

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.75

Царевич  
Дмитрий Юрьевич

Модели и алгоритмы распределенных вычислений  
в локальных вычислительных сетях

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-40 80 05 Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Научный руководитель  
Бахтизин Вячеслав Вениаминович  
к.т.н., доцент

Минск 2014

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в связи с интенсивным развитием научной, экономической и медицинской сфер человеческой деятельности растут потребности общества в вычислительных ресурсах, необходимых для обработки информации. Для удовлетворения этих потребностей необходимы такие способы организации вычислительных процессов, которые соответствуют установленным временным требованиям – высокая производительность, всеобщая доступность, масштабируемость, безопасность, прозрачность, отказоустойчивость. Одним из возможных способов такой организации вычислительных процессов является использование распределенных вычислений (РВ) в локальных вычислительных сетях (ЛВС).

В области РВ в ЛВС можно выделить ряд проблем, решения которых недостаточно проработаны. Например, для моделей РВ на основе централизованной архитектуры – это проблемы масштабируемости, зависимость функционирования от доступности и надежности сервера, большая нагрузка на сервер и повышенные требования к нему. Для систем РВ, использующих модель одноранговых вычислений, характерны зависимость быстродействия выполнения вычислений от количества и характеристик активных вычислительных узлов, вопросы безопасности передачи и обработки данных, проблемы обнаружения доступных вычислительных ресурсов и вопросы распределения нагрузок на сеть. Основными проблемами грид модели РВ являются поиск оптимальных узлов обработки и обеспечение отказоустойчивости вычислительных процессов. Облачные модели РВ находятся в состоянии поиска решения таких проблем, как обеспечение безопасности функционирования облачной платформы, проблемы доверия поставщику и сложность организации межоблачного взаимодействия. Моделям РВ, основанным на концепции «программного агента», характерны такие проблемы, как: поддержание безопасности взаимодействия между агентом и средой функционирования, высокие требования к способностям агента по коммуникации и обмену полезной информацией в мультиагентных системах; потребление ресурсов системы агентами, чьи цели не совместимы с общесистемными целями.

В результате проведения анализа существующих моделей, алгоритмов и программных средств (ПС) организации РВ в ЛВС в работе были выделены вышеуказанные проблемы организации РВ в ЛВС. На основе выделенных проблем сформулированы общие проблемы РВ в ЛВС – проблемы обеспечения безопасности, производительности, масштабируемости, прозрачности и отказоустойчивости. Разработаны модели и алгоритмы организации РВ в ЛВС, предлагающие решения вышеуказанных общих проблем. Разработанные модели и алгоритмы реализованы в ПС организации РВ в ЛВС. Учитывая сформированные общие проблемы РВ в ЛВС, сформулирована система критериев оценки эффективности ПС организации РВ в ЛВС. Сформулированная система критериев использована для анализа результатов экспериментов, проводимых с разработанным и исследованными ПС, с целью проверки улучшения значений

критериев оценки эффективности у разработанного ПС по сравнению с исследованными ПС организации РВ в ЛВС. Так как в результате проведения экспериментов достигнуто повышение значений критериев оценки эффективности у реализованного ПС, то сделан вывод о том, что разработанные модели и алгоритмы организации РВ в ЛВС предлагают более эффективные решения вышеуказанных общих проблем области РВ в ЛВС.

В качестве исходных данных для проведения исследования использовались научная литература по рассматриваемой теме (теория распределенных вычислений, теория информации, методы системного анализа), ПО для создания проектируемого ПС, а также ЛВС для проведения экспериментов с исследуемыми и разработанным ПС организации РВ в ЛВС.

Таким образом, тема работы обоснована и актуальна в научном (создание моделей и алгоритмов организации РВ в ЛВС, построение системы критериев оценки эффективности ПС организации РВ в ЛВС) и практическом плане (эксперименты, подтверждающие улучшение значений критериев оценки эффективности у ПС, разработанного на основе созданных моделей и алгоритмов по сравнению с исследованными ПС организации РВ в ЛВС).

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Цель и задачи исследования

*Целью* диссертационной работы является разработка моделей и алгоритмов организации распределенных вычислений (РВ) в локальных вычислительных сетях (ЛВС) и проведение практической проверки наличия преимуществ разработанных моделей и алгоритмов в рамках созданного на их основе программного средства (ПС) организации РВ в ЛВС над уже существующими моделями и алгоритмами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать существующие модели, алгоритмы и ПС для организации РВ в ЛВС с целью определения проблем организации РВ в ЛВС.

2. Разработать модели и алгоритмы организации РВ в ЛВС, предлагающие решения выявленных проблем.

3. Разработать ПС на основе созданных моделей и алгоритмов организации РВ в ЛВС.

4. Построить систему критериев оценки эффективности ПС организации РВ в ЛВС, опираясь на выявленные проблемы.

5. Провести экспериментальные исследования разработанного ПС с целью проверки улучшения значений критериев оценки эффективности у разработанного ПС по сравнению с исследованными ПС организации РВ в ЛВС.

*Объектом* исследования является область распределенных вычислений.

*Предметом* исследования является моделирование и алгоритмизация РВ в ЛВС.

Основной *гипотезой*, положенной в основу диссертационной работы, является улучшение значений критериев оценки эффективности у разработанного ПС по сравнению с исследованными ПС организации РВ в ЛВС. Разработанные модели и алгоритмы организации РВ в ЛВС предлагают более эффективные решения проблем организации РВ в ЛВС, чем уже существующие модели и алгоритмы.

