

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»**  
Высшая школа электроники и компьютерных наук  
Кафедра системного программирования

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент  
к.ф.-м.н., старший преподаватель  
кафедры Математики и методики  
преподавания математике ФГБОУ  
ВО «ЮУрГГПУ»

\_\_\_\_\_ А.М. Шарафутдинова

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.ф.-  
м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Л.Б. Соколинский

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

**МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕОБХОДИМЫХ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ЗАДАЧ  
ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ  
ANSYS CFX**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
ЮУрГУ – 02.03.02.2018.115-020.ВКР

Научный руководитель  
к.ф.-м.н., доцент кафедры СП  
\_\_\_\_\_ С.А. Иванов

Автор работы,  
студент группы КЭ-401  
\_\_\_\_\_ М.В. Сальникова

Ученый секретарь  
(нормоконтролер)  
\_\_\_\_\_ О.Н. Иванова

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Челябинск-2018

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ .....	6
1.1. Обзор основных программ компьютерного моделирования.....	6
1.2. Создание модели гидрогазодинамики в ANSYS CFX .....	8
1.3. Выбор стратегии для исследования прогнозирования.....	11
вычислительных ресурсов.....	11
2. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ .....	14
3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ .....	18
3.1. Влияние параметров задачи на время решения .....	18
3.2. Влияние параметров задачи на размер выделяемой памяти .....	21
4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ НА МАСШТАБИРУЕМОСТЬ ...	24
4.1. Влияние параметров задачи на масштабируемость при изменении количества ядер .....	24
4.2. Влияние параметров задачи на масштабируемость при изменении количества узлов .....	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	38
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	39

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Современные задачи моделирования в области инженерного анализа характеризуются достаточно высокими требованиями к вычислительным ресурсам, а также многовариантными расчетами, в которых та или иная физическая модель запускается многократно (сотни и тысячи раз) с различными вариациями входных параметров для достижения наибольшей точности вычисления, а также для моделирования различного вида ситуаций с одними и теми же физическими моделями. В этой области существует ряд пакетов специализированного программного обеспечения, которые существенно упрощают работу инженера-проектировщика, сокращая время, требуемое для разработки алгоритма моделирования. Тем не менее, такого рода запуски составляют большой процент загрузки современных суперкомпьютерных и распределенных систем, что влечет за собой необходимость в создании методов и разработки алгоритмов планирования такого рода задач.

Для достижения данной цели необходимо уметь давать оценку параметрам инженерной задачи на основе степени их влияния на вычислительные ресурсы. В случае многократного запуска одной и той же задачи с вариациями входных параметров, вычислительные ресурсы, необходимые для вычисления такой задачи, могут также сильно варьироваться. Поэтому необходимо уметь оценивать влияние варьирования того или иного параметра инженерной задачи на вычислительные ресурсы, такие как время, выделяемая память, а также масштабируемость.

### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является оценка вычислительных ресурсов для задач гидрогазодинамики в инженерном пакете ANSYS CFX. Для выполнения данной цели требуется выполнить следующие задачи.

1. Сделать анализ предметной области.
2. Определить типовую инженерную задачу для рассмотрения в рамках данной работы и определить границы варьирования входных данных

для выбранной типовой задачи, а также провести численные эксперименты.

3. Сделать выводы о влиянии параметров инженерной задачи на вычислительные ресурсы и о прогнозировании вычислительных ресурсов для данного класса задач.

4. Сделать выводы о влиянии параметров инженерной задачи на масштабируемость и о прогнозировании вычислительных ресурсов для данного класса задач.

### **Объем и структура работы**

Общий объем работы составляет 40 страниц, основная часть работы содержит 4 главы. Объем библиографии составляет 15 источников.

### **Краткое содержание работы**

Первая глава «Анализ предметной области» содержит обзор программ компьютерного моделирования, общее описание методов создания моделей гидрогазодинамики, выбор стратегии для прогнозирования вычислительных ресурсов, а также обоснование метода прогнозирования вычислительных ресурсов для данного исследования.

Вторая глава «Описание задачи» содержит обоснование выбора задачи для исследования, описание выбранной типовой задачи и исследуемых параметров данной задачи, а также границы варьирования выбранных параметров и условия проведения численных экспериментов.

Третья глава «Влияние параметров задачи на вычислительные ресурсы» содержит результаты проведенных экспериментов, результаты оценки влияния варьирования параметров задачи на вычислительные ресурсы, такие как время решения и размер выделяемой памяти, а также формулы для прогнозирования вычислительных ресурсов.

Четвертая глава «Влияние параметров задачи на масштабируемость» содержит результаты проведенных экспериментов, результаты оценки влияния варьирования параметров задачи на масштабируемость вычислений, а также формулы для прогнозирования вычислительных ресурсов.

В заключении подводятся итоги и выводы данного исследования.

## **1. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ**

В настоящее время задачи моделирования представляют особый интерес для информационной сферы. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяют избегать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». Вместо этого этап испытаний происходит до этапа изготовления изделий при помощи средств компьютерного моделирования.

### **1.1. Обзор основных программ компьютерного моделирования**

Существует большое количество различных программных пакетов, предназначенных для компьютерного моделирования. Они могут быть классифицированы по цели моделирования.

1. CAD-системы (Computer-aided design) или компьютерная поддержка проектирования – предназначены для решения конструкторских задач и оформления конструкторской документации, моделирования трёхмерной объёмной конструкции детали и оформления чертежей и текстовой конструкторской документации.

2. CAM-системы (Computer-aided manufacturing) или компьютерная поддержка изготовления – предназначены для проектирования обработки изделий на станках с числовым программным управлением и выдачи программ для этих станков.

3. CAE (Computer-aided engineering) – программы или программные пакеты, предназначенные для инженерных расчетов, анализа и моделирования физических процессов.

4. PDM-системы (Product Data Management) – системы управления данными об изделии – организационно-технические системы, обеспечивающие управление всей информацией об изделии. PDM-системы являются частью PLM-систем (англ. Product Lifecycle Management). PLM – жизненный цикл изделия – технология управления жизненным циклом изделий.

Программные продукты, позволяющие проводить расчет, анализ и

моделирования физических процессов в области гидрогазодинамики относятся к CAE-системам. Такого рода программ существует значительное количество [8]. Рассмотрим некоторые из программ, работающие в том числе в области гидрогазодинамики.

1. OpenFOAM – свободно-распространяемая универсальная система конечно-объемного пространственного моделирования механики сплошных сред. Позволяет решать задачи: прочностные расчеты; гидродинамика ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей как в несжимаемом, так и сжимаемом приближении с учетом конвективного теплообмена и действия сил гравитации. Решение дозвуковых, околосзвуковых и сверхзвуковых задач; задачи теплопроводности в твердом теле; многофазные задачи, с описанием химических реакций компонент потока; задачи, связанные с деформацией расчетной сетки; сопряженные задачи; некоторые другие задачи, при математической постановке которых требуется решение дифференциальных уравнений в частных производных в условиях сложной геометрии среды [14].

2. STAR-CD – универсальная система конечно-объемного анализа с пре-/постпроцессором, предназначенная для проведения расчетов в области механики жидкости и газа. Области применения: газо- и нефтедобыча; машиностроение; обрабатывающая промышленность; радиоэлектроника; строительство; транспорт; химическая промышленность; электротехника; энергетика. Позволяет решать задачи в областях: стационарные и нестационарные течения; ламинарные течения; турбулентные течения; теплоперенос (конвективный, радиационный, теплопроводность с учетом твердых тел); массоперенос; химические реакции; горение газообразного, жидкого и твердого топлива; распределенное сопротивление; многокомпонентные течения; свободные поверхности [12].

3. LS-DYNA – универсальная система, предназначенная для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости и газа, теплопереноса, а также связанных

задач. LS-DYNA нашла широкое применение в таких отраслях науки и техники, как автомобилестроение (симуляция краш-тестов), военно-промышленный комплекс (симуляция взрывов боеприпасов и их воздействие на окружающие предметы), авиа- и ракетостроение (проектирование реактивных двигателей и сопел) [13].

4. ANSYS [11] – универсальная программная система анализа методом конечных элементов. С помощью данного программного пакета производятся автоматизированные инженерные расчеты и решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей [5].

Для рассмотрения в данной работе выбран программный пакет ANSYS, а именно, программный комплекс ANSYS CFX – специальный инструмент для вычислительной гидрогазодинамики.

## **1.2. Создание модели гидрогазодинамики в ANSYS CFX**

Решение каждой инженерной задачи обязательно проходит через такие этапы, как построение геометрии, создание сетки, препроцессор физики, решатель, постпроцессор. Каждый из этих этапов представляет собой отдельный блок, для решения которого существует специальная программа, входящая в инженерный пакет.

Программный пакет ANSYS CFX состоит из ряда программ инженерного анализа, таких как ANSYS DesignModeler, ANSYS Meshing, и другие, с помощью которых создается модель представления реального инженерного объекта в программе. Основой инженерного пакета ANSYS CFX являются препроцессор физики CFX-Pre, решатель CFX-Solver, а также надстройка над ним CFX-Solver Manager [10].

Рассмотрим процесс создания модели в ANSYS CFX поэтапно.

### 1. Создание геометрии – ANSYS DesignModeler.

ANSYS DesignModeler – универсальный CAD-редактор с широким набором инструментов для создания новой геометрии, а также для разбиения и упрощения импортированной геометрии (CAD (англ. Computer-Aided Design) – система автоматизации проектных работ (САПР) — программный пакет, предназначенный для создания чертежей, конструкторской и/или технологической документации и/или 3D моделей). ANSYS DesignModeler позволяет создавать, параметризовать геометрию на основе двумерных эскизов или встроенных примитивов, а также выполнять последующие операции редактирования. Весь ход моделирования отображается в древовидной истории проекта, что позволяет изменять первоначальные параметры в любой момент создания геометрии.

### 2. Генерация сетки – ANSYS Meshing.

ANSYS Meshing позволяют генерировать сеточные модели для разных типов анализа (практически все области физики). На данном этапе происходит следующее:

- определение геометрии области исследования;
- создание областей потоков жидкостей или газов, твердых областей и задание имен граничным областям;
- установка параметров сетки.

### 3. Препроцессор физики – ANSYS CFX-Pre.

ANSYS CFX-Pre реализует процесс определения физики задачи. Физический препроцессор импортирует сетку, созданную на первом шаге. Это второй шаг постановки задачи, на котором определяются физические модели, на основе которых будет происходить симуляция процесса, а также их основные параметры и характеристики. CFX-Pre позволяет определить граничные условия процесса (входные, выходные параметры), модели теплообмена [9].

#### 4. Решатель – ANSYS CFX-Solver, ANSYS CFX-Solver Manager.

ANSYS CFX-Solver – программа, реализующая процесс решения задачи вычислительной гидродинамики. Импортируется задача, поставленная посредством ANSYS CFX-Pre, и производится поиск решения всех требуемых переменных:

- уравнения в частных производных интегрируются по всему объему задачи в области исследования, соответствует применению закона сохранения (масс или момента) к каждой исследуемой области;
- полученные интегральные уравнения преобразуются в систему алгебраических уравнений путем аппроксимирования членов в интегральных уравнениях;
- алгебраические уравнения решаются численным методом.

ANSYS CFX-Solver Manager – это надстройка над CFX-Solver. Она позволяет контролировать ход решения задачи:

- определять входные файлы решателя;
- запускать или приостанавливать CFX-Solver;
- контролировать процесс решения задачи;
- устанавливать CFX-Solver для проведения параллельных вычислений.

#### 5. Постпроцессор – ANSYS CFD-Post.

ANSYS CFD-Post – это программа, предназначенная для анализа, визуализации и представления результатов, полученных в ходе решения задачи посредством ANSYS CFD-Solver. Для этого используются следующие средства:

- визуализация геометрии и исследуемых областей;
- векторные графики для визуализации направления и величины потоков;
- визуализация изменения скалярных величин (такие как температура, давление) внутри исследуемой области.

Весь модуль ANSYS CFX полностью интегрирован в расчетную среду ANSYS Workbench, с помощью которой и было проведено данное исследование. Данная платформа, объединяет все инструменты инженерного моделирования компании ANSYS.

### **1.3. Выбор стратегии для исследования прогнозирования вычислительных ресурсов**

Большое значение для решения задач в ANSYS имеют высокопроизводительные вычисления. В первую очередь, их необходимость проявляется при решении задач большой размерности, т.е. задач, учитывающих все геометрические подробности модели для наиболее полного соответствия результатов расчета исходной геометрии.

Активация опции высокопроизводительных вычислений решателей ANSYS производится при помощи специальных лицензий. Использование данного функционала позволяет распараллеливать работу решателей на системы, начиная от многопроцессорных рабочих станций и заканчивая кластерами, содержащими сотни тысяч процессоров. При этом, лицензирование производится по количеству задействуемых в расчете процессорных ядер и чипов математических сопроцессоров.

Однако, вычисление таких задач на суперкомпьютере может занять большое количество вычислительных ресурсов машины. Для более эффективного использования вычислительных ресурсов необходимо уметь осуществлять планирование такого рода задач, распределяя их на наиболее подходящие для этого ресурсы.

Также, с точки зрения инженера, при использовании в решении задачи облачных вычислительных ресурсов, становится вопрос в оценке времени решения такой задачи и наиболее выгодного соотношения количества используемых ядер к предположительному времени вычисления.

Таким образом, вопрос прогнозирования вычислительных ресурсов при решении задач моделирования имеет место как для администрирования

суперкомпьютерных и облачных вычислений, так и для конечного пользователя, производящего расчеты задач.

Для прогнозирования объема вычислительных ресурсов, которые понадобятся для решения той или иной инженерной задачи, необходимо уметь давать оценку времени вычисления, задействованной памяти и масштабируемости задачи по ее параметрам. Для этого необходимо провести исследования, показывающие, что возможно установить соответствие между параметрами задачи и вычислительными ресурсами, необходимыми для ее решения, и что при изменении параметров задачи возможно прогнозирование используемых ресурсов.

Для определения данной возможности необходимо выбрать типовую задачу, для которой необходимы высокоскоростные вычисления на суперкомпьютере. Данная задача должна быть достаточно простая по своей сути, чтобы была возможность отследить влияние конкретного параметра на вычислительные ресурсы, необходимые для ее решения [6]. Однако, в то же время она должна быть достаточно объемной, чтобы видеть разницу в выделяемых вычислительных ресурсах при варьировании параметров. Также задача должна отражать реальную задачу инженерного анализа, решение которой может быть необходимо инженеру.

Таким образом, проведя вычислительные эксперименты, можно будет определить, возможно ли прогнозирование вычислительных ресурсов класса задач по входным параметрам задачи. В качестве метода прогнозирования в таком случае будет рационально использовать статистический метод прогнозирования – это метод прогнозирования временных рядов на перспективу, он предполагает экстраполяцию (линейное развитие во времени) и интерполирование (выявление промежуточного значения между двумя известными моментами процесса). Это условное продолжение в будущее наблюдаемых объектов (тенденций, закономерности развития которых в прошлом и настоящем достаточно хорошо известны). Построение динами-

ческих рядов развития показателей прогнозируемого явления на протяжении периодов основания прогноза в прошлом и упреждения прогноза в будущем [15]. Для осуществления данного метода прогнозирования необходимо провести ряд численных экспериментов, и, на основе полученных результатов, при помощи построения линии тренда, вывести формулы прогнозирования вычислительных ресурсов.

