

А. Е. Андреев, Д.Н. Жариков, В.И. Конченков, А.А. Новокщенов,  
А.А. Насонов, В.А. Егунов, Е.С. Харьков, А.И. Бочкарев,  
П.Д. Кравченя, Р.И. Гущин

## **О применении гибридных вычислительных систем на базе Intel® Xeon Phi™ в техническом университете**

АННОТАЦИЯ. В данной работе описан опыт использования гибридных вычислительных систем с ускорителями Intel Xeon Phi архитектуры MIC в Волгоградском государственном техническом университете. Рассматривается построение небольшого, но мощного вычислительного кластера из гибридных узлов, а также их применение при решении задач из разных прикладных областей: векторизация блочных операций линейной алгебры, решение задач физики твердого тела методами Монте-Карло, обработка массивов текстов.

*Ключевые слова и фразы:* Xeon Phi, MIC, SIMD, вычислительный кластер, векторизация блочных операций линейной алгебры, моделирование методами Монте-Карло, обработка массивов текстов.

### **Введение**

Гибридные вычислительные системы, под которыми в данной работе подразумеваются системы, оснащенные как многоядерными центральными процессорами, так и ускорителями (сопроцессорами), давно привлекают внимание потребителей вычислительных ресурсов как основа для построения высокопроизводительных вычислительных комплексов с более высокой производительностью на единицу потребляемой энергии и более низкой стоимостью каждого мега- или терафлопса. Относительно недавно к популярным графическим ускорителям (GPU) в качестве средства для создания гибридных вычислителей присоединились сопроцессоры Intel Xeon Phi с архитектурой Many Integrated Cores (MIC).

В Волгоградском государственном техническом университете (далее ВолгГТУ) первое знакомство с Xeon Phi состоялось во второй половине 2013 года, когда были приобретены первые 3 ускорителя серии 51xx. Нужно отметить, что приобретались они для вполне конкретной задачи – создания векторизованных версий алгоритмов выполнения ряда блочных операций линейной алгебры по заказу компании ТЕСИС (г. Москва), которые в итоге позволили ускорить обработку векторов на Phi до 3 раз. В учебном процессе направления «Информатика и вычислительная техника» данные устройства были задействованы сразу с момента приобретения и, конечно, не только как векторные сопроцессоры. В итоге в ряде выпускных работ были продемонстрированы неплохие возможности ускорителей, в том числе при шифровании данных, а также в задачах математической физики (например, в [1]).

Первые полученные положительные результаты, а также очень доступные по сравнению с GPU цены на ускорители Xeon Phi в конце 2014 года определили их выбор в качестве основных ускорителей для небольшого вычислительного кластера, собранного в начале 2015 года в ВолгГТУ.

В данной работе рассматриваются характеристики вычислительного кластера, построенного в ВолгГТУ на базе серверных платформ Intel Xeon E5 и ускорителей Intel Xeon Phi, а также некоторые результаты использования названных ускорителей при решении ряда вычислительных задач за последние 2 года.

## 1. Вычислительный кластер ВолгГТУ

Вычислительный кластер в ВолгГТУ создавался на факультете Электроники и вычислительной техники с 2008 года [2, 3]. Особенностью его создания являлось то, что он не приобретался и не создавался в рамках одного проекта, как это обычно бывает, а развивался постепенно, в результате объединения в один комплекс все новых систем, приобретаемых по разным поводам, для разных целей и в связи с различными проектами. В итоге к 2014 году кла-

стер представлял собой скорее собрание разнородных узлов, объединенных единой сетью. Несмотря на возможность его эксплуатации как единого ресурса, сложности такой эксплуатации перекрывали эффект от достигаемой максимальной производительности, поэтому фактически кластер эксплуатировался как совокупность отдельных узлов, либо групп узлов, где каждая группа была представлена более-менее однородными вычислителями. Тем не менее, к 2014 году в университете уже сложилось представление о вычислительном кластере как о достаточно полезном инструменте. Он использовался в учебном процессе в рамках подготовки бакалавров и магистрантов по направлению «Информатика и вычислительная техника», при выполнении хоздоговорных НИР по заказу компаний Топ Системы, ТЕСИС (г. Москва), ОАО «Камаз», ряда других компаний, в рамках проекта Минобрнауки по созданию кластерной версии системы инженерного анализа ФРУНД [4]. Особенно популярны вычисления на кластере стали среди исследователей-физиков, выполнявших моделирование как с помощью программ собственной разработки, так и с помощью условно-бесплатных (например, SIESTA) и коммерческих пакетов (например, Mathematica).