### **Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики**

Работа выполнялась в соответствии с научно-техническими заданиями и планами работ кафедры «Программное обеспечение информационных технологий» по теме «Разработать модели, методы, алгоритмы для оценки параметров, повышения надежности и качества функционирования аппаратно-программных средств систем и сетей сложной конфигурации и внедрить в современные обучающие комплексы» (ГБ № 11-2004, № ГР 20111065, научный руководитель НИР – В. В. Бахтизин).

## **Личный вклад соискателя**

Результаты, приведенные в диссертации, получены соискателем лично. Вклад научного руководителя В.В. Бахтизина заключается в формулировке целей и задач исследования.

## **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 53-й студенческой научно-практической конференции «Современные технологии в науке, технике, образовании» (Минск, Беларусь, 2013); Международной заочной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: тенденции и перспективы» (Москва, Россия, 2014); VII Международной научно-методической конференции (Минск, Беларусь, 2014).

## **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы, из них 1 работа в рецензируемом издании, 1 работа в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) (по договору № 1398-11/2013К от 13.11.2013 г.), 1 работа в сборнике трудов и материалов студенческой научно-практической конференции.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из общей характеристики работы, введения, трех глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций соискателя и приложений. В первой главе представлен анализ предметной области, выявлены основные существующие проблемы в рамках тематики исследования, показаны направления их решения. Вторая глава посвящена разработке моделей (многослойная модель РВ в ЛВС, модель взаимодействия компонент РВС, модель развертывания РВС в ЛВС) и алгоритмов (алгоритм жизненного цикла грид-приложения, алгоритм разработки грид-приложения) организации РВ в ЛВС. В третьей главе построена система критериев оценки эффективности ПС организации РВ в ЛВС, разработано ПС на основе созданных моделей и алгоритмов организации РВ в ЛВС; проведены эксперименты по проверке улучшения значений критериев оценки эффективности у разработанного ПС по сравнению с исследованными ПС организации РВ в ЛВС.

Общий объем работы составляет 78 страниц, из которых основного текста – 51 страница, 18 рисунков на 16 страницах, 4 таблицы на 3 страницах, список использованных источников из 52 наименований на 4 страницах и 2 приложения на 4 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** определена область и указаны основные направления исследования, показана актуальность темы диссертационной работы, дана краткая характеристика исследуемых вопросов, обозначена практическая ценность работы.

В **первой главе** проведен анализ моделей и алгоритмов организации РВ. Сформулированы основные определения области РВ, в частности определения понятий «распределенные вычисления», «распределенная вычислительная система», «промежуточное программное обеспечение».

Выделены основные архитектуры организации РВ, лежащие в основе существующих моделей РВ – централизованная архитектура, децентрализованная и кластерная архитектуры.

Выполнен анализ основных моделей организации РВ: веб-модель, модель «клиент-сервер», объектно-ориентированная модель, агентно-ориентированная модель, сервис-ориентированная модель, модель одноранговых вычислений, модель грид, модель облачных вычислений. В ходе проведенного анализа выявлены основные достоинства и недостатки рассматриваемых моделей.

Проанализированы алгоритмы отслеживания причинно-следственного порядка событий распределенного вычисления на основе метода продвижения логического времени (алгоритм скалярного времени Лэмпорта и алгоритм матричного времени).

Проанализированы алгоритмы взаимного исключения процессов, выражающиеся в обеспечении эксклюзивного доступа к разделяемым ресурсам (алгоритм взаимного исключения процессов Лэмпорта, алгоритм взаимного исключения процессов Рикарта-Агравала).

Выполнен анализ двух ПС для организации РВ, а именно: HTCCondor и VOINC. Выбор данных средств обусловлен такими критериями, как возможность анализа моделей и алгоритмов за счёт открытого программного кода и возможность установки в ЛВС для экспериментов по сравнению характеристик с ПС, разрабатываемым в третьей главе.

HTCCondor это ПС пакетных (задания формируются в пакеты) распределенных вычислений с высокой пропускной способностью. Особенность ПС HTCCondor заключается в возможности производить вычисления в тех случаях, когда традиционные архитектуры ПС с пакетной обработкой характеризуются снижением производительности – высокопроизводительные вычисления и вычисления, приспособляющихся к окружению (ЕОС).

VOINC (англ. Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) – открытая программная платформа университета Беркли для организации добровольных распределенных вычислений. Особенность добровольных распределенных вычислений заключается в том, что для успешного решения отдельные небольшие подзадачи должны быть слабо связаны между собой и практически не зависеть от результатов параллельно выполняемых заданий.