## 2. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

В качестве типовой задачи для проведения исследования была выбрана физическая модель, состоящая из главной трубы с несколькими отводами. Через отверстие главной трубы поступает вода, и выходит через противоположное отверстие, а также через отводы.

Однако, для проведения экспериментов необходимо выбрать параметры стандартной модели, которую можно будет считать «средней», таким образом, чтобы параметры данной модели удовлетворяли следующим условиям.

1. Сетка должна быть максимально детализирована.

2. Для параметров «Количество отводов», «Скорость воды», «Длина центральной трубы», «Диаметр центральной трубы» и «Диаметр отводов» должна быть возможность изменения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения;

3. Поскольку типовая модель имеет достаточно простую геометрию и имеет малое количество настраиваемых параметров для того, чтобы можно было лучше отследить их влияние на вычислительные ресурсы, также для расчетов необходимо, чтобы на 1 узле (12 ядрах) суперкомпьютера задача считалась от 5 до 10 минут.

Было проведено несколько экспериментов с пробными моделями для выявления стандартной, «средней», модели. Экспериментальным путем была выбрана стандартная модель, соответствующая вышеуказанным параметрам.

В качестве стандартной модели была выбрана труба длиной 1000 мм, диаметром 100 мм, с 30 отводами длиной 150 мм и диаметром 10 мм, скорость поступающей воды 1 м/с. Данная модель представлена на рис. 1. Решение данной модели на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» на 1 узле, 12 ядрах, заняло 9 минут 40 секунд, что соответствует заявленным требованиям.

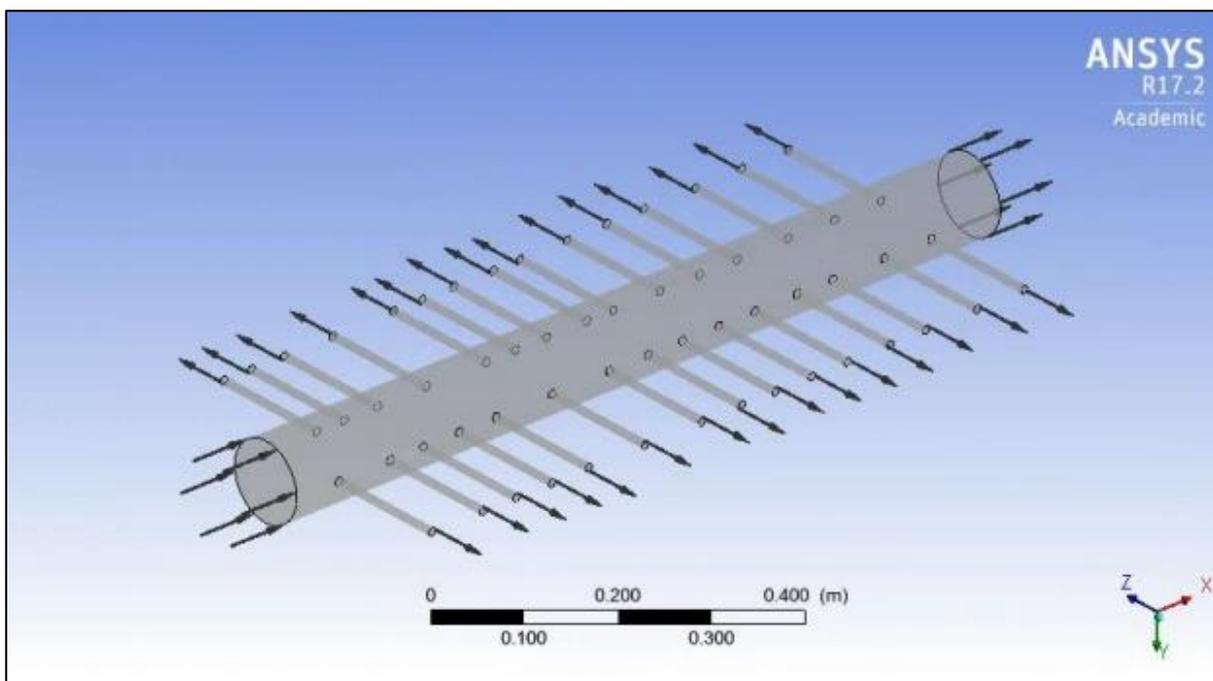


Рис. 1. Типовая задача для расчетов

Построение инженерной задачи проводилось в ANSYS CFX 17.2 при помощи среды ANSYS Workbench [1–4].

Также для проведения исследования необходимо установить границы варьирования параметров задачи таким образом, чтобы на основе полученных данных можно было определить влияние выбранных параметров на вычислительные ресурсы. Для задания верхней границы варьирования параметров также было определено условие, что такая задача на 1 узле (12 ядрах) не должна решаться более 30 минут. В процессе проведения экспериментов были поставлены следующие границы (см. табл. 1).

Табл. 1. Границы варьирования параметров

Название параметра	Минимальное значение	Максимальное значение
Релевантность сетки (контроль качества сетки – -100 для высокоскоростных расчетов, 100 – для высокоточных)	-50	100
Скорость воды (м/с)	0.5	1.5
Количество отводов	6	35
Длина центральной трубы (мм)	750	1500
Диаметр отводов (мм)	5	12

В рамках данной работы проведено две серии экспериментов.

Первая серия экспериментов проводилась на одном узле (12 ядрах) суперкомпьютера «Торнадо ЮУрГУ». В данной серии экспериментов проводились запуски выбранной типовой задачи с изменением выбранных параметров в указанных границах. Данная серия экспериментов необходима для получения зависимостей вычислительных ресурсов, таких как время решения и оценка памяти решателем, от конкретных параметров выбранной типовой задачи.

Вторая серия экспериментов проводилась с изменением количества ядер и количества узлов суперкомпьютера «Торнадо ЮУрГУ» для проверки влияния параметров выбранной задачи на масштабируемость по ядрам и масштабируемость по узлам. Количество ядер варьировалось от 1 до 12 соответственно, а количество узлов варьировалось от 1 до 20 (при их полной загруженности, т. е. количество ядер в таком случае варьировалось от 12 до 240).

Технические характеристики суперкомпьютера «Торнадо ЮУрГУ» приведены в табл. 2.

Табл. 2. Технические характеристики суперкомпьютера «Торнадо ЮУрГУ»

Число вычислительных узлов/ процессоров/ сопроцессоров/ процессорных ядер	480/960/384/29184
Тип процессора	Intel Xeon X5680 (Gulftown, 6 ядер по 3.33 GHz) — 960 шт.
Тип сопроцессора	Intel Xeon Phi SE10X (61 ядро по 1.1 GHz) — 384 шт.
Оперативная память	16.9 TB
Дисковая память	300 TB, твердотельные накопители SSD Intel, параллельная система хранения данных Panasas ActiveStor 11
Тип системной сети	InfiniBand QDR (40 Gbit/s)
Тип управляющей сети	Gigabit Ethernet
Пиковая производительность комплекса	473.6 TFlops
Операционная система	Linux CentOS 6.2

В результате проведенной работы на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» произведено 30 запусков для первой серии экспериментов, и 414 запусков для второй серии экспериментов.

В рамках данных экспериментов сформированы таблицы, в которых содержатся все необходимые для дальнейшего анализа данные полученных экспериментов. Для первой серии экспериментов – это время решения каждой задачи и оценка выделяемой памяти решателем. Для второй серии экспериментов – это время решения каждой задачи, а также сформированные на основе этого данные о масштабируемости, такие как ускорение, эффективность и, где это возможно, о границе масштабируемости и показателе эффективности  $> 50 \%$ .

### 3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

По результатам проведенных численных экспериментов были выведены диаграммы, а также сделана аппроксимация путем создания линии тренда. По полученным результатам были выведены формулы прогнозирования.

В результате проведения первой серии экспериментов – запусков задачи инженерного анализа с варьированием параметров на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» на 1 узле, 12 ядрах, были получены следующие результаты.

#### 3.1. Влияние параметров задачи на время решения

Оценка времени решения в соответствии с параметром релевантности сетки  $x$  соответствует формуле  $y = 0,011x^2 + 2,865x + 188,1$  (см. рис. 2).

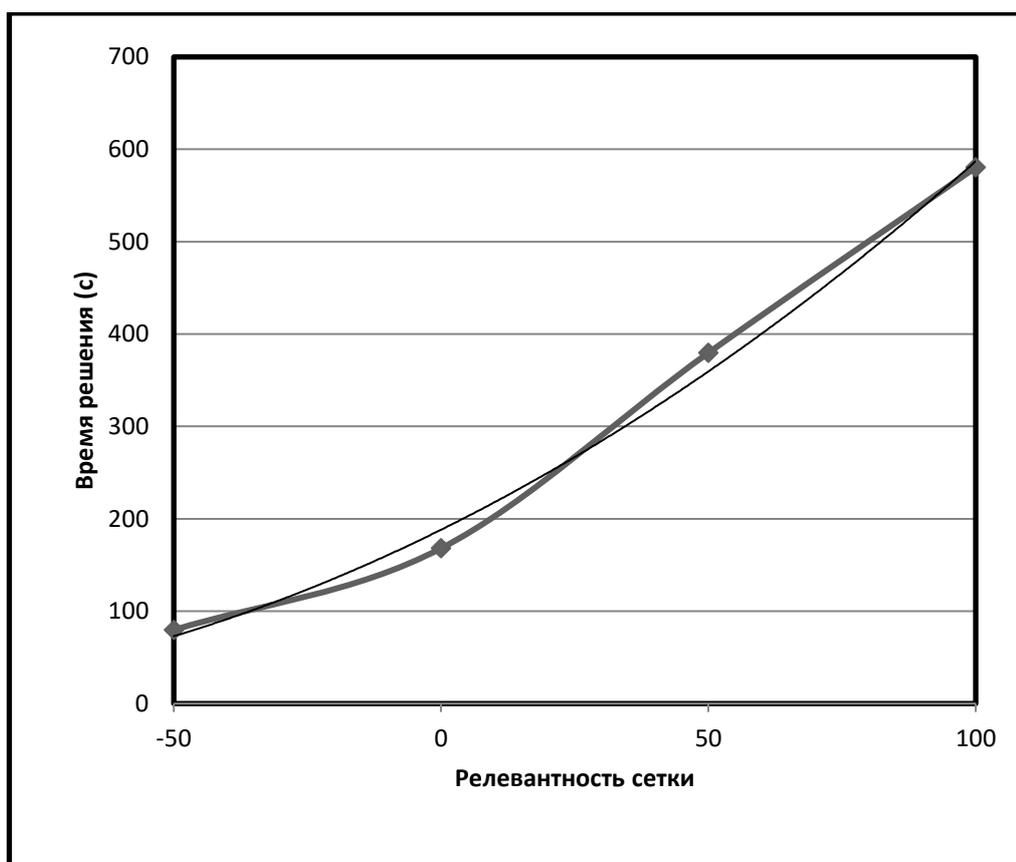


Рис. 2. Влияние релевантности сетки на время решения

Оценка времени решения в соответствии с параметром скорости воды

x соответствует формуле  $y = 1372x^2 - 1579x + 817,1$  (см. рис. 3).

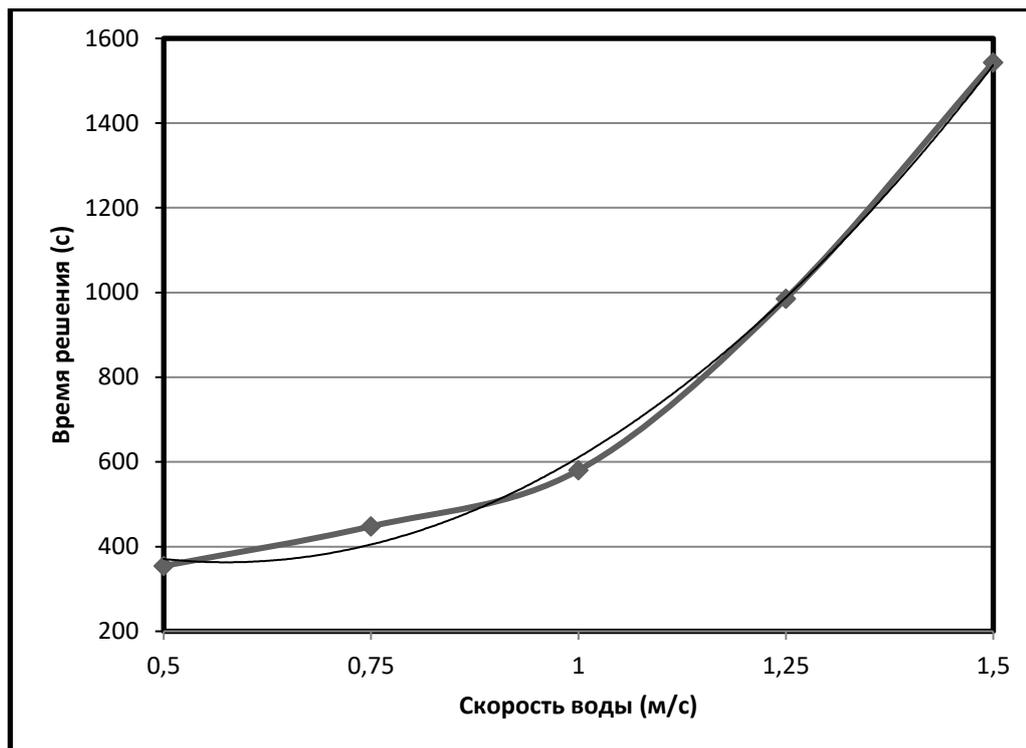


Рис. 3. Влияние скорости воды на время решения

Оценка времени решения в соответствии с параметром количества отводов x соответствует формуле  $y = 20,58x - 35,53$  (см. рис. 4).

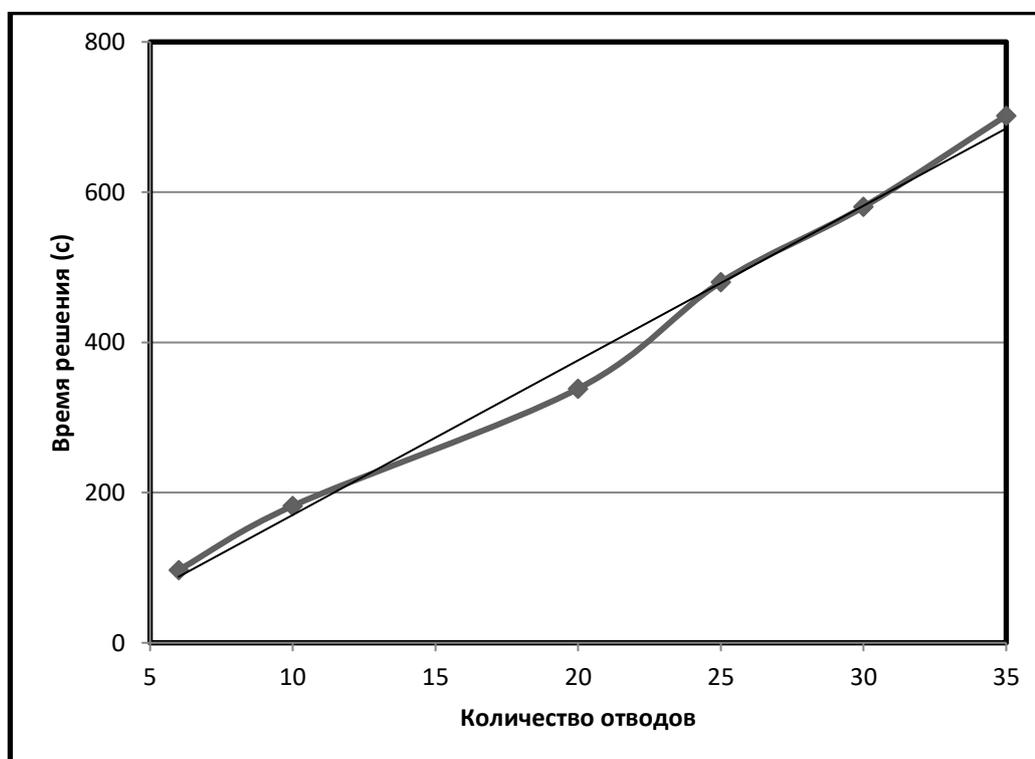


Рис. 4. Влияние количества отводов на время решения

Оценка времени решения в соответствии с параметром длины центральной трубы  $x$  соответствует формуле  $y = -0,205x + 775,8$  (см. рис. 5).

