

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ ОФИСНЫЙ КЛАСТЕР СЕМЕЙСТВА «СКИФ-ГЕО»

В.В. Мазюк<sup>1</sup>, Н.Н. Парамонов<sup>2</sup>, А.Г. Рымарчук<sup>2</sup>, О.П. Чиж<sup>2</sup>

Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси<sup>1</sup>, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси<sup>2</sup>, Минск

Приводятся общие принципы создания и требования к параметрам и характеристикам малогабаритного кластера «СКИФ-ГЕО-Офис РБ», предназначенного для структурных подразделений (офисов) геолого-геофизической отрасли. Сформулированы требования к базовому программному обеспечению и к конструктивно-технологическим решениям. Приведены результаты экспериментальных исследований системы охлаждения кластера на базе радиаторов с тепловыми трубками.

*Ключевые слова:* суперкомпьютерные технологии, кластер, геолого-геофизические вычисления, тепловые трубки, температурные режимы.

### 1. Общие сведения

Развитие суперкомпьютерного направления «СКИФ» в части создания перспективных отраслевых кластеров (предметно-ориентированная серия суперкомпьютеров «СКИФ-ГЕО» для решения геолого-геофизических задач) реализуется в рамках научно-технической программы Союзного государства «СКИФ-НЕДРА» [1]. В соответствии с этой программой в Республике Беларусь предусмотрено создание двух опытных образцов (ОО) суперкомпьютеров семейства «СКИФ-ГЕО» кластерной архитектуры: ОО стационарной модели для решения ресурсоемких геолого-геофизических задач в центрах обработки данных (ЦОД) – кластер «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ» и ОО стационарной модели для структурных подразделений (офисов) геолого-геофизической отрасли – кластер «СКИФ-ГЕО-Офис РБ». Исследования проводились на основании практического опыта, полученного авторами в процессе создания моделей суперкомпьютеров Ряда 4 семейства «СКИФ», а также с учетом разработки предварительных требований к параметрам перспективных белорусских отраслевых кластеров для решения геолого-геофизических задач [2].

### 2. Требования к параметрам и характеристикам

Кластер «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» предназначается для установки и эксплуатации в отраслевых структурных подразделениях (офисах) как для самостоятельного выполнения офисных научных расчетов, автоматизированного проектирования, обработки массивов данных, так и в качестве дополнения к мощным высокопроизводительным кластерным системам для разработки программ, подготовки данных и проведения предварительных расчетов. Офисные модели должны быть программно совместимы с высокопроизводительными кластерами для ЦОД, должны обладать небольшими габаритами, весом и энергопотреблением, иметь встроенное воздушное охлаждение. Уровень акустических шумов, создаваемых кластером, не должен превышать норм, установленных ГОСТ 27818-88 для соответствующих устройств. Вычислительные узлы (ВУ) и другие модули ОО кластера «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» должны располагаться в оригинальной конструкции настольного типа. Габариты такой конструкции не должны превышать базовые габариты (ширина x глубина) типовых 19” стоек. Высота изделия – не более 4U. Вычислительные узлы ОО кластера «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» должны быть реализованы на базе серверного конструктива в виде компактного компьютерного набора типа Intel NUC [3].

В ОО кластера «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» должны быть реализованы следующие базовые архитектурные принципы:

- классическая кластерная архитектура с распределённой памятью;
- работа под управлением операционной системы (ОС) типа Linux;
- организация единой сети кластера, реализующей функции системной и вспомогательной сетей (для MPI-обменов, для файловых операций ввода/вывода и для оптимизации параллельного выполнения программ);
- использование гибридных вычислительных узлов на базе чипов, в которых интегрированы как ядра традиционных (классических) процессоров архитектуры x86-64, так и ядра GPU (гибридные процессоры APU-Accelerated Processing Unit);
- использование в вычислительных узлах кластерных конфигураций только тех процессоров, архитектура которых соответствует требованиям технологии OpenCL;
- использование в структуре кластера одного выделенного управляющего узла, выполняющего функции управления вычислениями и подключения пользователей из локальной сети структурного подразделения (офиса), а также функции файл-сервера. При создании на основе базовой конфигурации конкретных офисных модификаций «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» возможно использование в структуре кластера выделенного файл-сервера.