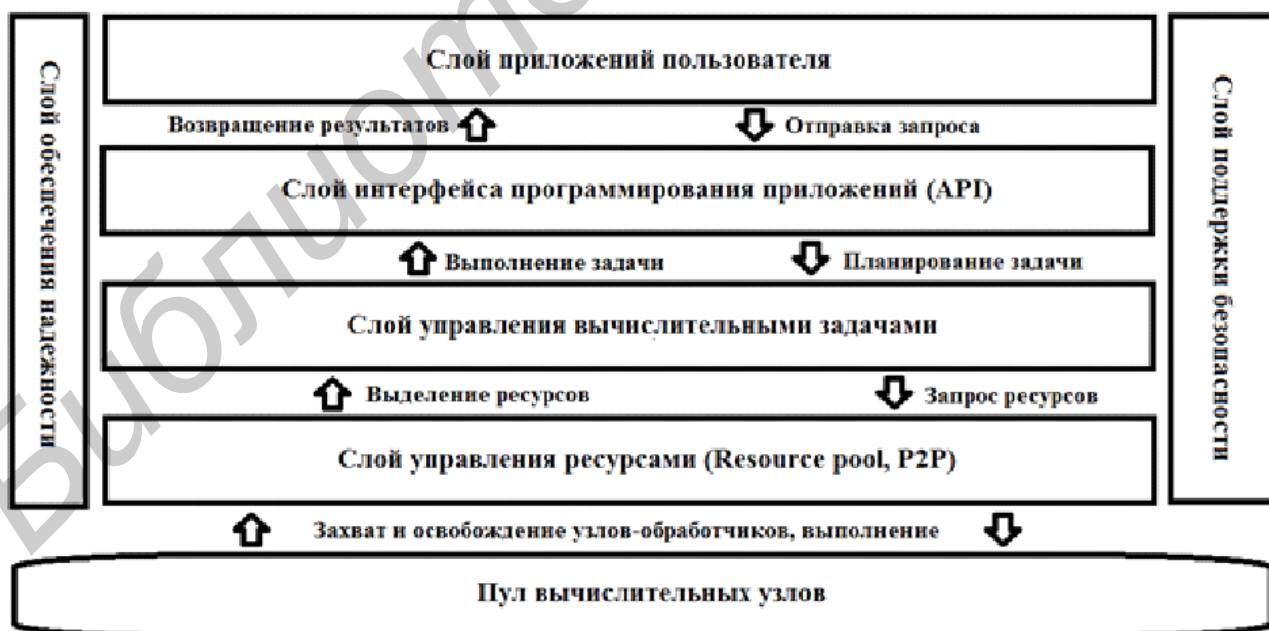
Результаты исследований, проведенных в рассматриваемых направлениях, отражены в работах Э. Таненбаума, Дж. Коулориса (G. Couloris), Н. Линч (N.

Lynch), Дж. Эндрюса (G. Andrews), Э. Кшемкальйани (A. Kshemkalyani), М. Сингхал (M. Singhal), Н. Дешпандаде (N. Deshpande), С. Камалапур (S. Kamalapur), Дж. Сакумера (G. Sukumar), В. Кристеа (V. Cristea), Д. Тейна (D. Thain), Д. Врайта (D. Wright), К. Миллера (K. Miller), М. Ливного (M. Livny), Л. Вакуэро (L. Vaquero), И. Фостера (I. Foster), К. Кессельмана (C. Kesselman), К. Шмидта (C. Schmidt), К. Реела (K. Rehr) и др.

**Вторая глава** посвящена разработке моделей и алгоритмов организации РВ в ЛВС.

Разработана многослойная модель организации РВ в ЛВС, описывающая распределение функциональных возможностей по слоям. Разработанная многослойная модель организации РВ в ЛВС состоит из четырех основных (слой приложений пользователя, слой интерфейса программирования приложений, слой управления вычислительными задачами и слой управления ресурсами) и двух дополнительных слоев (слой поддержки безопасности, слой обеспечения надежности) и представлена на рисунке 1.

Разработана модель взаимодействия компонент РВС, основанная на наборе следующих компонент – приложения пользователя, API объектно-ориентированного программного окружения грид, механизм грид-задач и менеджер задач, менеджер ресурсов и исполнители на конечных ВУ. Модель взаимодействия компонент РВС основана на парадигме параллельных вычислений «начальник-исполнитель» (англ. master-worker), в которой основной компонент распределяет независимые вычислительные блоки задач между конечными исполнителями и управляет ими.



**Рисунок 1 – Многослойная модель организации распределенных вычислений в локальных вычислительных сетях (P2P-L-DCG)**

Модель взаимодействия компонент РВС поддерживает два типа моделей приложений пользователя, а именно: модель грид-вычислителей и модель грид-

заданий. Обе модели поддерживают два вида параллелизма – как параллельное выполнение задач, так и параллельную обработку данных.

Модель грид-вычислителей предназначена для написания приложений пользователя с нуля. Модель грид-заданий предназначена для интеграции уже существующих приложений-обработчиков.

Разработана модель развертывания РВС в ЛВС, состоящая из трех компонент – узла менеджера, одного или нескольких узлов исполнителей и узлов пользователя. Данная модель описывает возможные механизмы развертывания P2P-L-DCG в ЛВС. Узлы исполнителей в данной модели характеризуется двумя основными достоинствами: гибким управление ресурсов, т.е. выбор централизованного управления с выделенными исполнителями или децентрализованного управления и невыделенных исполнителей; гибкое развертывание РВС с учетом ограничений вычислительной сети, например, исполнитель настраивается как невыделенный в том случае, если двухсторонняя связь невозможна (используется брандмауэр).

Предложен алгоритм жизненного цикла грид-приложения, определяющий последовательность операций, выполняемых распределенной вычислительной системой для организации распределенных вычислительных процессов.

Предложен алгоритм разработки грид-приложения, описывающий типовую последовательность действий разработчика распределенных приложений при реализации приложений распределенных вычислений для разработанной модели P2P-L-DCG.

В **третьей главе** построена система критериев оценки эффективности программных средств (ПС) организации распределенных вычислений, разработано ПС организации РВ в ЛВС, представлены результаты экспериментального исследования разработанного ПС.