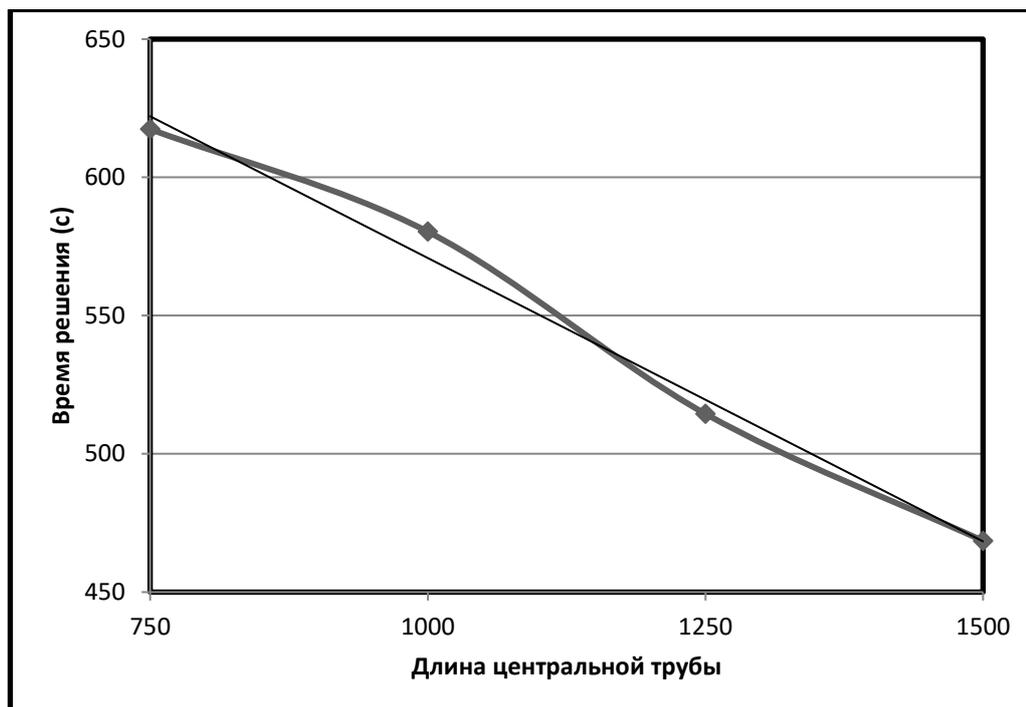


Рис. 5. Влияние длины центральной трубы на время решения

Оценка времени решения в соответствии с параметром диаметра отводов  $x$  соответствует формуле  $y = 7,229x^2 - 90,51x + 764,4$  (см. рис. 6).

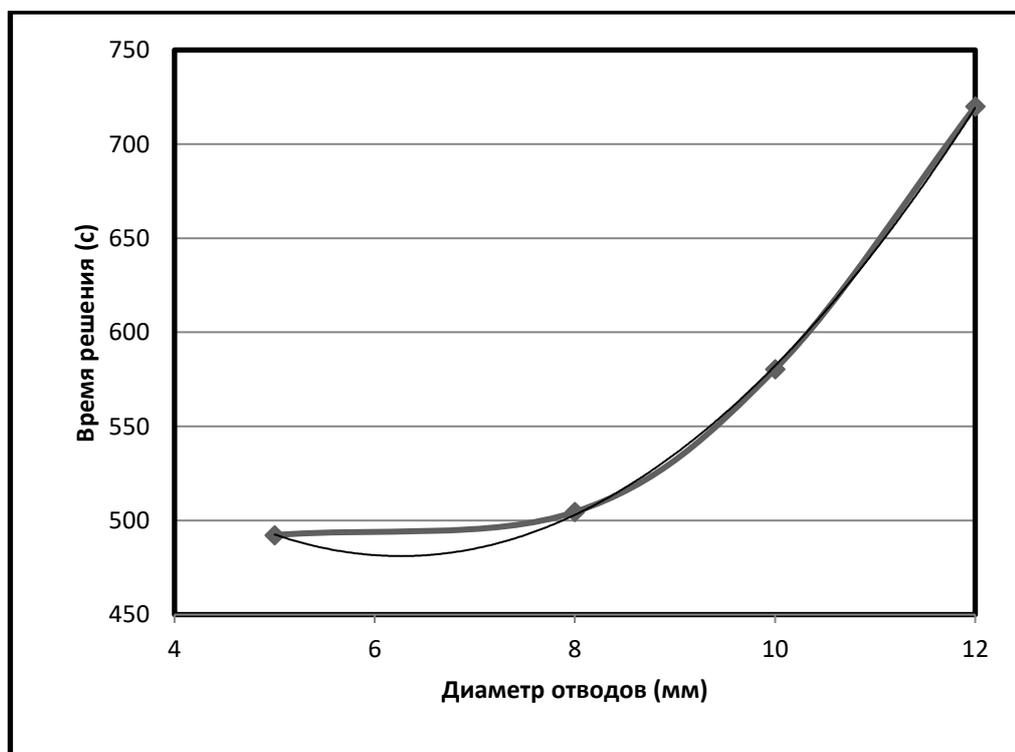


Рис. 6. Влияние диаметра отводов на время решения

### 3.2. Влияние параметров задачи на размер выделяемой памяти

Оценка размера выделяемой памяти решателем в соответствии с параметром релевантности сетки  $x$  соответствует формуле  $y = 0,024x^2 + 5,315x + 974,4$  (см. рис. 7).

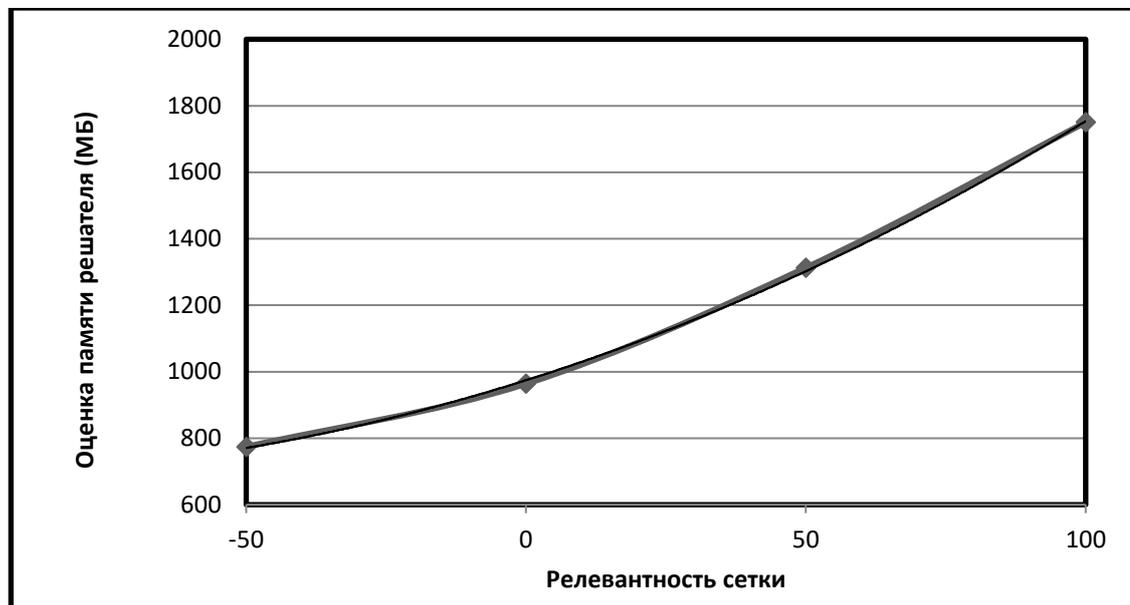


Рис. 7. Влияние релевантности сетки на оценку памяти решателя

Оценка размера выделяемой памяти решателем в соответствии с параметром количества отводов  $x$  соответствует формуле  $y = 36,12x + 664,2$  (см. рис. 8).

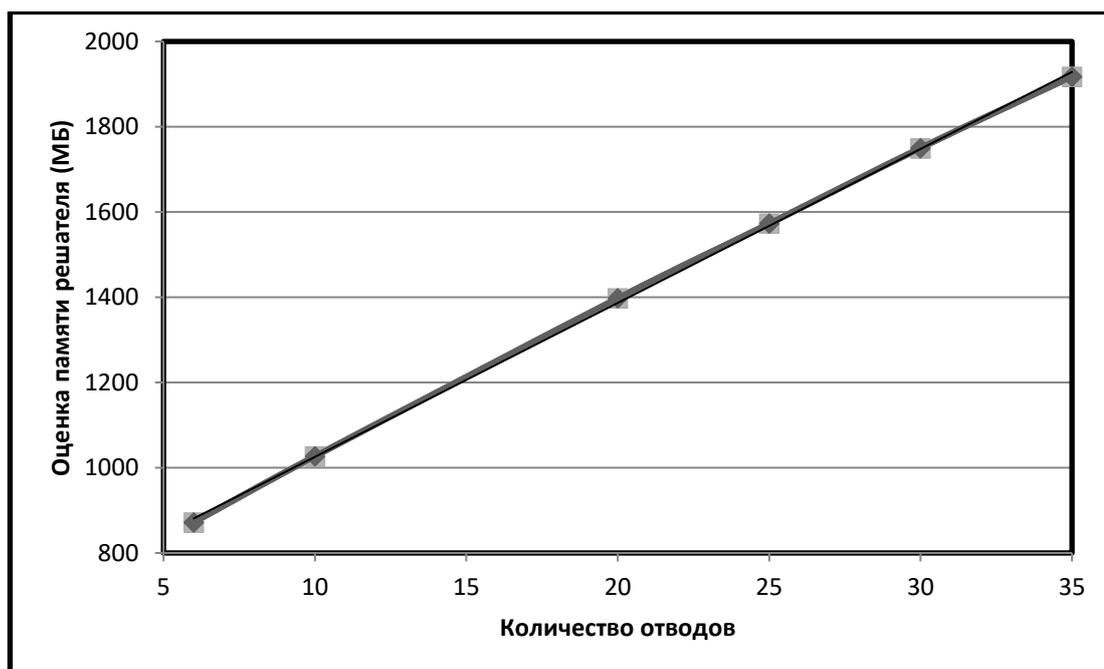


Рис. 8. Влияние количества отводов на оценку памяти решателя

Оценка размера выделяемой памяти решателем в соответствии с параметром длины центральной трубы  $x$  соответствует формуле  $y = -0,00005x^2 + 0,26x + 1565,22$  (см. рис. 9).

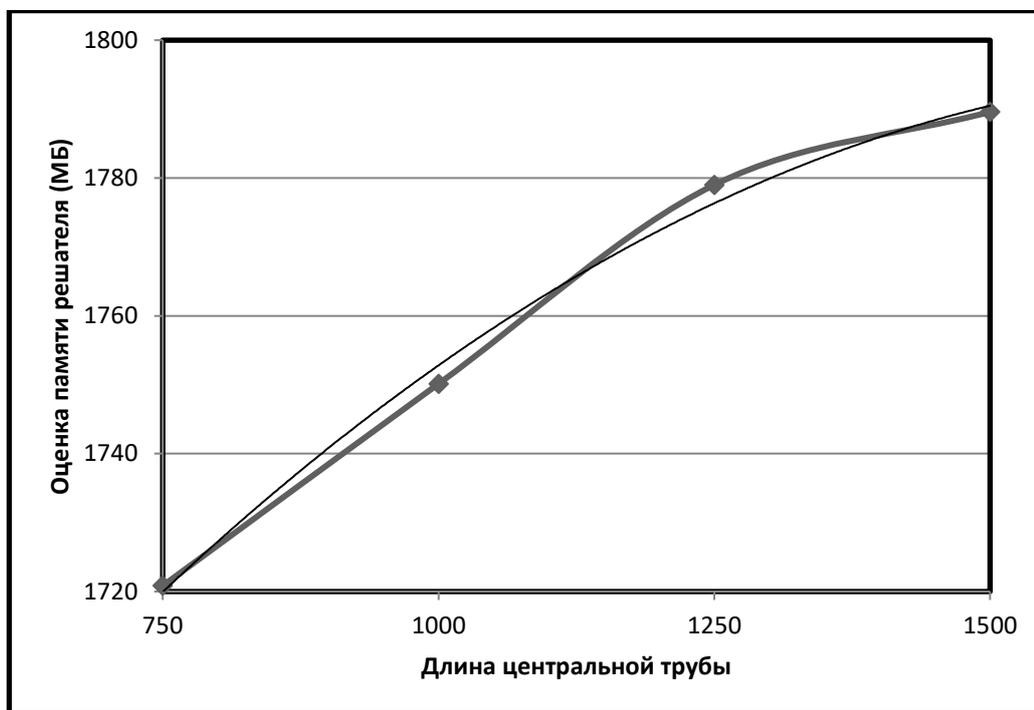


Рис. 9. Влияние длины центральной трубы на оценку памяти решателя

Оценка размера выделяемой памяти решателем в соответствии с параметром диаметра отводов  $x$  соответствует формуле  $y = -206,4x + 3799$  (см. рис. 10).

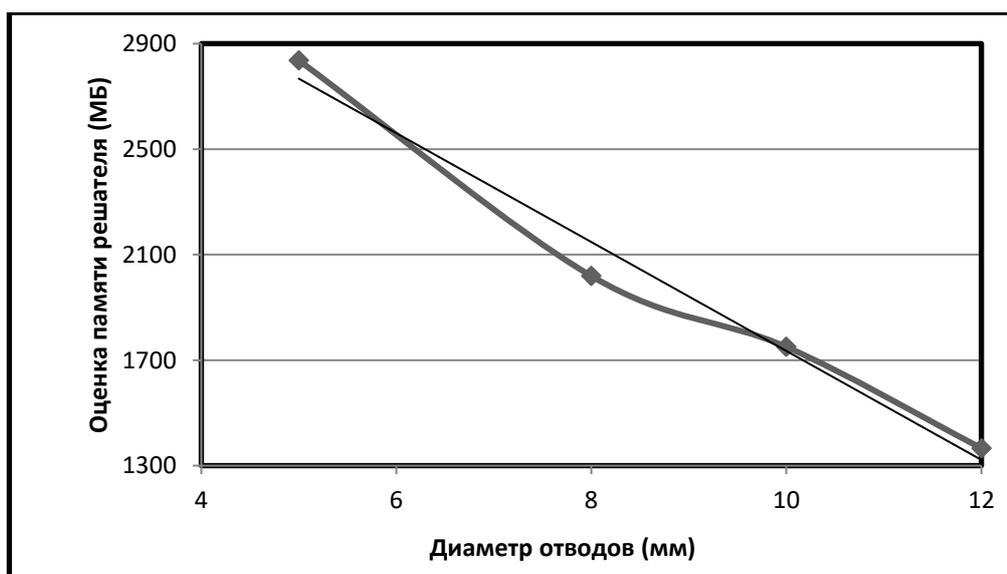


Рис. 10. Влияние диаметра отводов на оценку памяти решателя

Параметр скорости воды не влияет на размер выделяемой памяти решателем.