Когда осенью 2014 года появилась возможность приобретения дополнительного оборудования, идея об обновлении кластера была поддержана руководством вуза. В то же время средства на приобретение вычислителей были выделены достаточно скромные, кроме того, нужно было учесть такие немаловажные факторы, как возможность электропитания и охлаждения кластера в конкретных достаточно ограниченных условиях.

Проанализировав имеющиеся на рынке решения, ценовые предложения, учитывая накопленный опыт эксплуатации различных серверных платформ и ускорителей (CPU Intel/AMD, GPU NVidia, Intel Xeon Phi (MIC)), мы остановились на базовой конфигурации одного вычислительного узла на базе 2 x Intel Xeon E5 v3 и 2 Xeon Phi 31s1p с 64 Гб ОЗУ и SSD накопителями. В качестве интерконнекта была выбрана сеть Infiniband стандарта FDR (до 56 Гбит/с). В результате было приобретено 11 узлов с указанной вы-

ше конфигурацией, к которым мы добавили 2 имевшихся узла с 2 CPU Xeon E5 и 3 Xeon Phi 5110. Итоговая конфигурация кластера представлена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Конфигурация кластера

№	Наименование	11 узлов	2 узла
1	Процессор	Intel Xeon Processor E5-2650v3 (2,3 GHz, 10 ядер) x2	Intel Xeon Processor E5-2660 (2,2 GHz, 8 ядер) x2
2	Память	64Gb DDR4	128Gb DDR3
3	Жесткий диск	SSD Intel 240Gb	SATA 2 Тб
4	Сопроцессор	Intel Xeon Phi Coprocessor 31s1p x2	Intel Xeon Phi Coprocessor 31s1p x2 / 5110p x 2

Проведенное тестирование кластера на тесте Linpack от компании Intel (HPL, использующий режим offload Xeon Phi) позволило получить на данной конфигурации производительность 23,12 TFlops при пиковой производительности, оцениваемой в 33,8 TFlops. Это обеспечило попадание кластера в 22 редакцию рейтинга Top 50 от 31.03.2015 на 49 место [5]. На тот момент это был один из двух кластеров в списке с наименьшим количеством узлов (меньше было только у кластера на базе новых GPU NVidia). Производительность на узел (с учетом того, что в тесте участвовало только 12 узлов, 1 играл роль управляющего узла) практически достигла 2 TFlops. Производительность на Linpack составила 68% от пиковой.

После запуска кластера в эксплуатацию на нем был установлен ряд прикладных расчетных пакетов, включая CAE системы FlowVision, ANSYS, NASTRAN, Mark, ADAMS, ФРУНД, система Mathematica.

## 2. Результаты применения Xeon Phi

Ниже рассмотрены результаты применения ускорителя Xeon Phi при решении ряда прикладных задач: векторизация блочных операций линейной алгебры, решение задач физики твердого тела методами Монте-Карло, обработка массивов текстов. Следует отметить, что в основном перечисленные задачи начали решаться еще до внедрения кластера ВолгГТУ в его современном состоянии, их решение было продолжено и в этом году уже на новом вычислительном комплексе.

### 2.1 Векторизация блочных операций линейной алгебры

Эта задача решалась в 2013-2015 годах в рамках трех проектов по заказу инжиниринговой компании ТЕСИС (г. Москва) – производителя известного САЕ пакета вычислительной гидродинамики FlowVision. В рамках данных проектов разработана номенклатура алгоритмов, реализующих базовые операции АХРУ и ДОТ, а также операции обращения и разложения для матриц небольших размерностей от  $2 \times 2$  до  $16 \times 16$  для типов данных float и double с использованием систем векторных команд SSE, AVX, AVX2, Xeon Phi (MIC) и AVX512.

В целом максимальное ускорение, достигнутое за счет векторизации для созданного набора алгоритмов, - до 11 раз при обработке данных типа float с помощью инструкций AVX2. Если остановиться на результатах для Xeon Phi, достигнуто ускорение вычислений за счет использования 512-битных регистров MIC до 4 раз для матриц  $16 \times 16$  с элементами типа float (задача разложения матрицы).

Более подробно о разработанных алгоритмах и результатах их тестирования можно прочитать, в частности, в [6].