На основе выявленных общих проблем РВ в ЛВС – проблем обеспечения производительности, масштабируемости, безопасности, отказоустойчивости и прозрачности – сформулирована система критериев оценки эффективности, состоящая из следующих критериев: производительность, масштабируемость, безопасность, отказоустойчивость и прозрачность.

Пиковая производительность ( $P_{peak}$ , TFLOPS) – теоретический предел производительности (выражаемый через операции с плавающей точкой) для ПС, находится с помощью формулы (1):

$$P_{peak} = \sum_{i=1}^P (F_i * P_i * I_{tick}) / C, \quad (1)$$

где  $F_i$  – тактовая частота процессора  $i$  ВУ, МГц.

$P_i$  – число процессоров в  $i$  ВУ.

$I_{tick}$  – количество инструкций с плавающей запятой на такт (4 – для процессоров Core2; 8 – для процессоров Intel с AVX).

$C$  – константа,  $C = 10^6$ .

$P$  – количество ВУ, используемых ПС.



Максимальная производительность – максимальная производительность ПС, достигаемая при решении практических задач.

**Критерий оценки производительности  $P$**  определяется как соотношение значений максимальной и пиковой производительностей по формуле (2):

$$P = P_{max} / P_{peak} * 100\%, \quad (2)$$

где  $P_{peak}$  – пиковая производительность, TFLOPS.

$P_{max}$  – максимальная производительность, TFLOPS.

Масштабируемость рассматривается как способность оцениваемого ПС выполнять работу, пропорциональную числу вычислительных узлов (ВУ), таким образом, критерий масштабируемости оценивается с помощью **критерия оценки параллельной эффективности**.

Ускорение (англ. «speedup»), получаемое при использовании распределенного алгоритма (РА) для  $P$  ВУ, по сравнению с последовательным вариантом выполнения вычислений, определяется величиной  $K$  по формуле (3):

$$K = T_s / T_p, \quad (3)$$

где  $T_s$  – время, затраченное на решение задачи последовательным алгоритмом на одном ВУ.

$T_p$  – время, затраченное на решение той же задачи при использовании РА, выполняющегося на  $P$  ВУ.

$P$  – количество ВУ, используемых ПС.

**Критерий оценки параллельной эффективности  $E$**  определяется как отношение ускорения к количеству используемых ПС вычислительных узлов по формуле (4):

$$E = K / P * 100\%, \quad (4)$$

где  $K$  – ускорение, получаемое при использовании распределенного алгоритма (РА).

$P$  – количество ВУ, используемых ПС.

В качестве основы для разработки критерия оценки безопасности ПС организации РВ в ЛВС выбран стандарт Department of Defense Trusted Computer System Evaluation Criteria, TCSEC, DoD 5200.28-STD.

**Критерий оценки безопасности  $S$**  определяется как принадлежность ПС организации РВ в ЛВС к определённому классу вышеуказанного стандарта в соответствии с формулой (5):

$$S = S_{class}, \quad (5)$$

где  $S_{class}$  – класс безопасности по стандарту Department of Defense Trusted Computer System Evaluation Criteria, TCSEC, DoD 5200.28-STD [48].

Критерий оценки отказоустойчивости  $R$  определяется как соотношение промежутка времени, в течение которого ПС организации РВ в ЛВС находилось в состоянии работы (с учетом планового тех. обслуживания) к общему промежутку времени, в течение которого производилось измерение по формуле (6):

$$R = T_{ff} / T_{total} * 100\%, \quad (6)$$

где  $T_{ff}$  – промежуток времени, в течение которого ПС находилось в состоянии работы.

$T_{total}$  – общий промежуток времени, в течение которого производилось измерение.

Стандарты эталонной модели для распределенной обработки в открытых системах Reference Model for Open Distributed Processing (RM-ODP) определяют несколько типов прозрачности. Для определения критерия оценки прозрачности ПС выбраны семь наиболее важных типов прозрачности: прозрачность доступа, прозрачность местоположения, прозрачность перемещения, прозрачность смены местоположения, прозрачность репликации, прозрачность одновременного доступа, прозрачность отказов.

**Критерий оценки прозрачности  $O$**  определяется как соотношение количества поддерживаемых ПС организации РВ в ЛВС типов прозрачности к общему количеству наиболее важных типов прозрачности по формуле (7):

$$O = O_{supp} / O_{total} * 100\%, \quad (7)$$

где  $O_{supp}$  – количество поддерживаемых ПС типов прозрачности.

$O_{total}$  – общее количество наиболее важных типов прозрачности,  $O_{total} = 7$ .

На основании разработанных во второй главе диссертации моделей и алгоритмов было реализовано программное средство CDLNC (Combined Distributed Local Network Computations), позволяющее организовывать распределенные вычисления в локальных вычислительных сетях.

Проведены эксперименты по исследованию разработанного ПС организации РВ в ЛВС. Эксперименты проводились для сравнения характеристик разработанного ПС и ПС VOINC и HTCCondor.

Для расчета критериев оценки эффективности ПС использовалась построенная во второй главе система критериев оценки эффективности ПС организа-

ции РВ в ЛВС. Расчеты проводились по полученным в результате построения данной системы формулам (1-7).

*Безопасность.* Разработанное ПС CDLNC лучше по значению критерия оценки безопасности ( $C2 > C1$ ) по сравнению с исследованными ПС VOINC и HTCondor.

*Прозрачность.* Разработанное ПС CDLNC лучше по значению критерия оценки прозрачности по сравнению с исследованным ПС VOINC на 14,3% и совпадает по значению того же критерия с ПС HTCondor (85,7%).