Результаты первой серии экспериментов показали, что большинство выбранных параметров имеют непосредственное влияние на время решения и оценку памяти решателем, а поэтому по выведенным формулам возможно прогнозирование данных вычислительных ресурсов.

## 4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ НА МАСШТАБИРУЕМОСТЬ

В результате проведения второй серии экспериментов – запусков задачи инженерного анализа с изменением количества ядер и узлов суперкомпьютера «Торнадо ЮУрГУ», были получены следующие результаты.

### 4.1. Влияние параметров задачи на масштабируемость при изменении количества ядер

На рис. 11 и рис. 12 представлены графики влияния релевантности сетки на ускорение по ядрам и эффективности ускорения по ядрам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительно.

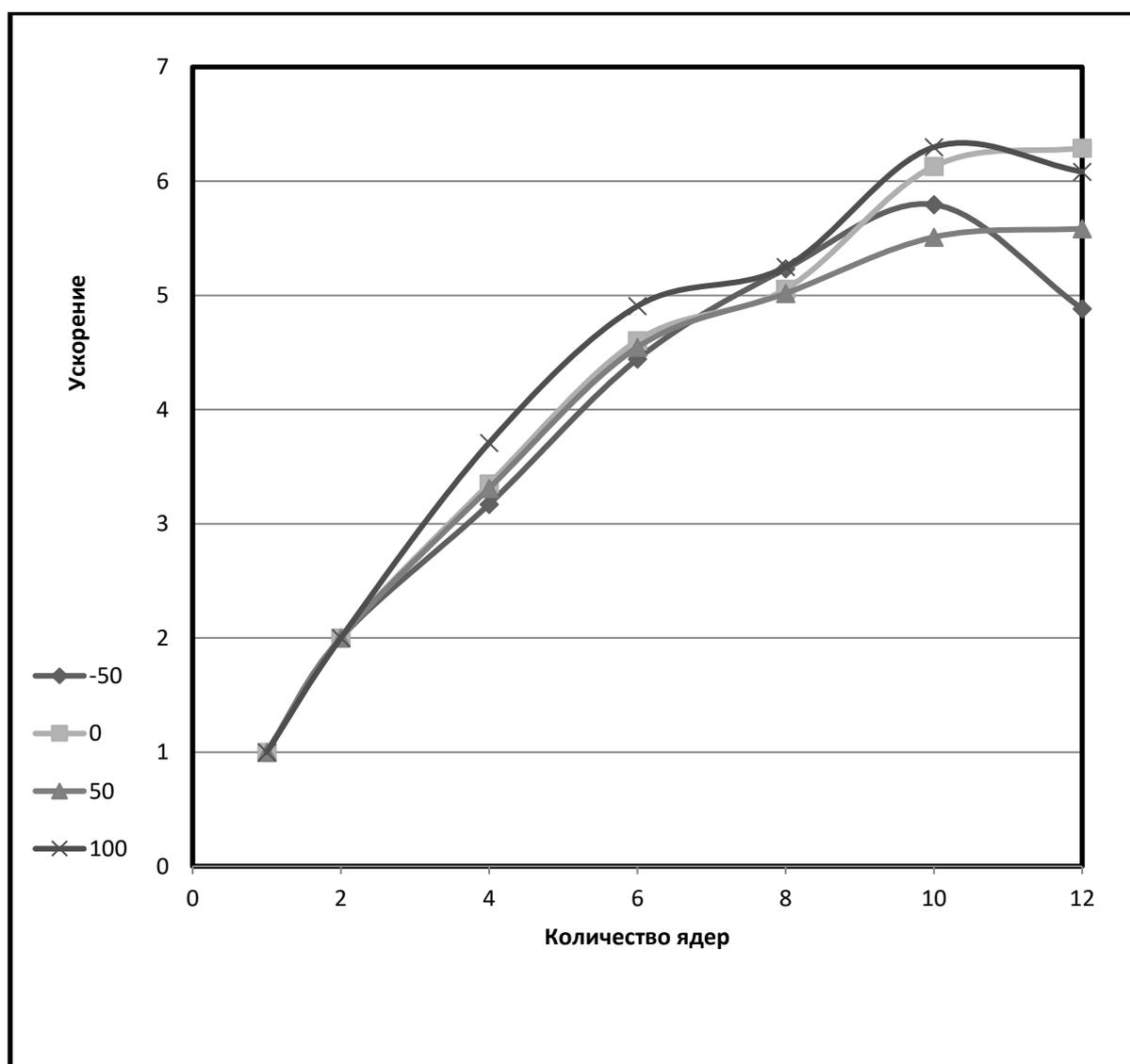


Рис. 11. Влияние релевантности сетки на ускорение по ядрам

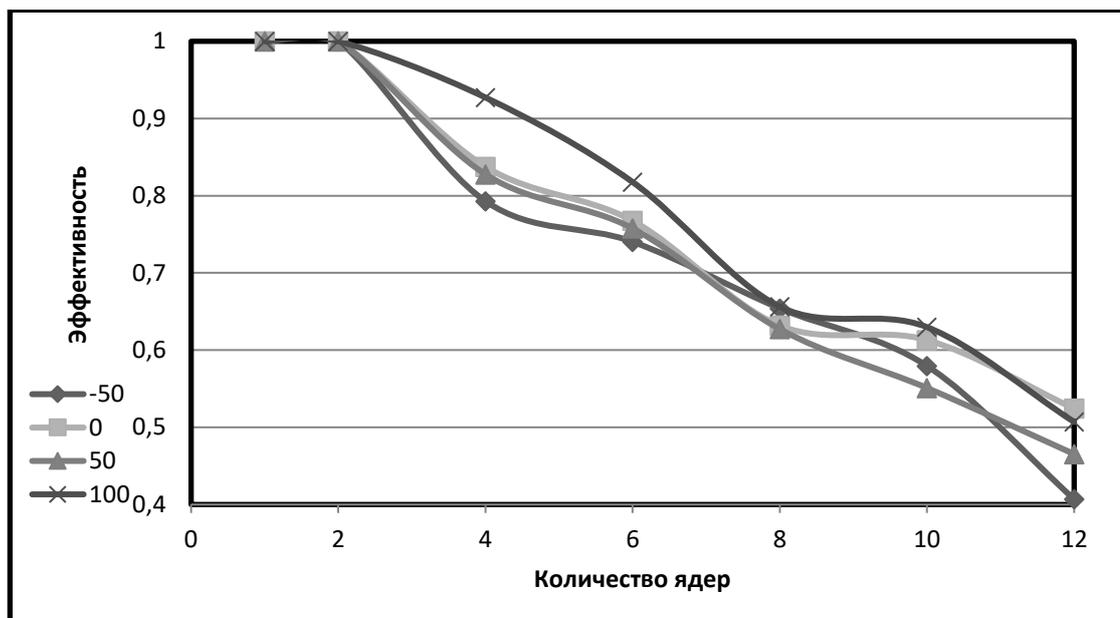


Рис. 12. Влияние релевантности сетки на эффективность ускорения по ядрам

На рис. 13 и рис. 14 представлены графики влияния скорости воды на ускорение по ядрам и эффективности ускорения по ядрам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительно.

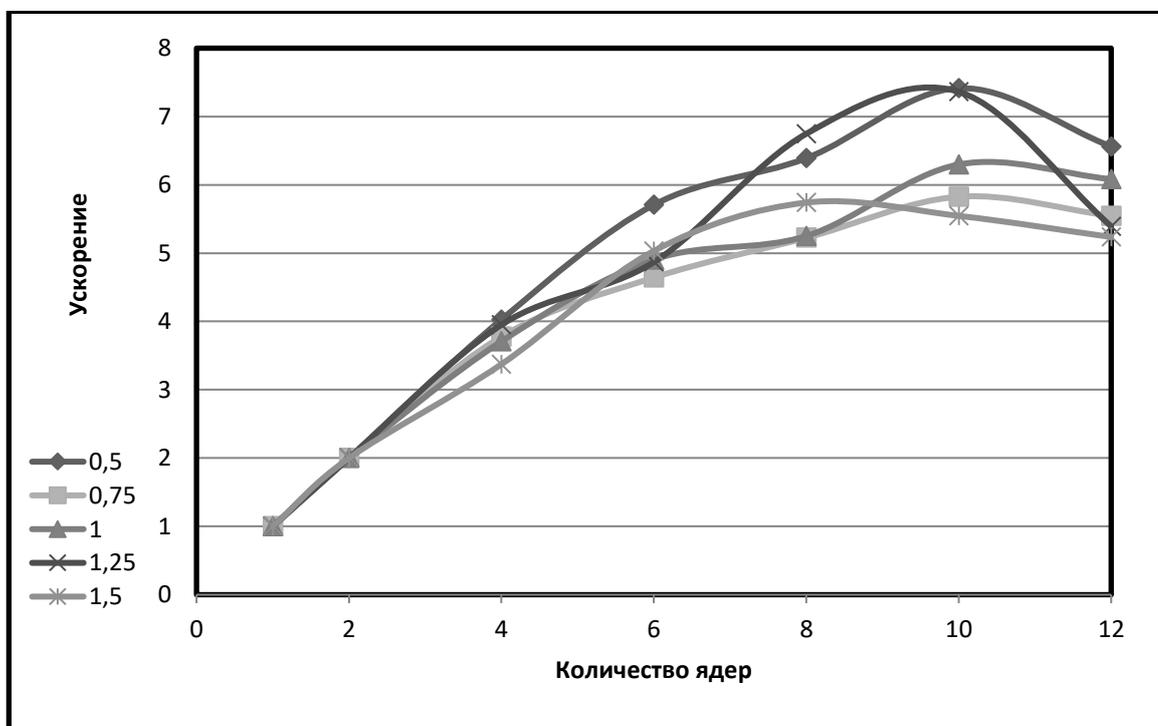


Рис. 13. Влияние скорости воды на ускорение по ядрам

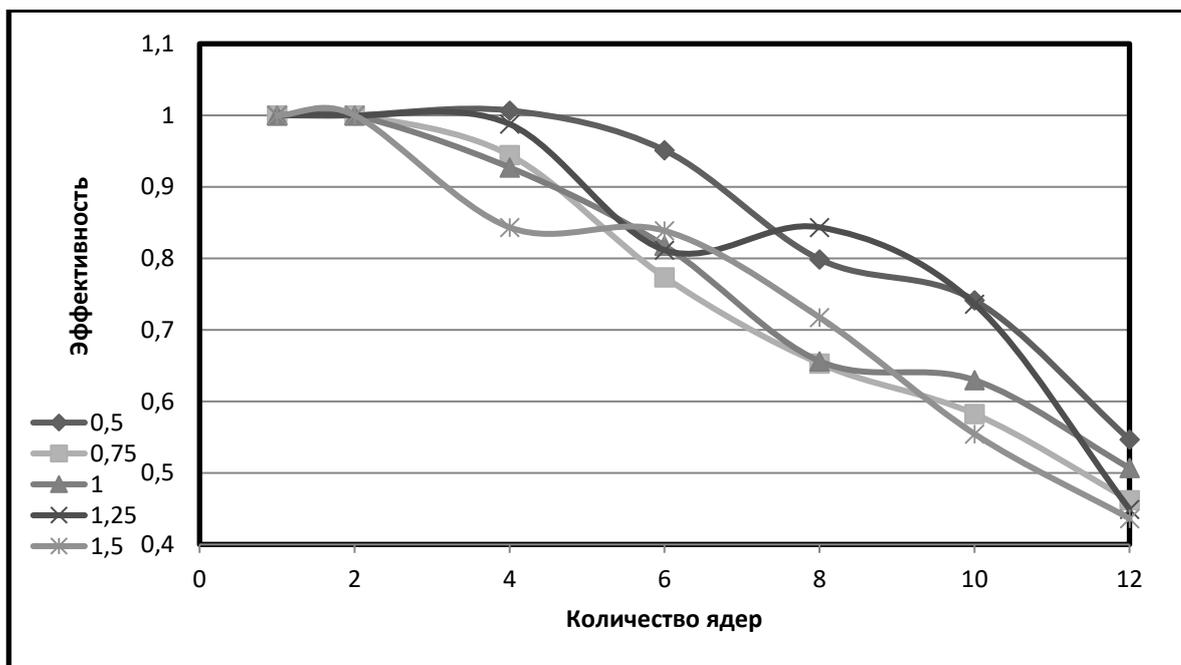


Рис. 14. Влияние скорости воды на эффективность ускорения по ядрам

На рис. 15 и рис. 16 представлены графики влияния количества отводов на ускорение по ядрам и эффективности ускорения по ядрам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительно.

