ядрах. При этом увеличение вычислительной мощности происходит практически линейно с коэффициентом ускорения равным 18,2. Минимальное, эффективно используемое количество узлов сетки на одно ядро, для исследуемой задачи, находится в пределах от 2000 до 3000.

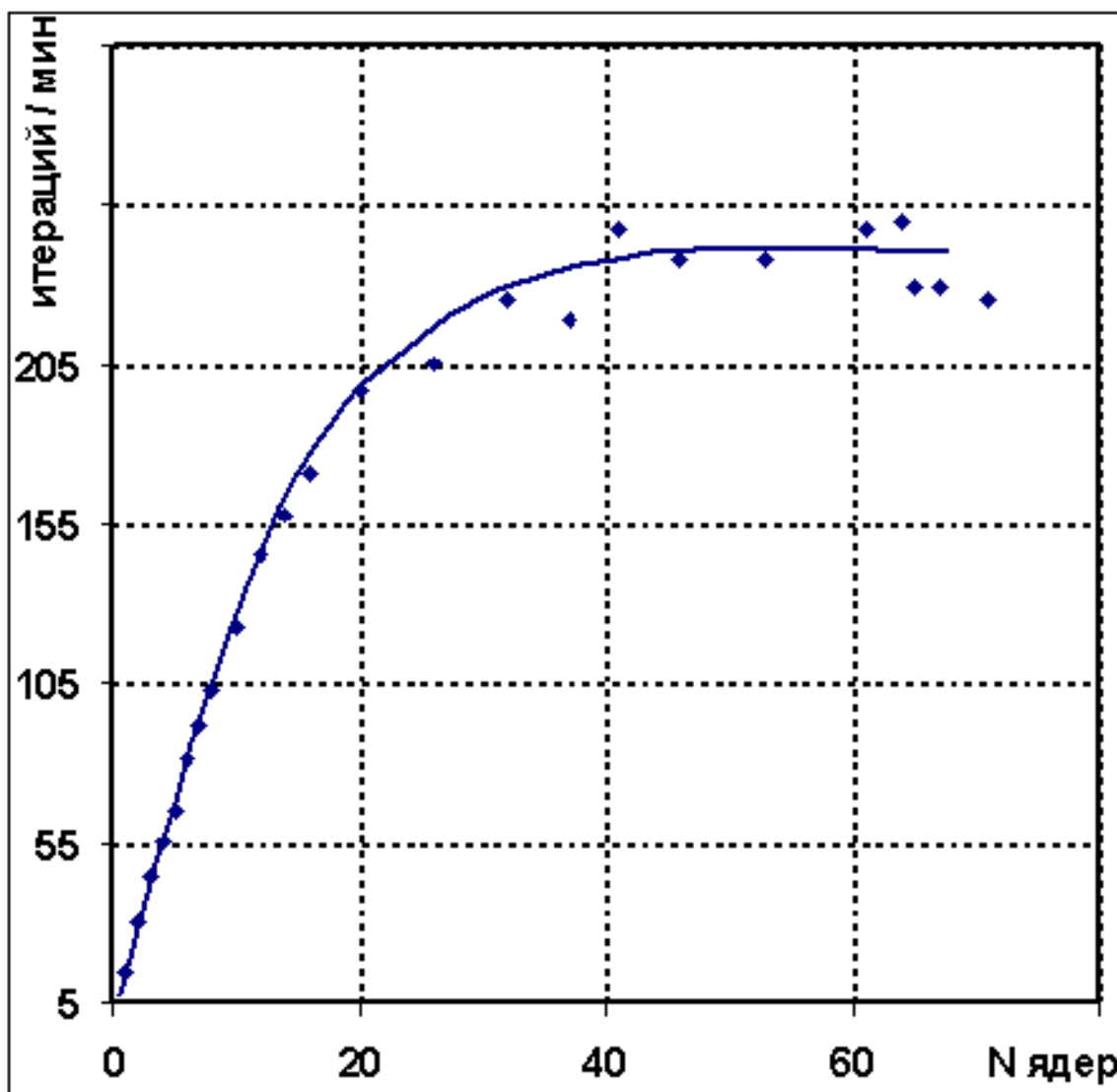


Рис.9 Максимальное масштабирование на малой задаче.

- *Эффективность использования «Partitioning».*

Оптимизации процесса распараллеливания сетки для последующего использования мощных кластерных систем происходит с использованием различных программных средств «Partitioning». Эффективность этих программных средств в большой мере зависит от типа задачи. При проведении параметрических вычислений требующих больших временных затрат необходимо выбрать оптимальный продукт, обеспечивающий максимальное ускорение вычислений. Для получения максимального масштабирования рекомендуется использовать предлагаемый по умолчанию разбиватель (Partitioning) «MeTiS». На рисунке 9 приведены результаты масштабирования полученные с использованием «MeTiS'a». Использование этого программного средства позволило получить эффективное разбиение даже при очень низких числах узлов сетки на одно ядро. Эффективность использования «MeTiS'a» при масштабирования других типов задача требует дополнительных исследований.