## 2.2 Решение задач физики твердого тела методами Монте-Карло

Исследование кинетических свойств низкоразмерных материалов является важнейшей областью исследования современной физики твердого тела, так как позволяет предсказывать новые эффекты и определять перспективы применения материала в электронных устройствах. Для исследования данных явлений в твердых телах используется имитационное моделирование методом Монте-Карло. Решение задачи данным методом имеет ряд преимуществ. Во-первых, это возможность решать задачи, которые не поддаются анализу на основе решения кинетического уравнения. Во-вторых, вычисления методом Монте-Карло хорошо подходят для распараллеливания на МПС-системах.

В результате ряда работ реализовано имитационное моделирование методом Монте-Карло, состоящее в усреднении скорости частиц по большому промежутку времени и по ансамблю частиц при решении задач физической кинетики в двумерных материалах.

При выполнении моделирования на ускорителе Xeon Phi достигнута производительность, практически равная производительности центрального процессора Xeon E5. На двух ускорителях производительность повышается в 1,8 раза. При совместном использовании CPU и МПС примененная балансировка нагрузки позволяет ускорить вычисления в 3 раза по сравнению с одним CPU. Поскольку сам метод достаточно хорошо распараллеливается, можно ожидать прироста производительности при использовании всех узлов кластера. В частности, на данный момент достигнуто ускорение моделирования в 8 раз на 3 гибридных узлах по отношению к одному CPU. Ускорение вычислений в данном случае крайне необходимо, так как расчеты порой ведутся в течении суток и более.

## 2.3 Обработка массивов текстов

Ускорение обработки массивов текстовых документов является достаточно актуальной задачей, в частности, для нашего универси-

тета. Так, в течение последних двух лет на факультете ЭВТ ВолгГТУ реализуется ряд проектов в области семантического анализа текстов, в частности, текстов патентов и текстов описания физических эффектов (выполнен проект по заказу Роспатента, выполняются два гранта РФФИ [7, 8]). Пока для ускорения обработки текстов применялась технология Map-Reduce, реализованная в ряде фреймворков для облачных вычислений. В то же время в отсутствие мощной доступной облачной инфраструктуры в качестве возможного варианта можно рассмотреть использование массива ускорителей имеющегося кластера. В качестве пилотной работы в этой области был разработан прототип сервиса для определения степени схожести текстов на базе известного алгоритма шинглов, использующий ускорители Xeon Phi на одном вычислительном узле. При решении сервисом задачи поиска шинглов в имеющейся базе шинглов документов возникает возможность ускорить сравнение до 16 раз за счет обработки 16-элементных векторов, содержащих сравниваемые 32-битные значения хешей, в 512-битных регистрах MIC. Сравнение на Xeon Phi выполняется примерно вдвое быстрее, чем на двух CPU Xeon E5 (если поиск ведется по 200 и более файлам с количеством хешей = 10 000 в каждом), а на 6 ускорителях (одна такая платформа имеется в составе кластера) можно достичь ускорения в 12 раз [9].

#### **2.4 Оценка роста производительности при использовании кластера на Xeon Phi**

В ходе тестирования и запуска кластера в эксплуатацию выполнена также оценка прироста производительности при решении на нем ряда задач, нужных нашим потребителям вычислительных мощностей. Оценка сведена в таблицу 2.

Таблица 2. Оценки роста производительности при решении ряда задач на кластере

Задача / пакет	Оценка роста производительности на одном узле по сравнению с предыдущим комплексом
Моделирование на SIESTA (MKL, MIC)	2.5 раза
Сравнение текста со списком текстов (MIC)	до 12 раз
Новый решатель для CFD (FlowVision) – CPU, AVX2	до 2 раз
Новый решатель для пакета FRUND (CPU)	до 4 раз
Моделирование на ANSYS (MKL)	до 2 раз
Средняя OpenMP / MPI программа (AVX2)	2.5 раза
Пакет молекулярной динамики CP2K	1,7 – 3 раза
Программа моделирования методом Монте-Карло с использованием CPU / MIC	до 5 - 8 раз

## Заключение

В работе рассмотрен построенный в 2015 году в Волгоградском государственном техническом университете кластер на гибридных узлах на базе платформ Xeon E5 + Xeon Phi, приведена оценка роста производительности при использовании данного кластера на ряде задач, рассмотрены некоторые задачи, решенные с помощью разработанного программного обеспечения для платформы MIC. В среднем рост производительности, достигнутый для платформы Xeon Phi на указанных задачах относительно CPU Xeon приближается к показателю, демонстрируемому на тесте Linpack (от 1,5 до 2 раз), а рост производительности за счет построения векторизованных алгоритмов на Phi относительно скалярных – от 16 для целых до 4 для float элементов.