Эксперимент по поиску множителей больших чисел показал, что разработанное ПС в данном эксперименте эффективнее по критерию *производительности* на 7,5% и 5,4%, на 6,1% и 4,3% лучше *масштабируется*, обладает на 1,1% и 0,9% более высокой *отказоустойчивостью*, чем ПС VOINC и ПС HTCondor.

Диаграммы, отражающие значения критериев оценки эффективности ПС, участвующих в эксперименте по поиску множителей больших чисел, приведены на рисунках 2-4.

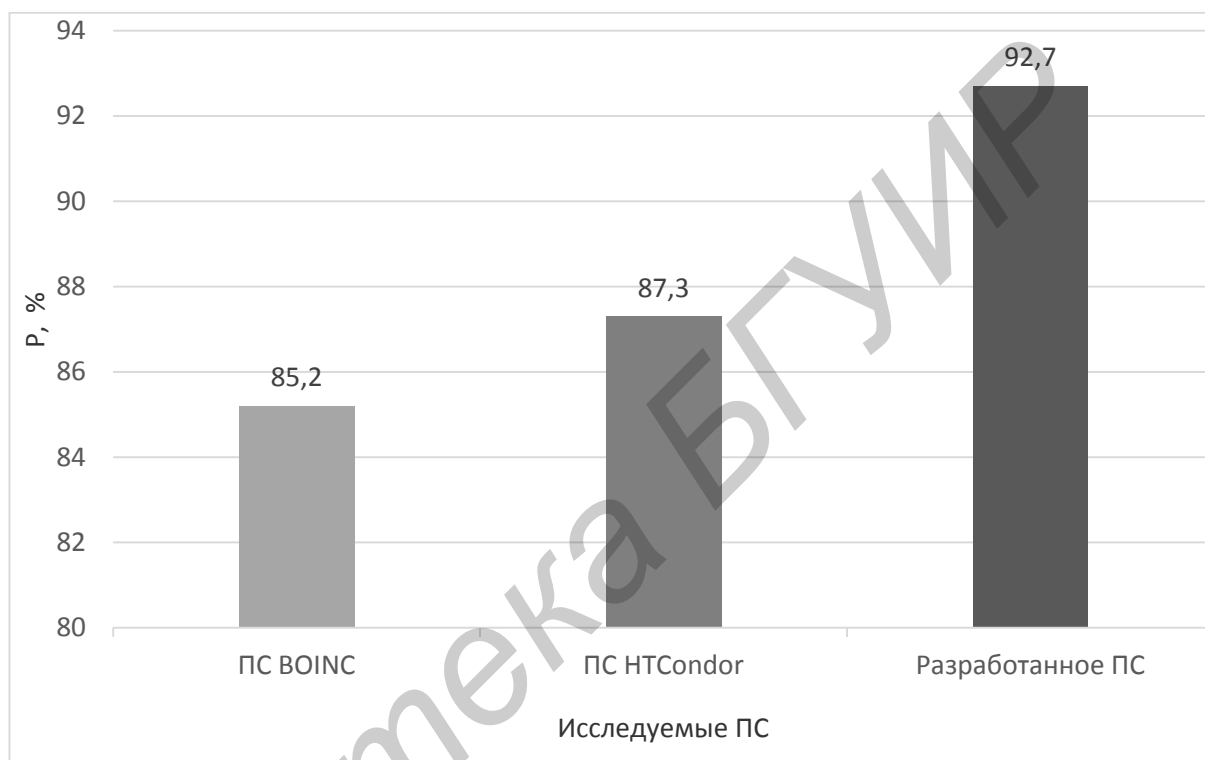
Эксперимент по решению задачи по подбору пароля посредством проверки совпадения известной MD5 хеш-суммы пароля с рассчитанной MD5 хеш-суммой показал, что разработанное ПС в данном эксперименте эффективнее по критерию *производительности* на 6,5% и 4,9%, на 4,7% и 2,8% лучше *масштабируется*, обладает на 1,2% и 0,7% более высокой *отказоустойчивостью*, чем ПС VOINC и ПС HTCondor.

Значения критериев оценки эффективности ПС, участвующих в эксперименте по поиску множителей больших чисел, приведены в таблице 1.