5. *Зависимость масштабирования от операционной системы и метода распараллеливания.*

На рисунке 10 приведены результаты расчета малой задачи на двухпроцессорной, четырехядерной рабочей станции. Характеристики станции приведены в таблице 2. Расчеты проводились в операционной системе WINDOWS с использованием метода распараллеливания задаваемого по умолчанию, с использованием MPI, с коррекцией памяти и в операционной среде LINUX. Интенсивность вычислений оценивалась по числу итераций в минуту. В первом случае при увеличении числа вычислительных ядер происходит существенное снижение эффективности работы. При переходе на MPI увеличение числа процессоров приводит к увеличению скорости вычислений. Максимальное ускорение получено при работе в операционной среде LINUX.

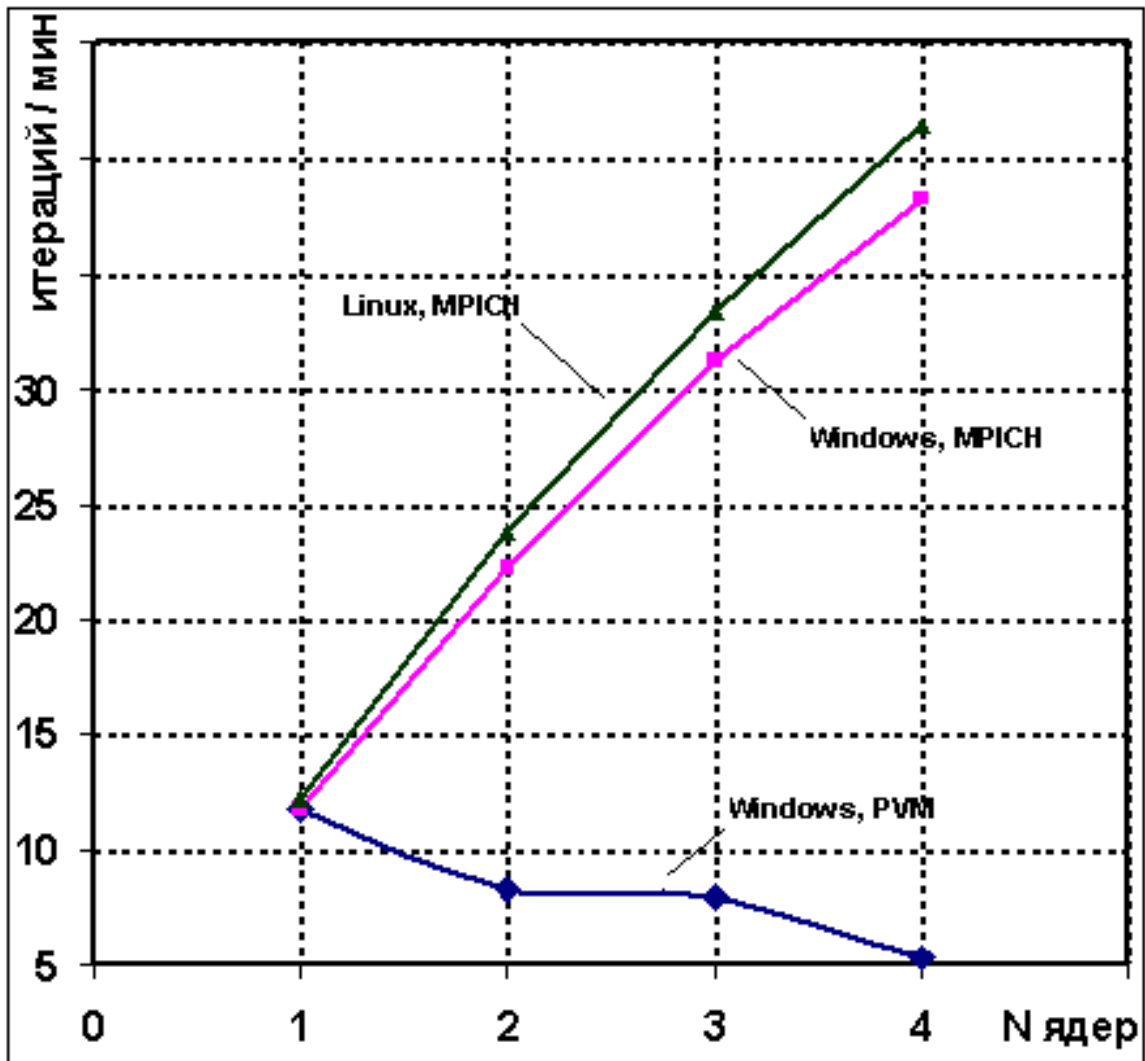


Рис.10. Масштабирование на узле AMD в зависимости от операционной системыи метода распараллеливания. Малая задача

Выводы.