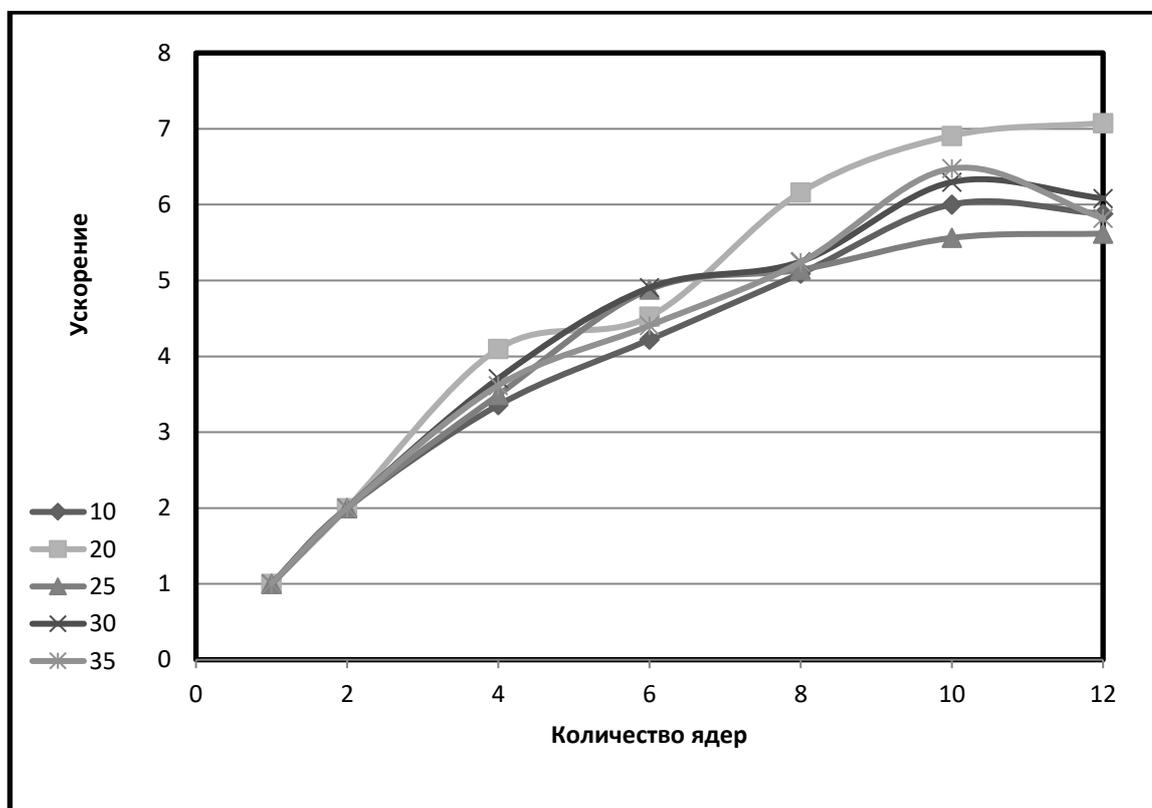


Рис. 15. Влияние количества отводов на ускорение по ядрам

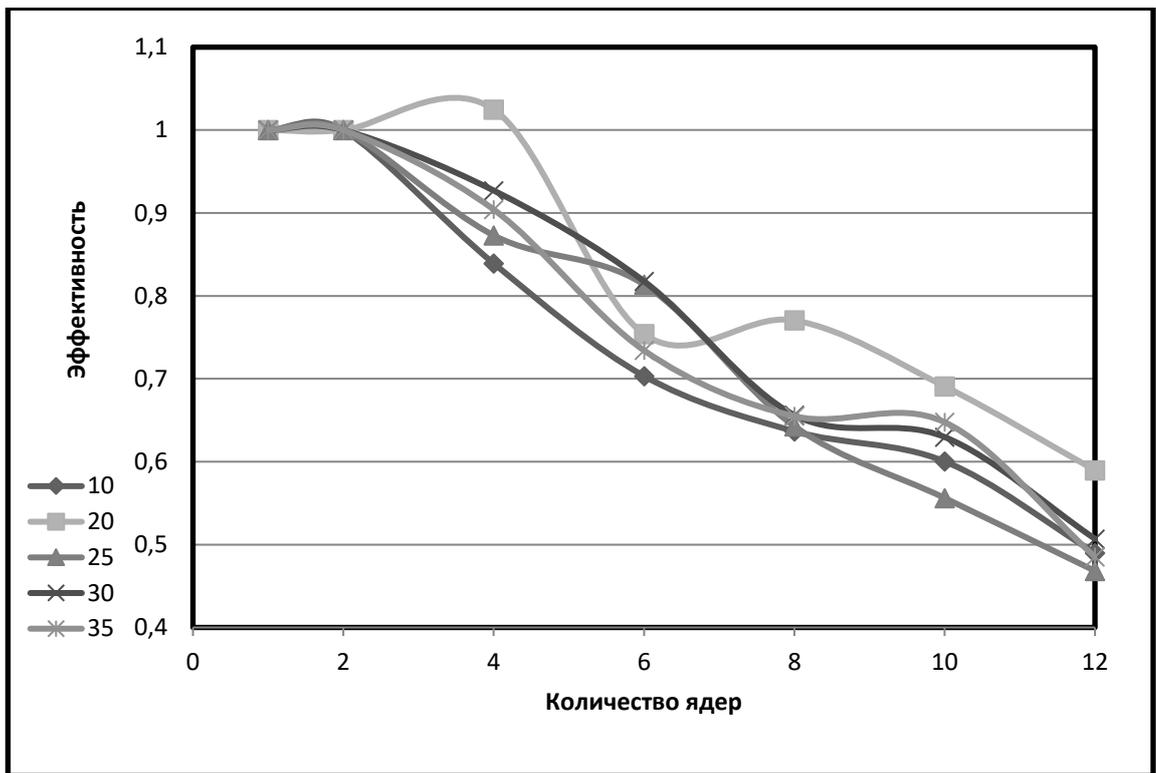


Рис. 16. Влияние количества отводов на эффективность ускорения по ядрам

На рис. 17 и рис. 18 представлены графики влияния длины центральной трубы на ускорение по ядрам и эффективности ускорения по ядрам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительно.

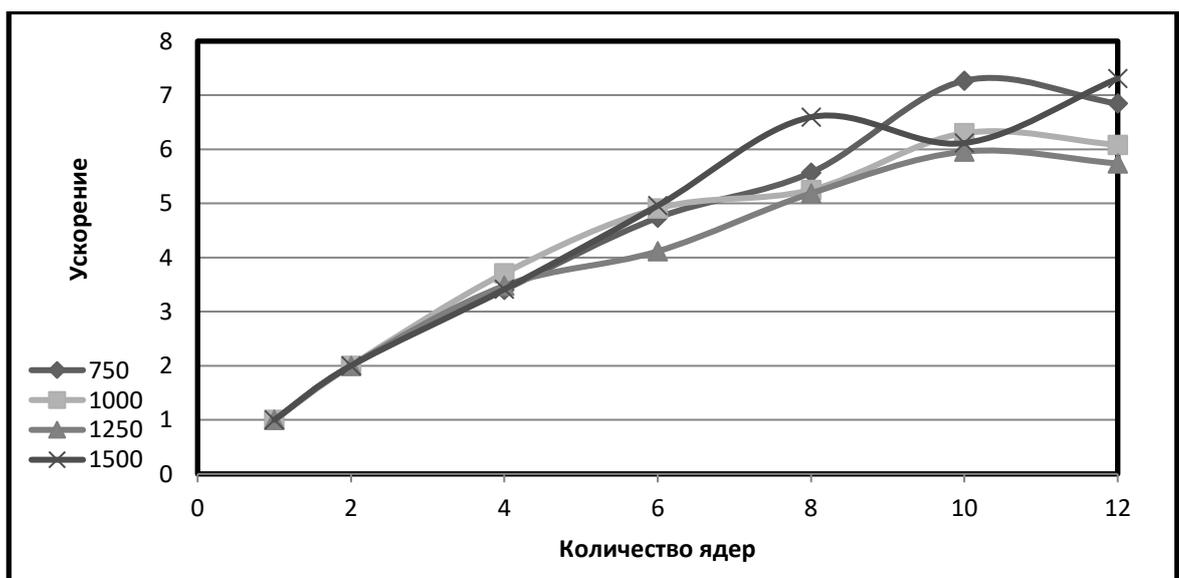


Рис. 17. Влияние длины центральной трубы на ускорение по ядрам

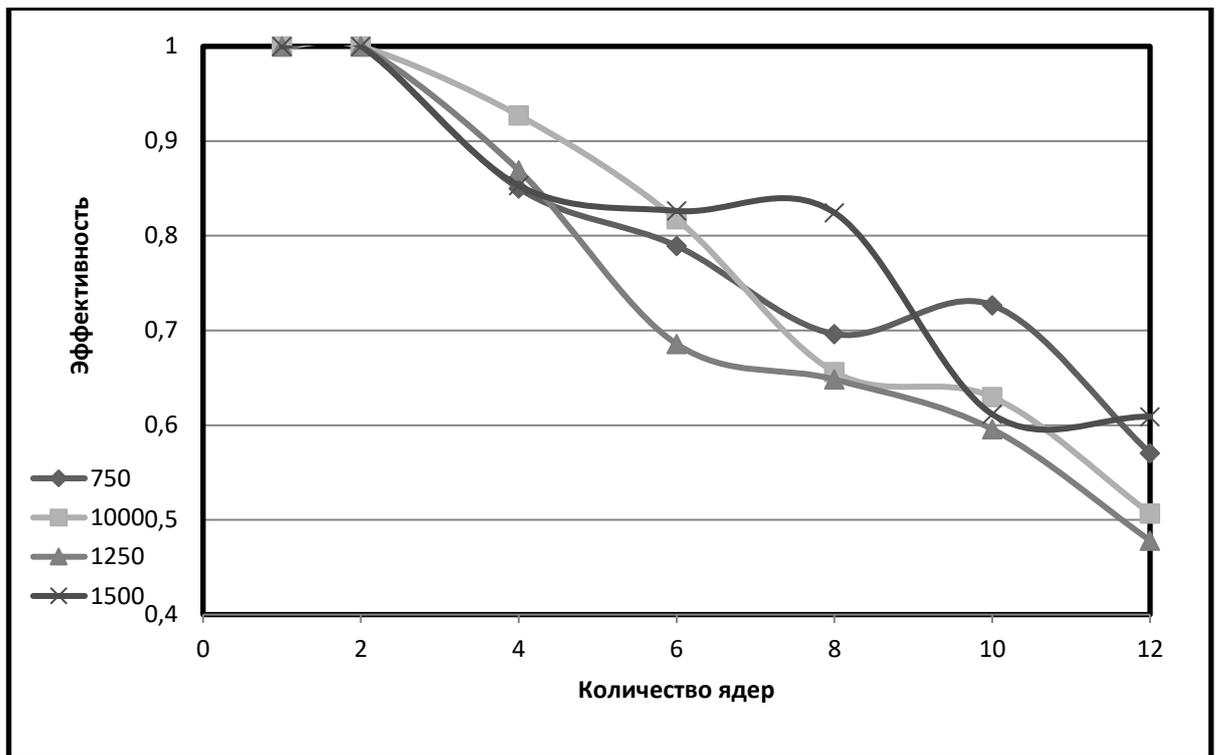


Рис. 18. Влияние длины центральной трубы на эффективность ускорения по ядрам

На рис. 19 и рис. 20 представлены графики влияния диаметра центральной трубы на ускорение по ядрам и эффективности ускорения по ядрам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительно.

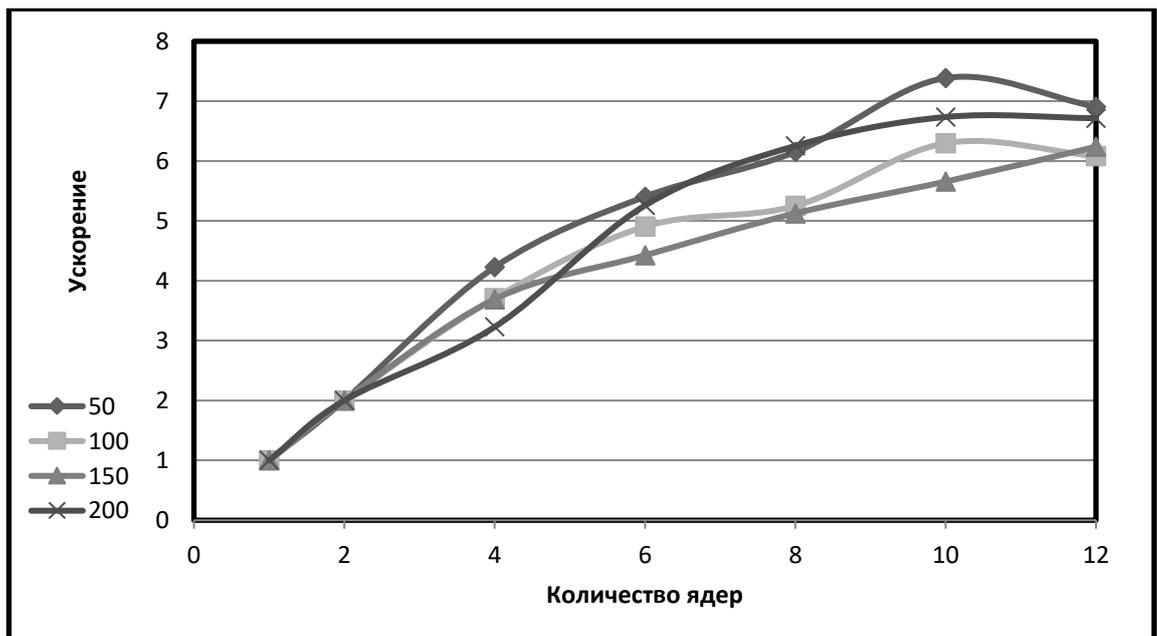


Рис. 19. Влияние диаметра центральной трубы на ускорение по ядрам

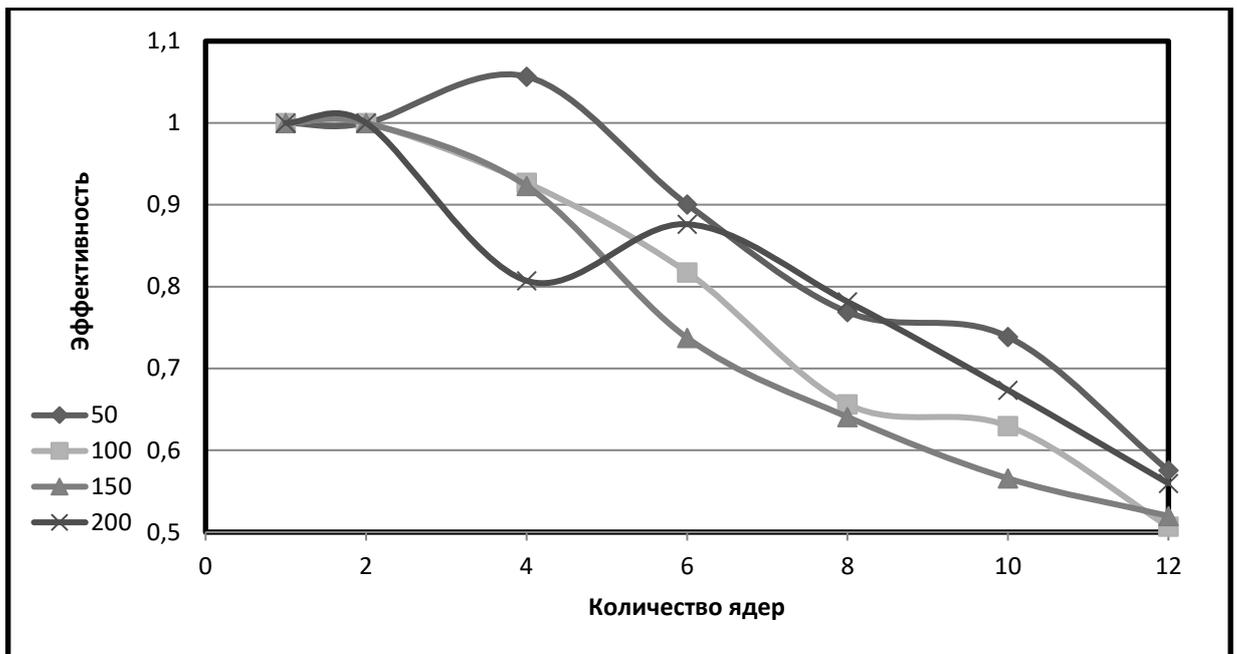


Рис. 20. Влияние диаметра центральной трубы на эффективность ускорения по ядрам

На рис. 21 и рис. 22 представлены графики влияния диаметра отводов на ускорение по ядрам и эффективности ускорения по ядрам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительно.