В кластере «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» должно быть 10 ВУ. Каждый ВУ кластера должен содержать: один двухъядерный гибридный процессор APU типа Intel Core i7-6660U (TDP не более 15 Вт); оперативную память ВУ – не менее 32 ГБ DDR4; дисковую память ВУ – не менее 240 ГБ SATA; разъемы PCI-E для расширения функциональных возможностей; Gigabit Ethernet порт; четыре порта USB 3.0; графический выход Mini-DP 1.2 Mini-HDMI 1.4a.

В кластере «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» предусмотрен один коммутатор системной и вспомогательной сети Gigabit Ethernet. Энергопотребление ОО кластера «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» должно быть не более 0,6 кВт.

### 3. Требования к базовому программному обеспечению (ПО)

В кластере «СКИФ-ГЕО-Офис РБ» должна быть реализована работа под управлением операционной системы (ОС) типа Linux на основе последних версий дистрибутива Fedora с обновлениями для повышения производительности кластера. В качестве средств разработки параллельных программ должна быть реализована связка из стандартных компиляторов дистрибутива Linux (C/C++, Fortran) и библиотеки MPI. Планируется к использованию система пакетной обработки заданий PBS (Portable Batch System) и планировщик задач Maui.

Должна быть обеспечена программная совместимость с кластером «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ» для приложений, выполняемых только на CPUc архитектурой x86-64, как на уровне исходных кодов приложений, так и на уровне бинарных (исполняемых) файлов приложений.

Для приложений, выполняемых на потоковых процессорах-ускорителях, соответствующих требованиям технологии OpenCL, должна быть обеспечена программная совместимость с ОО кластера «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ» только на уровне исходных кодов приложений.

В качестве прикладного программного обеспечения предполагается использование прикладных пакетов LS-DYNA и OpenFOAM [4] для работы в составе программного комплекса геомеханического моделирования породных массивов при отработке Старобинского месторождения калийных солей. Графическое ядро процессоров NUC поддерживает технологию программирования OpenCL в режимах вычислений одинарной и двойной точности. Применение библиотеки PARALUTION [5] позволяет эффективно задействовать GPU в вычислениях пакета OpenFOAM. Данное моделирование позволит создавать прогноз динамики напряженно-деформированного состояния породного массива вследствие производственной деятельности потребителя на участке шахтного поля. Подобные требования и диктуют необходимость создания малогабаритных и высокоэффективных установок с одновременным задействованием CPU и GPU на ВУ, что влечёт за собой особое внимание к тепловым режимам работы кластера.

### 4. Конструктивно-технологические решения

Один из вариантов блочной компоновки настольной модели офисного кластера на базе процессорных плат миникомпьютеров семейства NUC фирмы Intel приведен на рисунке 1.

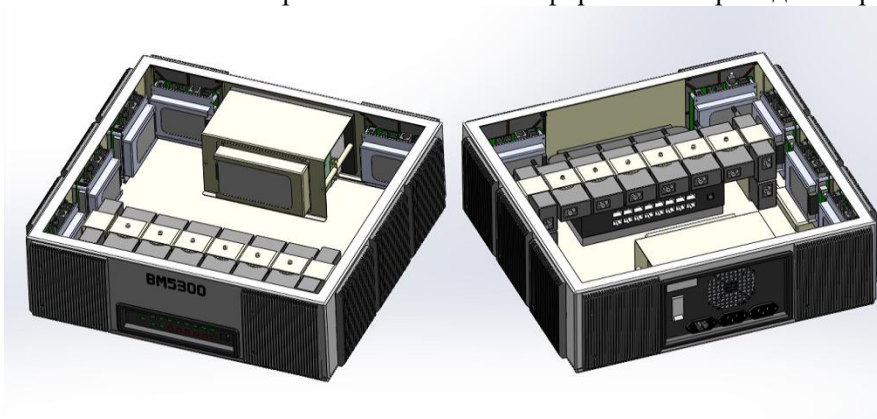
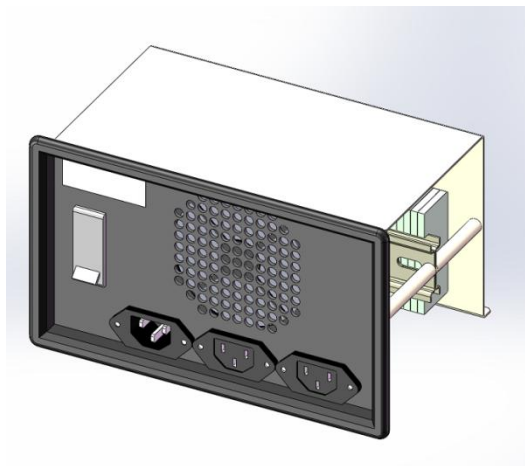