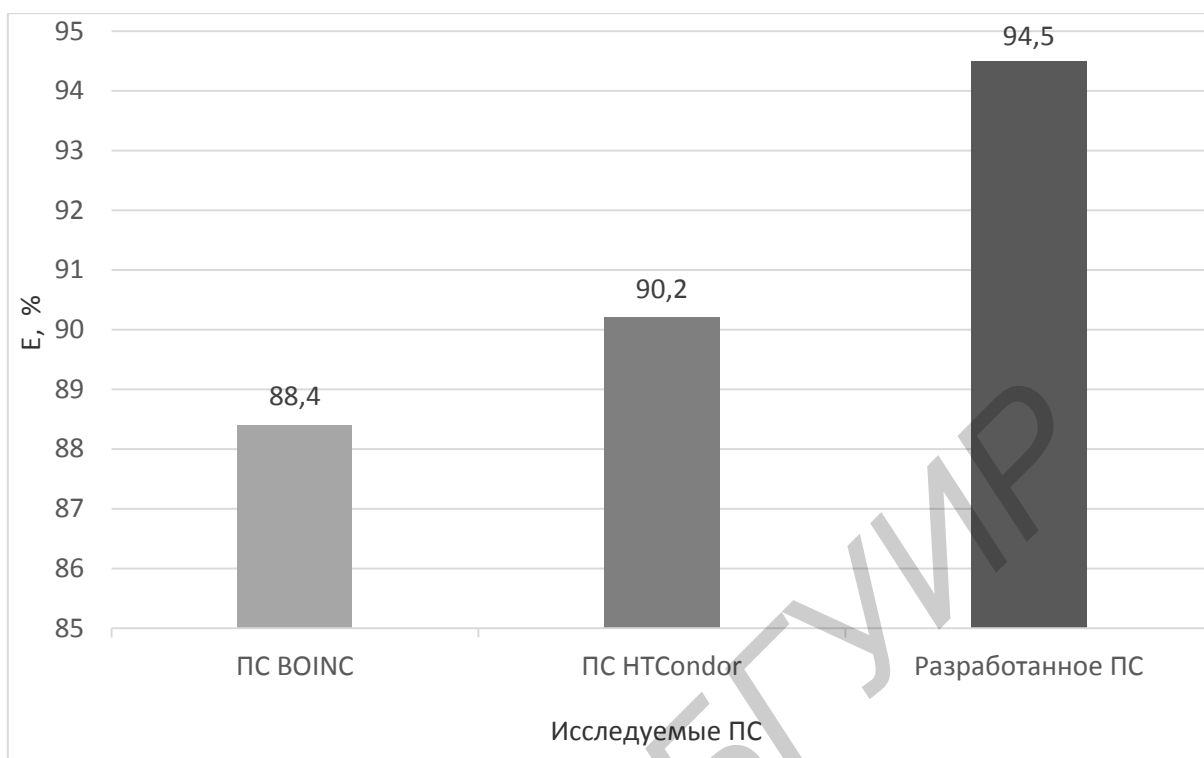
Таблица 1 – Значения критериев оценки эффективности ПС, участвующих в эксперименте по решению задачи по подбору пароля посредством проверки совпадения известной MD5 хеш-суммы пароля с рассчитанной MD5 хеш-суммой

Критерий оценки эффективности	Значение критерия оценки эффективности для ПС VOINC (%)	Значение критерия оценки эффективности для ПС HTCondor (%)	Значение критерия оценки эффективности для разработанного ПС (%)
Производительность	88,9%	90,5%	95,4%
Масштабируемость	89,2%	91,1%	93,9%
Отказоустойчивость	98,4%	98,9%	99,6%

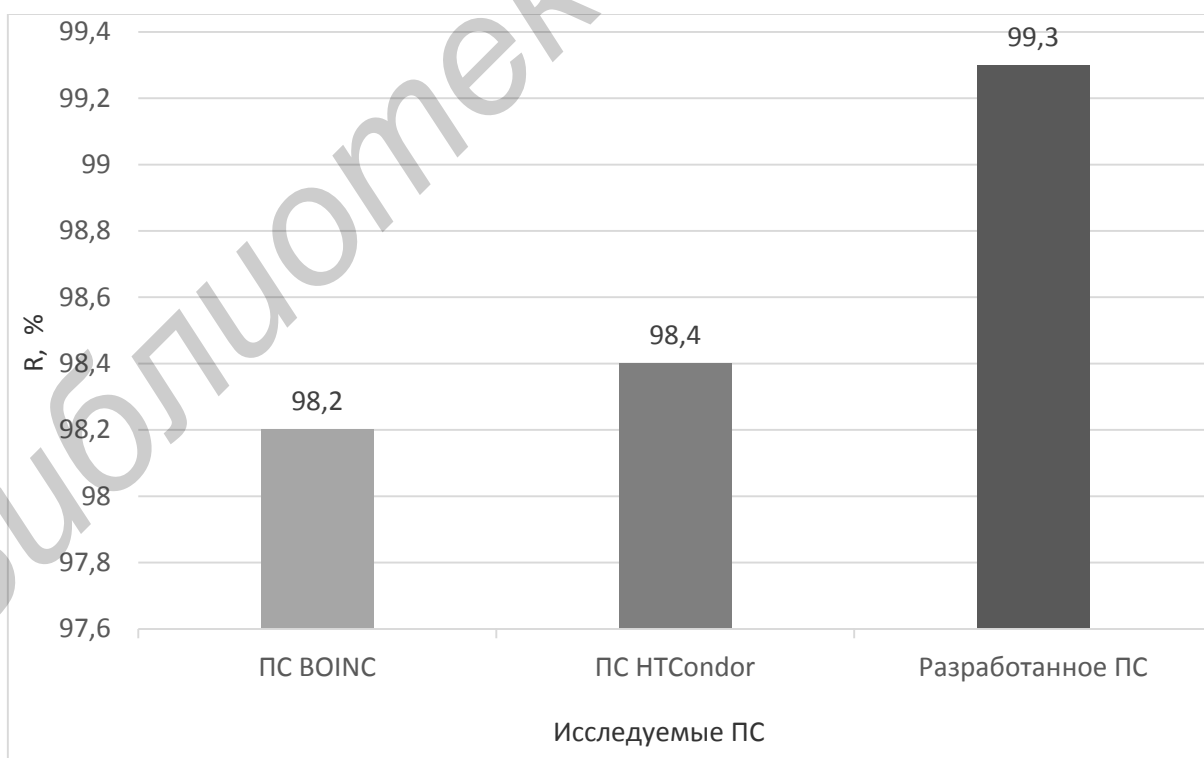
Таким образом, разработанные модели (многослойная модель организации РВ, модель взаимодействия компонент РВС в ЛВС, модель развертывания РВС в ЛВС) и алгоритмы (алгоритм жизненного цикла грид-приложения, алгоритм разработки грид-приложения) могут применяться для практической реализации ПС организации РВ в ЛВС, обладающих более высокими значениями критериев производительности, масштабируемости, безопасности, отказоустойчивости и прозрачности по сравнению с существующими ПС организации РВ в ЛВС.