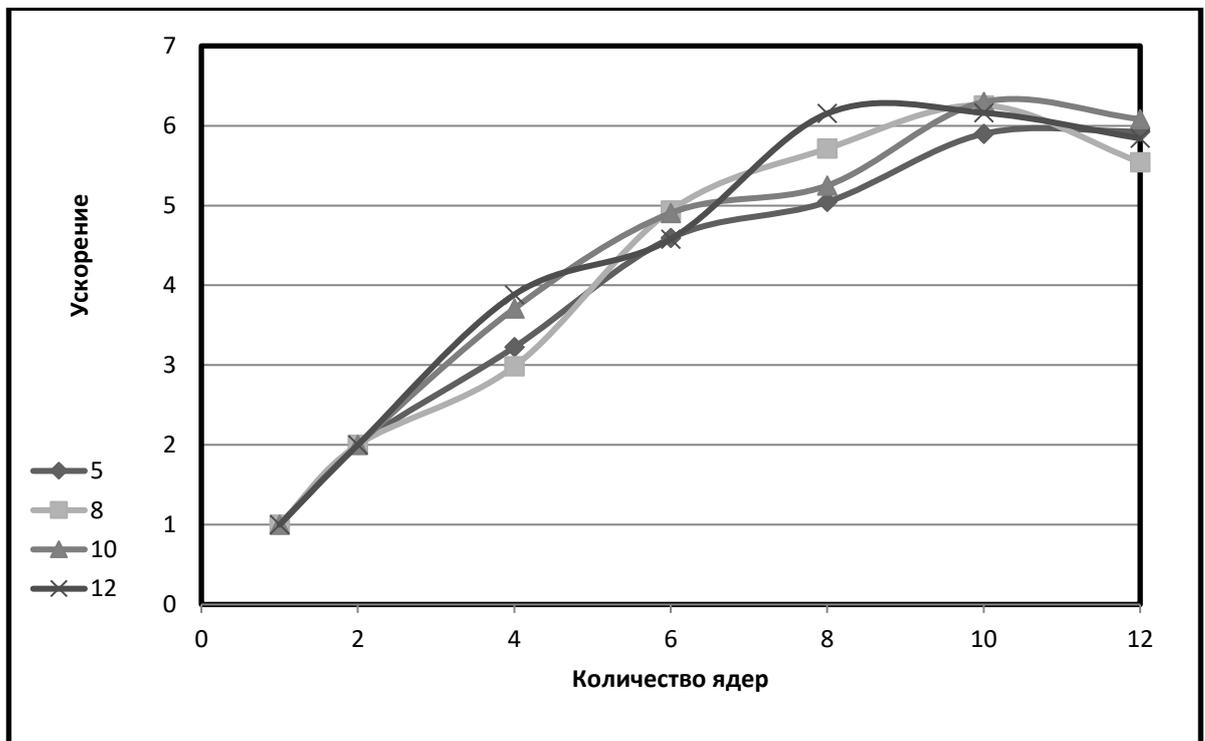


Рис. 21. Влияние диаметра отводов на ускорение по ядрам

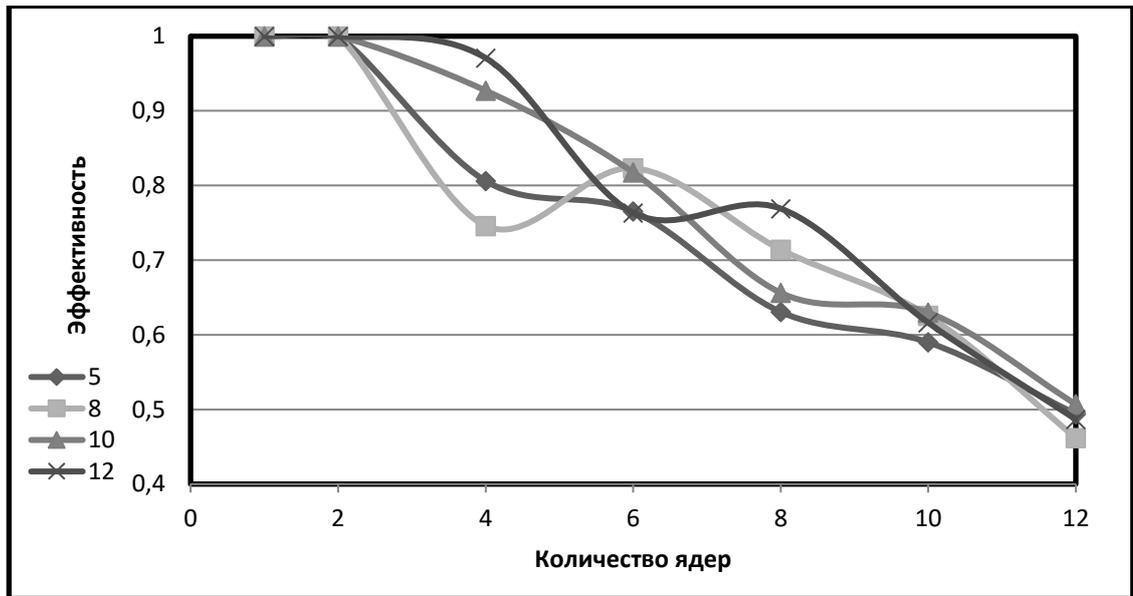


Рис. 22. Влияние диаметра отводов на эффективность ускорения по ядрам

#### 4.2. Влияние параметров задачи на масштабируемость при изменении количества узлов

На рис. 23 и рис. 24 представлены графики влияния релевантности сетки на ускорение по узлам и эффективности ускорения по узлам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость значительное. Ускорение и эффективность ускорения растут с увеличением параметра релевантности сетки, т. е. с увеличением подробности сетки, количества ее узлов.

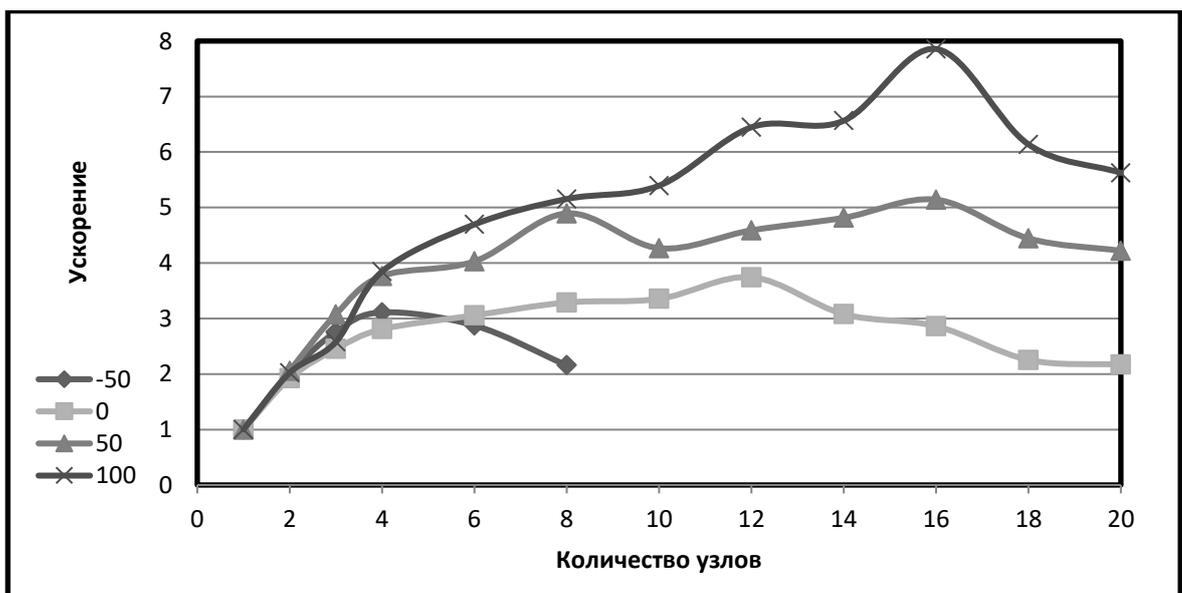


Рис. 23. Влияние релевантности сетки на ускорение по узлам

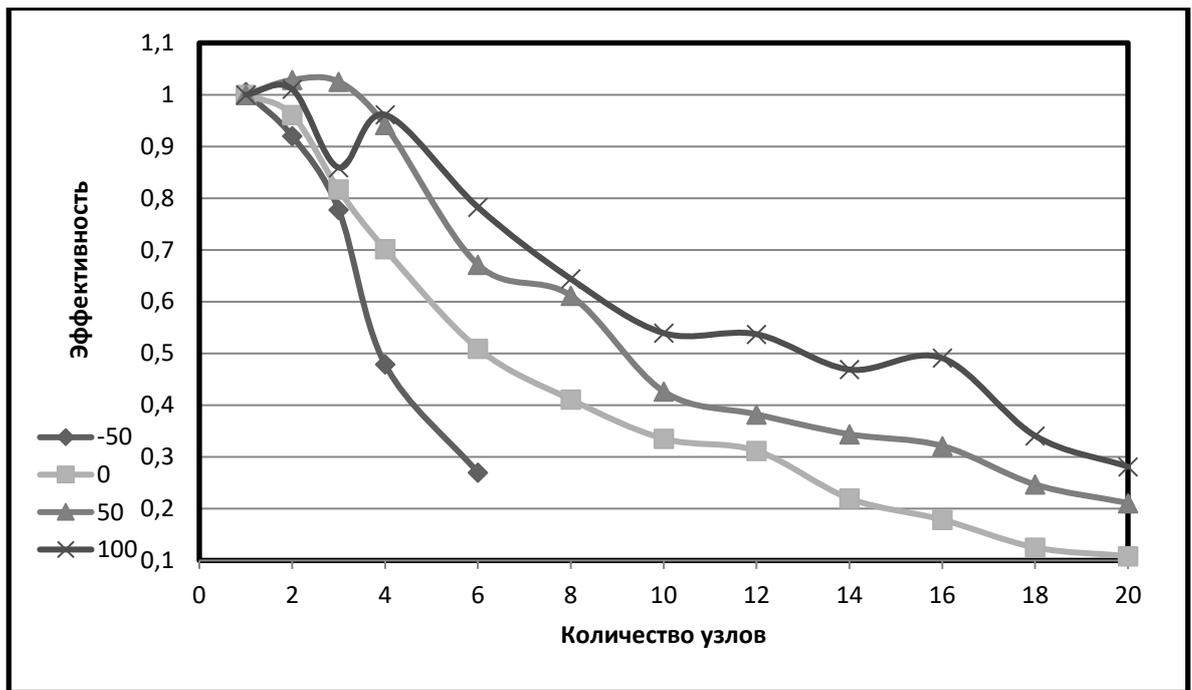


Рис. 24. Влияние релевантности сетки на эффективность ускорения по узлам

На рис. 25 и рис. 26 представлены графики влияния скорости воды на ускорение по узлам и эффективности ускорения по узлам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительное.

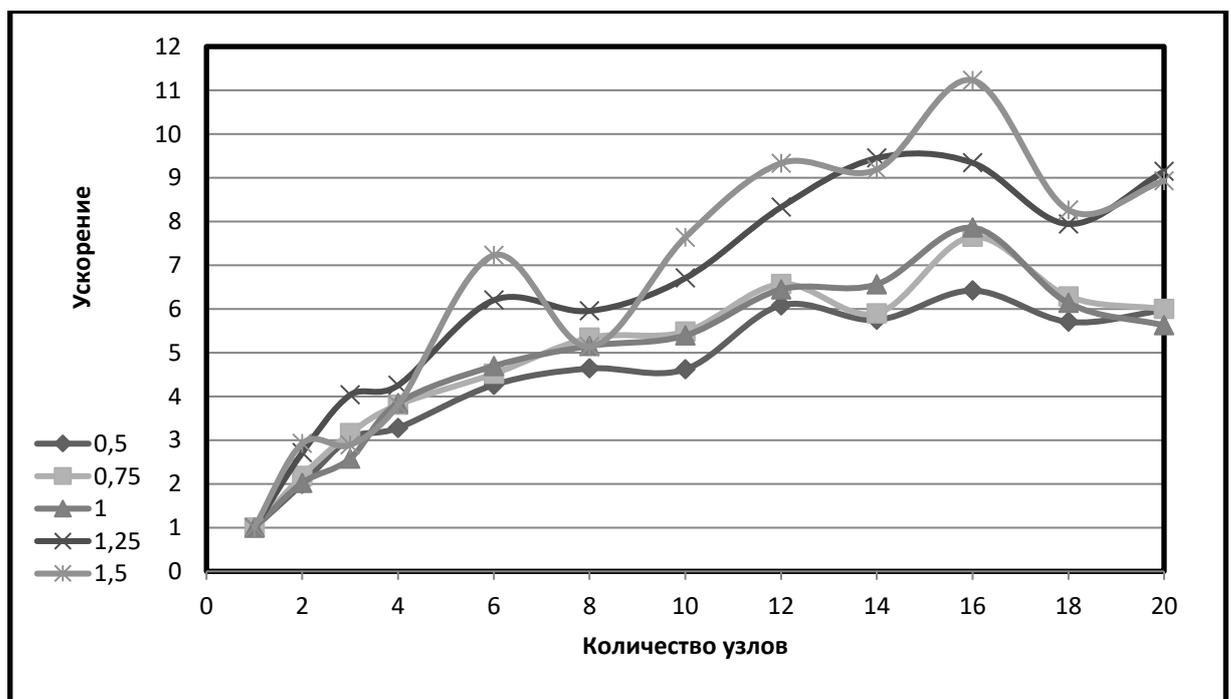


Рис. 25. Влияние скорости воды на ускорение по узлам

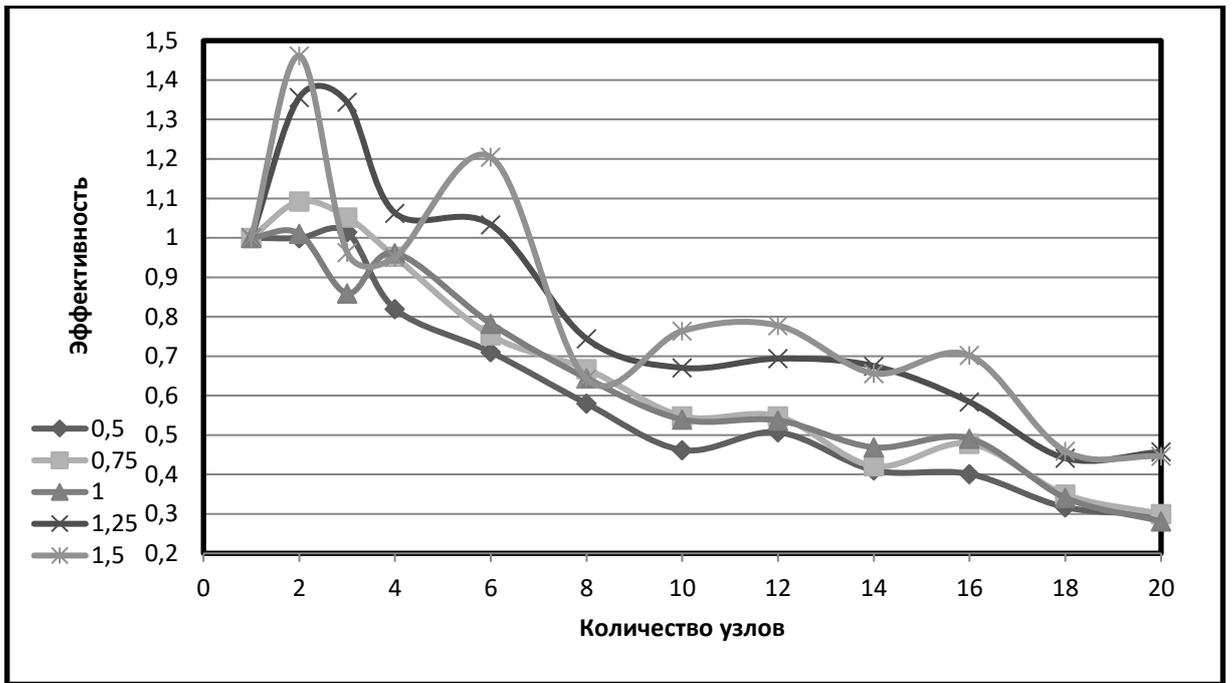


Рис. 26. Влияние скорости воды на эффективность ускорения по узлам

На рис. 27 представлен график влияния количества отводов на ускорение по узлам. Как можно увидеть из этого графика, количество отводов значительно влияет на масштабируемость. Ускорение увеличивается с увеличением количества отводов.