Рис. 1. Вариант компоновки настольной конструкции офисного кластера

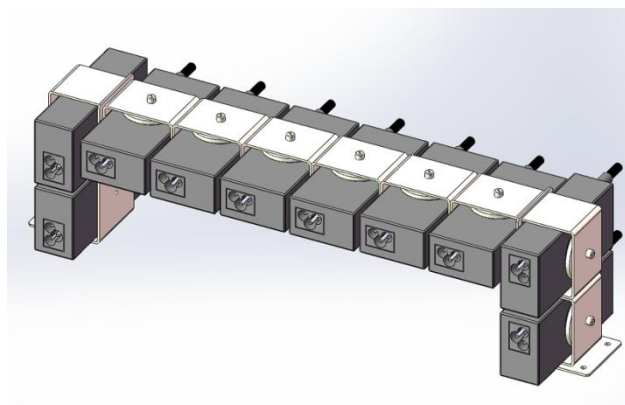
Вычислительные узлы выполнены на базе процессорных плат комплектов NUC без кулеров, предусмотрены накопитель от стандартных комплектов NUC и дополнительный накопитель для управляющего узла. Процессорные платы установлены непосредственно на наружные радиаторы, процессор и чипсет имеют прямой контакт с радиатором. Для улучшения отвода тепла от зоны соприкосновения в радиаторы запрессованы тепловые трубки (ТТ). Использование ТТ базировалось на практическом опыте исследования их эффективности в системах охлаждения кластерных конфигураций [6]. Процессорные платы в сборе с радиатором и накопителем установлены вертикально по периметру блока (по две с лицевой стороны и сзади, и по три по бокам). Для удобства обслуживания, ремонта и наладки вычислительных узлов каждый радиатор в сборе с процессорной платой и накопителем имеет возможность индивидуального открывания на поворотных петлях. Коммутатор GbE располагается с лицевой стороны на основании блока между двумя вычислительными узлами. Предусмотрена возможность визуального контроля и управления коммутатором непосредственно с лицевой стороны кластера.

Разъемы коммутатора для подключения кабелей коммутационной сети расположены ближе к центру блока. Разъемы подключения кабелей коммуникационной сети на процессорных платах расположены сверху плат. Расположение процессорных плат вычислительных узлов по периметру блока, разъемов коммутатора по центру блока и разъемов коммутационной сети на процессорных платах сверху упрощают монтаж коммуникационной сети. Система электропитания блочного варианта конструкции вычислительного кластера имеет две составляющие – стандартные блоки электропитания комплектов NUC для каждого вычислительного узла и оригинальный распределитель электропитания, показанный на рисунке 2:



**Рис. 2.** Распределитель электропитания

Стандартные блоки электропитания комплектов NUC компактно расположены на несущем шасси, показанном на рисунке 3, посередине блока над коммутатором, что обеспечивает удобство подключения кабелей электропитания вычислительных узлов, расположенных по периметру блока.