*Благодарности.* Авторы выражают искреннюю благодарность декану факультета Электроники и вычислительной тех-



ники ВолгГТУ Горобцову Александру Сергеевичу и заведующему кафедрой Физики ВолгГТУ Завьялову Дмитрию Викторовичу за помощь и поддержку в создании кластера, руководящие и направляющие усилия, а также личное действенное участие в создании программного обеспечения и решении с его помощью актуальных научно-технических задач.

## Список литературы

- [1] Андреев, А.Е. Реализация динамической балансировки нагрузки между ЦПУ и сопроцессорами архитектуры Intel MIC в пакете молекулярного моделирования CP2K / А.Е. Андреев, Д.В. Куц, А.А. Насонов // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 21 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 12 (139). - С. 11-16.
- [2] Построение высокопроизводительной вычислительной кластерной системы на базе имеющегося парка компьютерной техники под управлением операционной системы GNU/Linux / А.Е. Андреев, Д.С. Попов, Д.Н. Жариков, Е.С. Сергеев // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в техн. системах". Вып. 6: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2009. - № 6. - С. 48-51.
- [3] Андреев, А.Е. Факультетский кластер ФЭВТ ВолгГТУ и участие ВолгГТУ в программе "Университетский кластер" [Электронный ресурс] / А.Е. Андреев, Д.Н. Жариков, О.В. Шаповалов // Облачные вычисления. Образование. Исследования. Разработки : тез. докл. конф. (Москва, 15-16 апр. 2010 г.) : в рамках программы "Университетский кластер" / Ин-т системного программирования РАН. - [М.], 2010. - С. 60.- URL: <http://www.ispras.ru/unicluster/>
- [4] Математическое моделирование в науке и машиностроении URL: <http://frund.vstu.ru/>
- [5] Top 50 | Суперкомпьютеры URL: <http://top50.supercomputers.ru/?page=archive&rating=22>
- [6] Vectorization Algorithms of Block Linear Algebra Operations Using SIMD Instructions / А.Е. Андреев, А.А. Насонов, А.А. Ново-

- кшенов, А.И. Бочкарев, Е.С. Харьков, D. Zharikov, S. Kharchenko, A. Yuschenko // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2015 : First Conference (Volgograd, Russia, September 15-17, 2015) : Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, O. Shabalina. – [Switzerland] : Springer International Publishing, 2015. – P. 323-341. – (Ser. Communications in Computer and Information Science. Vol. 535).
- [7] *Three-Steps Methodology for Patents Prior-Art Retrieval and Structured Physical Knowledge Extracting* / Д.М. Коробкин, С.А. Фоменков, А.Г. Кравец, С.Г. Колесников, М. Dykov // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2015 : First Conference (Volgograd, Russia, September 15-17, 2015) : Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, O. Shabalina. – [Switzerland] : Springer International Publishing, 2015. – P. 124-136. – (Ser. Communications in Computer and Information Science. Vol. 535)
- [8] *Автоматизированная методика семантического анализа патентного массива* / Д.М. Коробкин, А.С. Мармура, М.А. Фоменкова, С.А. Фоменков, А.Г. Кравец // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2015. - № 2 (157). - С. 159-163.
- [9] Серов С.С., Андреев А.Е., Кравченя П.Д., Гуцин Р.И., Чеботарев П.П. «Сокращение времени оценки сложности текстовых документов на неоднородной многопроцессорной вычислительной системе» //Инженерный вестник Дона : электрон. научн. журн. 2015. № 2(ч.2).  
URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3031>

*Об авторе:*



**Андрей Евгеньевич Андреев**

и.о. заведующего кафедрой ЭВМ и систем Волгоградского государственного технического университета, к.т.н.

*e-mail:*

[andan2005@yandex.ru](mailto:andan2005@yandex.ru)

A. E. Andreev, D. N. Zharikov, V. I. Konchenkov, A.A. Novokshenov  
A. A. Nasonov, V.A. Egunov, E.S. Kharkov, A. I. Bochkarev,  
P. D. Kravchenya, R. I. Gushchin

On the application of hybrid computing  
systems based on Intel® Xeon Phi™ at the technical university

ABSTRACT. This paper describes the experience of using hybrid computing with accelerators Intel Xeon Phi MIC architecture in Volgograd state technical university. Building a small but powerful computing cluster of hybrid nodes and their application in solving problems from different fields: vectorization of block linear algebra operations, the solution of problems of solid state physics by Monte Carlo methods, processing of texts.

*Key Words and Phrases:* Xeon Phi, MIC, SIMD, computing cluster, processing of texts arrays, Monte-Carlo methods, vectorizing of block operations of linear algebra