**Рисунок 2 – Диаграмма значений критерия оценки производительности (P) ПС, участвующих в эксперименте по поиску множителей больших чисел**



**Рисунок 3 – Диаграмма значений критерия оценки масштабируемости (E) ПС, участвующих в эксперименте по поиску множителей больших чисел**



**Рисунок 4 – Диаграмма значений критерия оценки отказоустойчивости (R) ПС, участвующих в эксперименте по поиску множителей больших чисел**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Проведен анализ основных моделей организации РВ [1, 2, 4, 5, 8, 10-20, 31-42, 45-48]: веб-модель, модель «клиент-сервер», объектно-ориентированная модель, агентно-ориентированная модель, сервис-ориентированная модель, модель одноранговых вычислений, модель грид, модель облачных вычислений. Показано, что веб-модель непригодна для использования в условиях, когда требуется независимость от наличия постоянного соединения с Интернетом и независимость от решений сторонних производителей (хостинг, предоставление вычислительных мощностей). Модель «клиент-сервер» обладает недостатками: сложность обеспечения масштабируемости, зависимость производительности выполнения РВ от доступности и надежности сервера и повышенные требования к нему. Объектно-ориентированная модель характеризуется такими недостатками, как снижение производительности из-за использования промежуточных объектов-посредников (англ. proxy) и сериализации, десериализации параметров методов; необходимость в механизмах регистрации источников удаленных объектов на промежуточных серверах или на клиентах. Для агентно-ориентированной модели определены недостатки: сложность обеспечения безопасного взаимодействия между агентом(-ами) и средой функционирования, необходимость поддержки агентом протоколов коммуникации и обмена полезной информацией в мультиагентных системах и потребление ресурсов системы агентами, чьи цели противоречат общесистемным целям. Сервис-ориентированная модель непригодна, если требуется высокая начальная скорость и невысокая конечная стоимость разработки РВС на основе данной модели. В модели одноранговых вычислений выделены недостатки: невозможность обеспечения гарантированного качества обслуживания за счёт непредсказуемости доступности ВУ, возможное снижение пропускной способности передачи данных при работе ВУ через брандмауэр, высокая сложность администрирования и обеспечения безопасной передачи данных в рамках P2P сети. Для модели грид обнаружены недостатки: необходимость поиска оптимальных узлов обработки для увеличения общей производительности, высокая сложность реализации механизмов обеспечения отказоустойчивости. В модели облачных вычислений недостатками являются высокая сложность обеспечения безопасности конфиденциальных данных и организации межоблачного взаимодействия, необходимость в доверии поставщику облачных решений, снижение показателей надежности и доступности услуг.

2. Проанализированы алгоритмы: организации единого времени (алгоритм скалярного времени Лэмпорта, алгоритм матричного времени), взаимного исключения процессов (алгоритм Лэмпорта, алгоритм Рикарта-Агравала). Установлен недостаток алгоритма скалярного времени Лэмпорта – отсутствие строгой непротиворечивости. Недостаток алгоритма матричного времени – необходимость пересылки значительного объема данных с каждым сообщением при большом числе процессов, участвующих в распределенном вычислении. Выяв-

лены особенности алгоритмов взаимного исключения процессов: алгоритм Л. Лэмпорта является распределенным, алгоритм Рикарта-Агравала неявно упорядочивает процессы, желающие эксклюзивно захватить ресурс, в ациклическую цепь.

3. Проведен анализ двух образцов открытых программных средств для организации РВ в ЛВС – VOINC и HTCondor. В ПС VOINC выявлены следующие недостатки: возможность отправки на ВУ приложений, содержащих вредоносный код; возможность использования вычислительных ресурсов не в тех целях, что указаны в выбранном клиентом проекте; риск нарушения конфиденциальности информации при взломе серверов проектов. В ПС HTCondor обнаружены открытые проблемы: высокая сложность обеспечения безопасности, освоения и настройки; отсутствие приложений, выходящих за рамки научно-исследовательской деятельности.

4. В результате проведения анализа существующих моделей, алгоритмов и программных средств (ПС) организации РВ в ЛВС выявлены общие проблемы РВ в ЛВС – проблемы обеспечения производительности, масштабируемости, безопасности, отказоустойчивости и прозрачности.

5. Разработана многослойная модель организации РВ в ЛВС, описывающая распределение функциональных возможностей по слоям. Разработанная модель организации РВ в ЛВС состоит из четырех основных слоев: слой приложений пользователя, слой интерфейса программирования приложений, слой управления вычислительными задачами, слой управления ресурсами, и двух дополнительных слоев: слой поддержки безопасности, слой обеспечения надежности.

6. Разработана модель взаимодействия компонент РВС, основанная на наборе следующих компонент – приложения пользователя, API объектно-ориентированного программного окружения грид, механизм грид-задач и менеджер задач, менеджер ресурсов и исполнители на конечных ВУ.