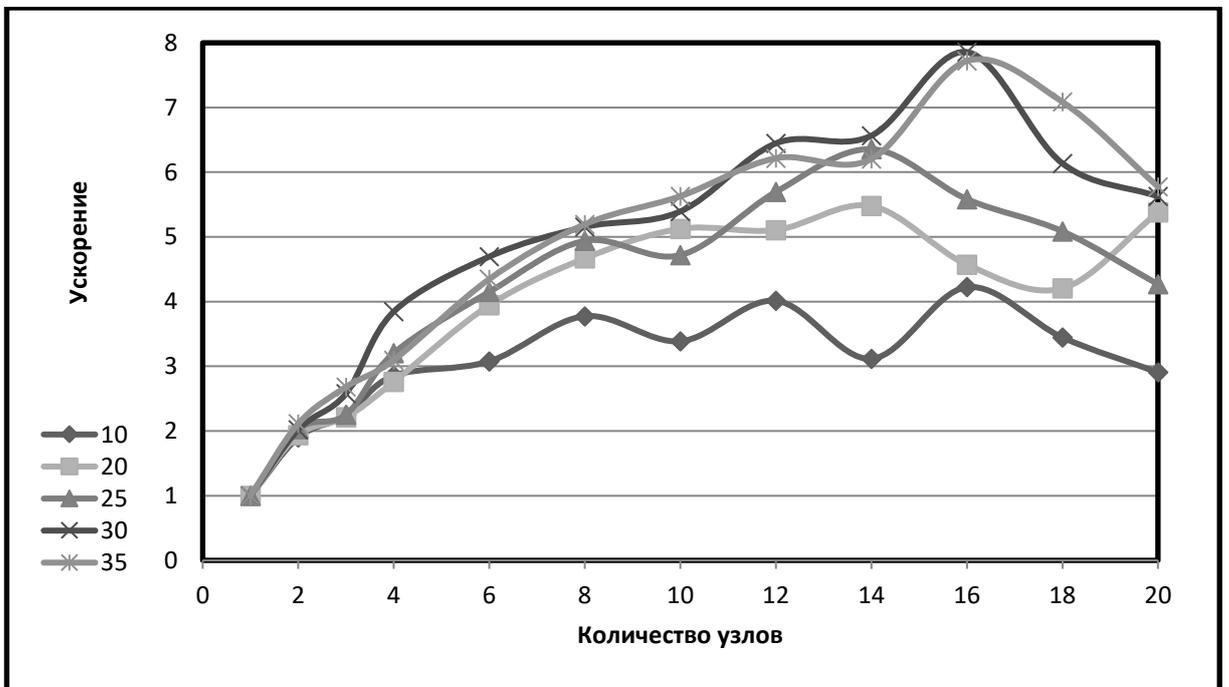


Рис. 27. Влияние количества отводов на ускорение по узлам

Граница масштабируемости в таком случае в соответствии с параметром количества отводов  $x$  соответствует формуле  $y = -0,208x^2 + 7,25x - 33,66$  (см. рис. 28).

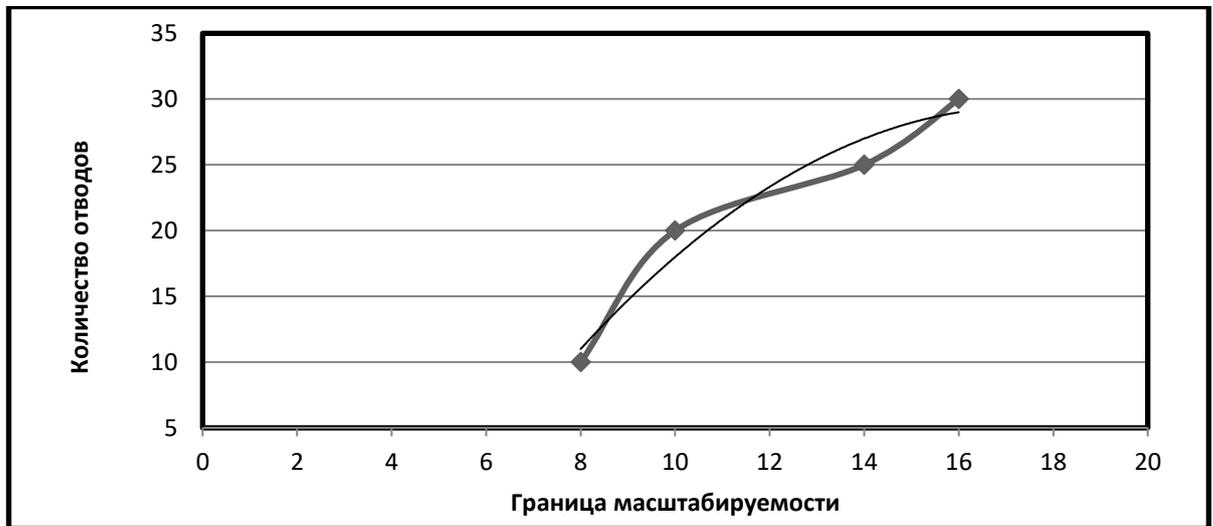


Рис. 28. Влияние количества отводов на границу масштабируемости

На рис. 29 представлен график влияния количества отводов на эффективность ускорения по узлам. Эффективность ускорения также увеличивается с увеличением количества отводов.

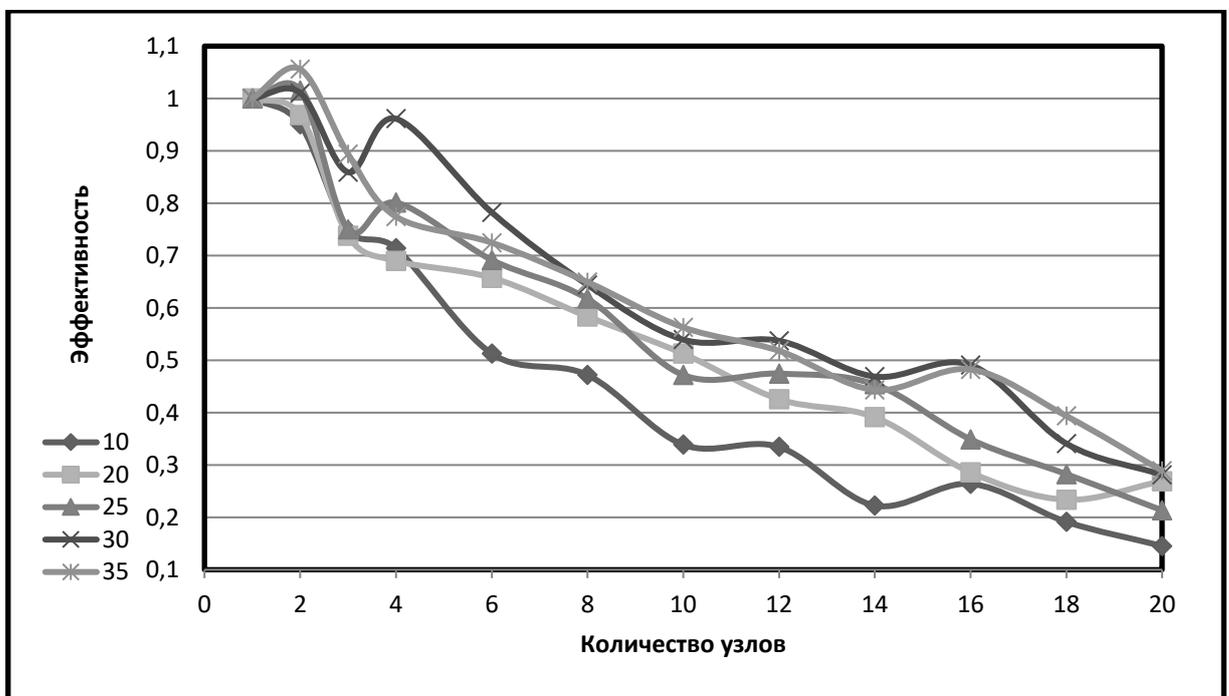


Рис. 29. Влияние количества отводов на эффективность ускорения по узлам

Показатель эффективности  $y \approx 50\%$  в таком случае в соответствии с параметром количества отводов  $x$  соответствует формуле  $y = -0,104x^2 + 4,310x - 12,21$  (см. рис. 29).

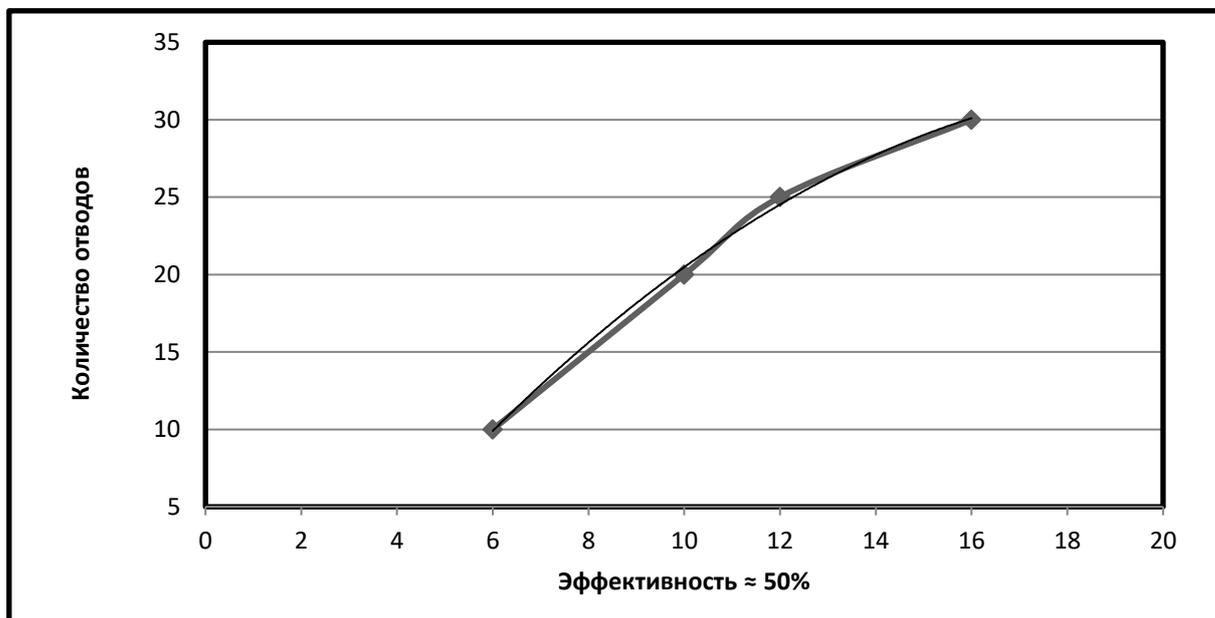


Рис. 30. Влияние количества отводов на показатель эффективности  $\approx 50\%$

На рис. 31 и рис. 32 представлены графики влияния длины центральной трубы на ускорение по узлам и эффективности ускорения по узлам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительное.

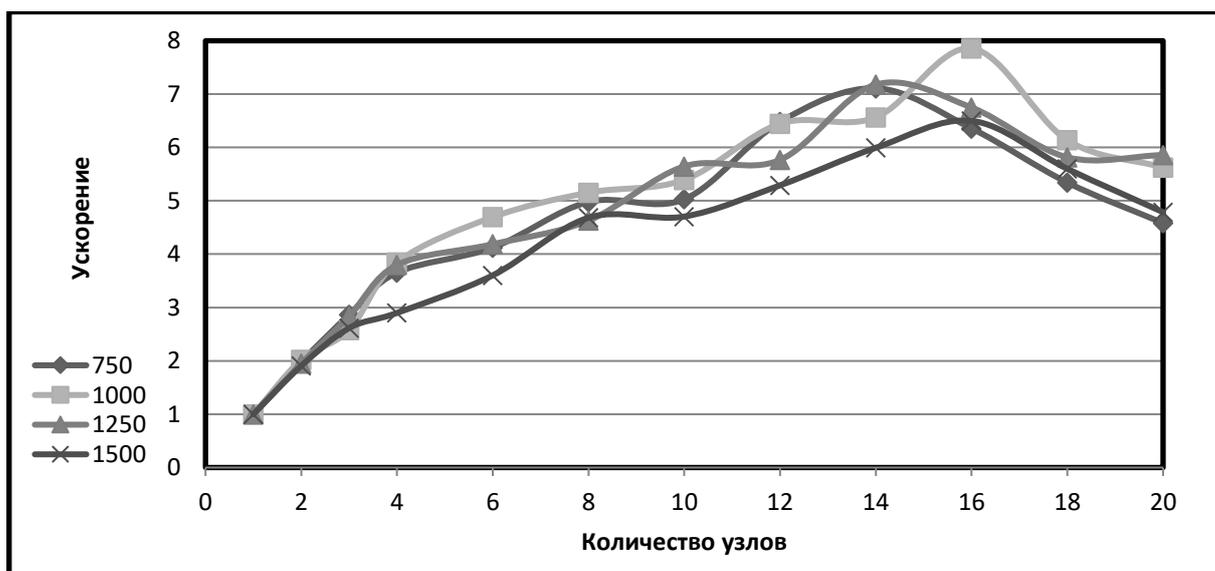


Рис. 31. Влияние длины центральной трубы на ускорение по узлам

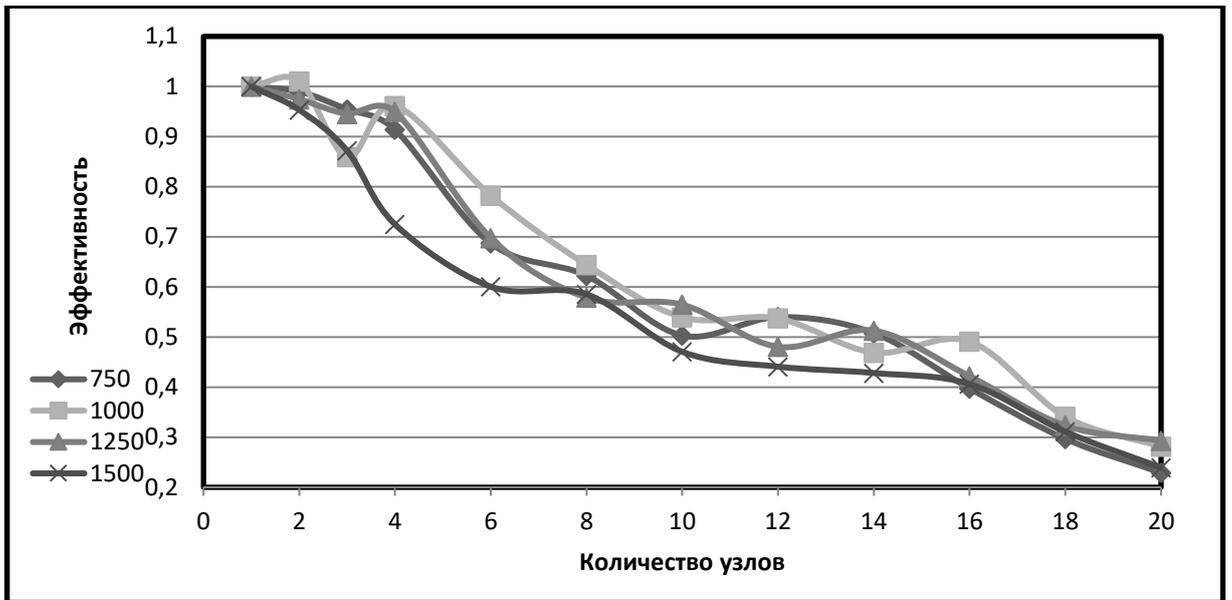


Рис. 32. Влияние длины центральной трубы на эффективность ускорения по узлам

На рис. 33 и рис. 34 представлены графики влияния диаметра центральной трубы на ускорение по узлам и эффективности ускорения по узлам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительное.