7. Разработана модель развертывания РВС в ЛВС, состоящая из трех компонентов – узла менеджера, одного или нескольких узлов исполнителей и узлов пользователей. Данная модель описывает возможные механизмы развертывания РВС, основанной на многослойной модели и модели взаимодействия компонент РВС в ЛВС.

8. Предложен алгоритм жизненного цикла грид-приложения, определяющий последовательность операций, выполняемых для поиска решения прикладных задач пользователя. Анализ эффективности алгоритма жизненного цикла грид-приложения выполнен при экспериментальных исследованиях разработанного ПС организации РВ в ЛВС, проведенных в ЛВС предприятия.

9. Предложен алгоритм разработки грид-приложения, описывающий типовую последовательность действий разработчика распределенных приложений при реализации приложений распределенных вычислений для ПС, разрабатываемого на основе вышеуказанных моделей. Анализ эффективности алгоритма разработки грид-приложения выполнен при экспериментальных исследованиях реализованных на его основе приложений для разработанного ПС организации РВ в ЛВС.

10. Построена система критериев оценки эффективности ПС организации РВ в ЛВС, содержащая следующие критерии: производительность, масштабируемость, безопасность, отказоустойчивость и прозрачность.

11. На основе разработанных моделей и алгоритмов создано программное средство, позволяющее организовать РВ в ЛВС. Реализованное ПС получило название «CDLNC» (Combined Distributed Local Network Computations).

12. Проведено практическое исследование разработанного ПС CDLNC на основе набора экспериментов для оценки характеристик разработанного ПС в ЛВС по сравнению с ПС VOINC и HTCondor. Эксперимент по поиску множителей больших чисел показал, что разработанное ПС в данном эксперименте эффективнее по критерию производительности на 7,5% и 5,4%, на 6,1% и 4,3% лучше масштабируется, обладает на 1,1% и 0,9% более высокой отказоустойчивостью, чем ПС VOINC и ПС HTCondor. Эксперимент по решению задачи по подбору пароля посредством проверки совпадения известной MD5 хеш-суммы пароля с рассчитанной MD5 хеш-суммой показал, что разработанное ПС в данном эксперименте эффективнее по критерию производительности на 6,5% и 4,9%, на 4,7% и 2,8% лучше масштабируется, обладает на 1,2% и 0,7% более высокой отказоустойчивостью, чем ПС VOINC и ПС HTCondor. Кроме того, разработанное ПС CDLNC обладает более высоким значением критерия оценки безопасности ( $C2 > C1$ ), по сравнению с исследованными ПС VOINC и HTCondor и эффективнее по критерию прозрачности на 14,3%, чем ПС VOINC.

13. Разработанные модели (многослойная модель организации РВ, модель взаимодействия компонент РВС в ЛВС, модель развертывания РВС в ЛВС) и алгоритмы (алгоритм жизненного цикла грид-приложения, алгоритм разработки грид-приложения) могут применяться для практической реализации ПС организации РВ в ЛВС, обладающих более высокими значениями критериев производительности, масштабируемости, безопасности, отказоустойчивости и прозрачности по сравнению с существующими ПС организации РВ в ЛВС. Экспериментально подтверждена гипотеза исследований о том, что будет наблюдаться улучшение значений критериев оценки эффективности у разработанного ПС по сравнению с исследованными ПС организации РВ в ЛВС; разработанные модели и алгоритмы организации РВ в ЛВС предлагают более эффективные решения проблем организации РВ в ЛВС, чем уже существующие модели и алгоритмы.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Полученные результаты формируют теоретическую и практическую базу для разработки ПС организации РВ в ЛВС. В дополнение к этому, разработанные модели и алгоритмы организации РВ в ЛВС могут быть использованы для модернизации и дальнейшего развития существующих ПС.

2. Разработанные модели и алгоритмы организации РВ в ЛВС могут применяться для создания ПС организации РВ в ЛВС, обладающих такими характеристиками, как высокая производительность и масштабируемость, безопасность и отказоустойчивость; для использования ПС совместно с уже реализо-



ванными приложениями с целью поддержки распределенных вычислений, что экономит затраты на переписывание существующих приложений; для организации гибкого процесса развертывания ПС, что позволяет управлять конечной конфигурацией ПС и выполнять настройку ПС под нужды конкретных пользователей.

3. Результаты работы представляют собой экономическую ценность – разработанное ПС может быть использовано для организации РВ в ЛВС для малого и среднего бизнеса.

4. Результаты работы могут использоваться при подготовке персонала для разработки и обслуживания ПС организации РВ в ЛВС, решающего задачи проектирования, модернизации и управления данными ПС.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

1. Царевич, Д.Ю. Алгоритмы и модели организации распределенных вычислений в локальных вычислительных сетях / Д.Ю. Царевич, В.В. Бахтизин // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы: Сб. науч. трудов. – М.: «АР-Консалт», 2014. – Ч. 3. – с. 106-108.

2. Царевич, Д.Ю. Организация распределенных вычислений в образовании / Д.Ю. Царевич, В.В. Бахтизин // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития: Тезисы доклада к международной научно-методической конференции – Мн.: БГУИР, 2014. – с. 233-234.

3. Царевич, Д.Ю. Распределенные вычислительные сети для обработки задач пользователя на примере платформы VOINC / Д.Ю. Царевич, Ю.А. Скудняков // Современные технологии в науке, технике, образовании: Сб. мат. 53-й студен. НПК. – Мн.: МГВРК, 2013. – с. 88-89.