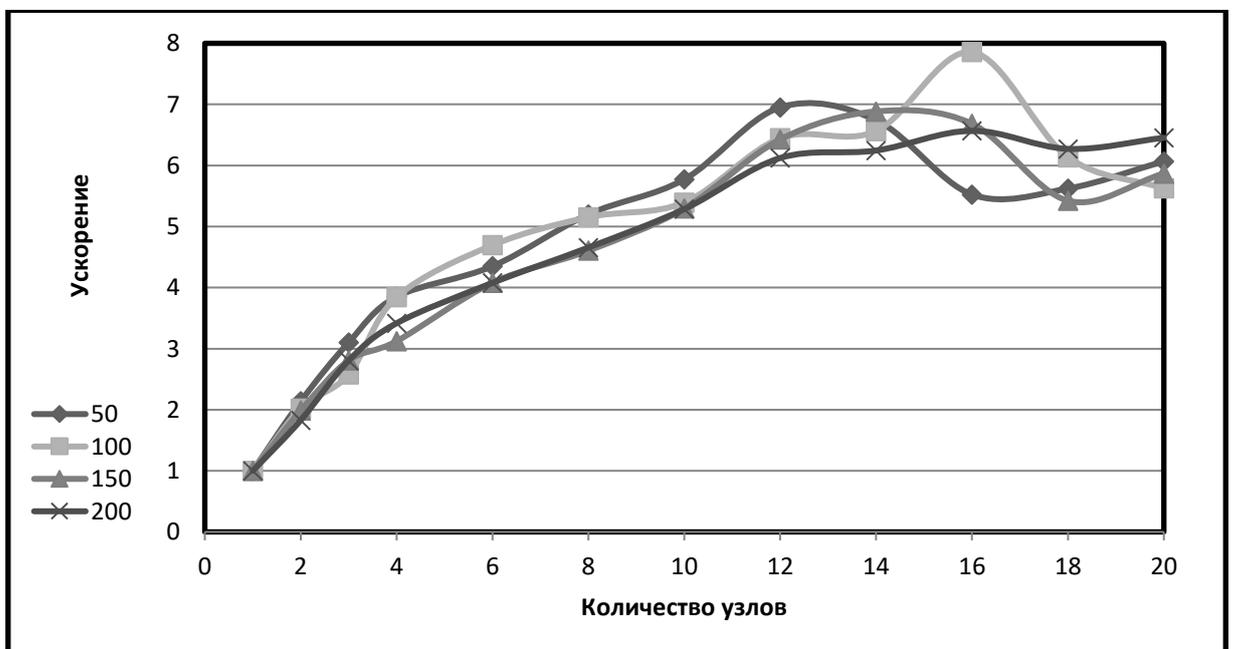


Рис. 33. Влияние диаметра центральной трубы на ускорение по узлам

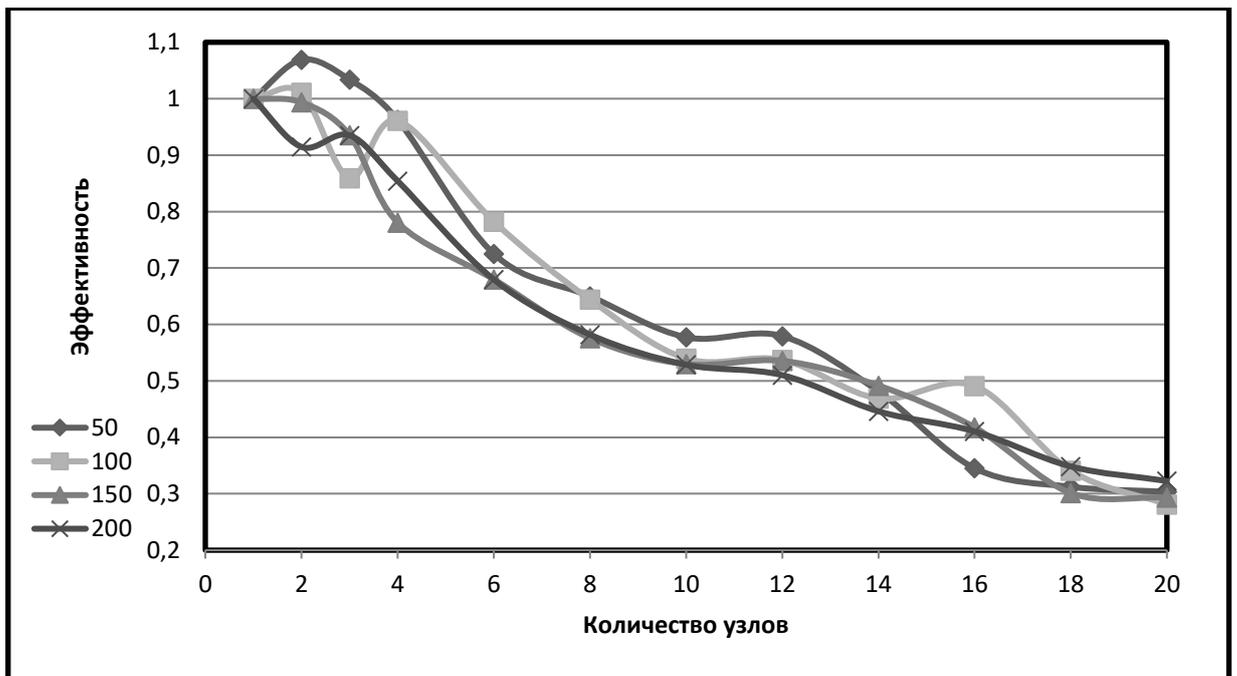


Рис. 34. Влияние диаметра центральной трубы на эффективность ускорения по узлам

На рис. 35 и рис. 36 представлены графики влияния диаметра отводов на ускорение по узлам и эффективности ускорения по узлам соответственно. Как можно увидеть из этих графиков, влияние данного параметра на масштабируемость незначительное.

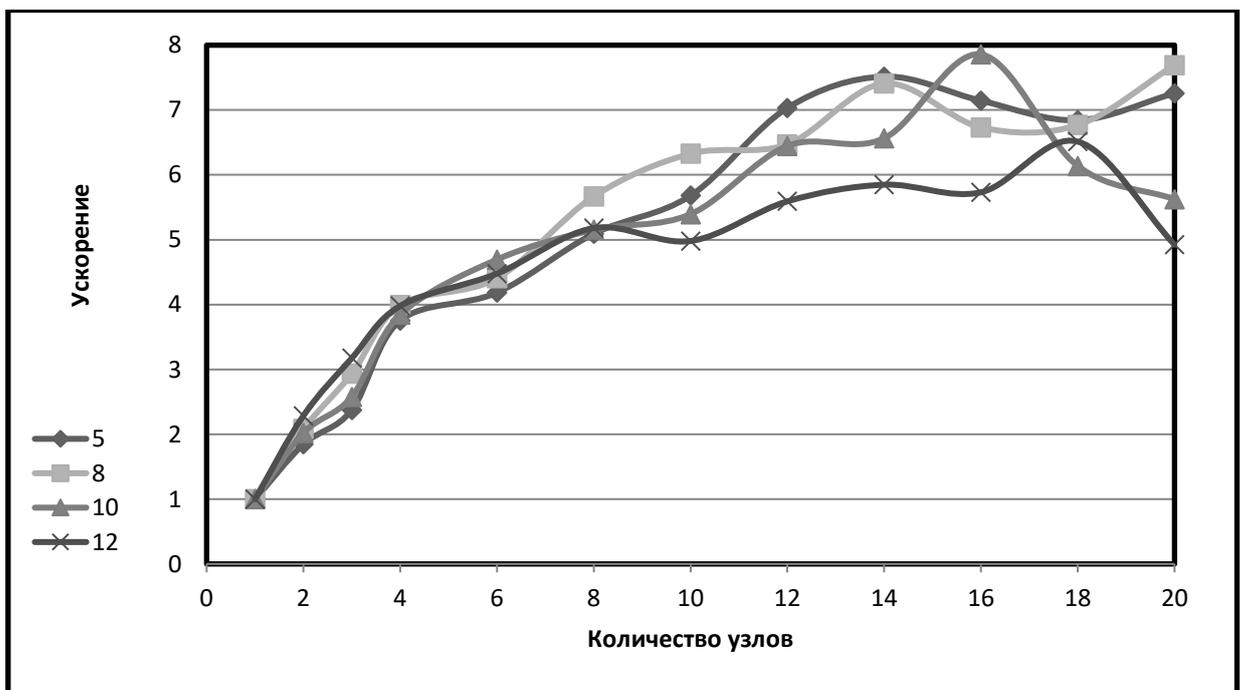


Рис. 35. Влияние диаметра отводов на ускорение по узлам

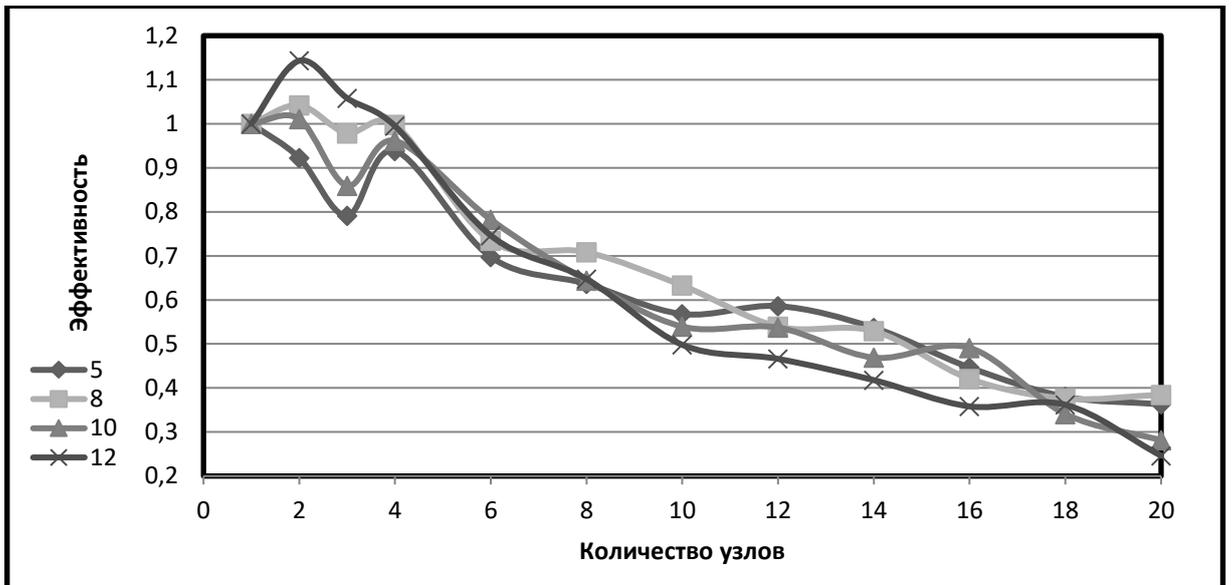


Рис. 36. Влияние диаметра отводов на эффективность ускорения по узлам

Результаты второй серии экспериментов показали, что явное влияние на масштабируемость по узлам имеет изменение параметра релевантности сетки и количества отводов. При этом ускорение по узлам и эффективность ускорения увеличиваются с увеличением параметра релевантности сетки и количества отводов. По полученным результатам были выведены формулы прогнозирования, где это возможно.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе было проведено исследование возможностей пакета инженерного моделирования ANSYS CFX в проектировании и решении задач гидрогазодинамики, а также выведены формулы прогнозирования вычислительных ресурсов при решении такого класса задач.

В ходе работы были рассмотрены методы построения инженерной модели в пакете ANSYS CFX, основные этапы построения модели. Спроектирована типовая задача гидрогазодинамики, выбраны основные параметры модели, а также границы варьирования данных параметров. В результате многократных запусков данной модели на суперкомпьютере с изменением ее параметров получены данные о влиянии таких параметров на время выполнения задачи, оценку памяти решателем и масштабируемость. На основе полученных данных выведены формулы прогнозирования вычислительных ресурсов по значениям параметров инженерной задачи.

Данная работа выполнялась в рамках Гранта РФФИ № 15-29-07959 офи-м (2015-2017 гг.): «Разработка методов и алгоритмов планирования выполнения потоковых приложений при решении задач инженерного анализа в распределенных вычислительных средах».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSYS CFX. Introduction. ANSYS CFX Release 15.0. – U.S.A.: ANSYS, Inc, 2013. – 64 P.
2. ANSYS CFX. Tutorials. ANSYS CFX Release 11.0. – U.S.A.: ANSYS, Inc, 2006. – 416 P.
3. ANSYS Engineering Simulation Software. [Электронный ресурс] URL: <http://www.ansys-blog.com/> (дата обращения: 14.04.2018).
4. ANSYS Workbench User's Guide. ANSYS Release 12.1. – U.S.A.: ANSYS, Inc, 2009. – 120 P.
5. Cadfem CIS. [Электронный ресурс] URL: <https://www.cadfem-cis.ru/> (дата обращения: 14.04.2018).
6. Gašparovič P., Astaloš J. Scalability of computing acceleration on cluster with processors Intel Xeon. // Conference: TechSoft Engineering ANSYS. 2015. – P. 1–7.
7. HPC Advisory Council. [Электронный ресурс] URL: [www.hpcadvisorycouncil.com/](http://www.hpcadvisorycouncil.com/) (дата обращения: 20.04.2018).
8. Васильев В.А., Калмыкова М.А. Анализ и выбор программных продуктов для решения инженерных задач приборостроения. // Современная техника и технологии. 2013. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2013/03/1702> (дата обращения: 25.04.2018).
9. Лаборатория суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ. [Электронный ресурс] URL: <http://supercomputer.susu.ru/> (дата обращения: 28.04.2018).
10. Официальный сайт группы компаний «ПЛМ Урал». [Электронный ресурс] URL: <https://cae-expert.ru/> (дата обращения: 20.04.2018).
11. Официальный сайт компании ANSYS. [Электронный ресурс] URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 20.04.2018).
12. Официальный сайт компании CD-adapco group. [Электронный ре-

сурс] URL: <http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CD/> (дата обращения: 20.04.2018).

13. Официальный сайт компании LSTC. [Электронный ресурс] URL: <http://www.lstc.com/> (дата обращения: 20.04.2018).

14. Официальный сайт компании OpenCFD, Limited. [Электронный ресурс] URL: <http://www.openfoam.com/> (дата обращения: 20.04.2018).

15. Сайт Международной Академии исследований будущего. [Электронный ресурс] URL: <http://www.maib.ru/> (дата обращения: 28.04.2018).