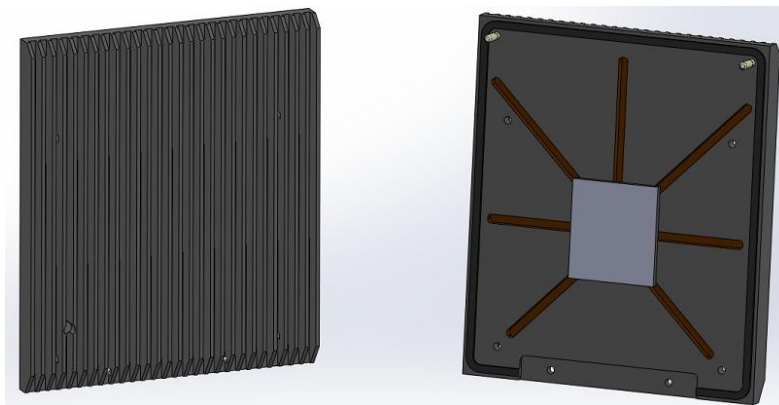


**Рис. 3.** Несущее шасси с блоками электропитания

Распределитель электропитания расположен внутри блока на задней панели, он имеет монтажные колодки, установленные на DIN-рейках для передачи первичного электропитания 220В к стандартным блокам электропитания вычислительных узлов, коммутатору, вентилятору, автомату электропитания, дополнительным розеткам электропитания наружных устройств системы (например монитор, система хранения данных).

#### **4.1 Применение радиаторов охлаждения с тепловыми трубками**

Для офисных кластеров одним из основных требований является низкий уровень шума. Это требование может быть выполнено, если основным способом охлаждения является естественная конвекция воздуха, а количество вентиляторов сведено к минимуму. Для этого на процессоры и чипсеты процессорных плат установлены радиаторы, отводящие тепло путем естественной конвекции. Радиаторы для более эффективного отвода тепла от зоны нагрева на всю их площадь имеют запрессованные в их основание тепловые трубки, концы которых сходятся в зону точечного нагрева под процессором и чипсетом. На концы тепловых трубок сверху через тепловую пасту ложится переходная пластина, которая имеет непосредственный тепловой контакт с процессором и чипсетом, как изображено на рисунке 4:



**Рис. 4.** Радиатор с тепловыми трубками

Радиаторы в блоке расположены снаружи по периметру блока для создания оптимальных условий охлаждения путем естественной конвекции. Для вытяжки из блока теплого воздуха, создаваемого остальными компонентами аппаратно-программного комплекса, достаточно одного вентилятора расположенного на задней стенке блока (рисунок 1). Радиатор является одним из самых важных компонентов в системе воздушного естественного охлаждения. Радиатор уменьшает температуру выделяющего тепло электронного элемента за счёт снижения теплового сопротивления корпус электронного элемента – окружающая среда (окружающий воздух). Радиатор излучает тепло в окружающее пространство, что вызывает естественную конвекцию окружающего воздуха. Для увеличения излучаемого радиатором тепла применяют чернение поверхности радиатора.

Тепловое сопротивление радиатора зависит от площади ребренной поверхности, конструктивных особенностей и технологии изготовления. В настоящее время на рынке представлены пять типов радиаторов, задействованных в массовом производстве: «экструзионные», складчатые, кованные (холоднодеформированные), точёные. Наиболее распространены два типа радиаторов: «экструзионные» (прессованные) радиаторы и точёные.

Для варианта конструкции маломощных вычислительных узлов на базе комплектов NUC на процессорах 6-ого поколения Intel Core (i7-6660U) с тепловыделением 15Вт была разработана система воздушного естественного охлаждения с помощью точёных радиаторов собственной разработки. Точёный радиатор присоединяется к источнику тепла (теплораспределяющей крышке процессорного элемента) системной платы вычислительного узла. Радиатор каждого из вычислительных узлов крепится к несущей конструкции автономного блока размещения вычислительных узлов. При этом охлаждающей поверхностью радиаторы направлены за пределы блока и для движения воздуха при охлаждении радиатора не будет никаких препятствий. Радиаторы для более эффективного отвода тепла от зоны нагрева на всю площадь своей поверхности имеют запрессованные в основание тепловые трубки, которые проходят через зону точечного нагрева над процессором и чипсетом. Тепловые трубки отводят тепло за счет использования скрытой теплоты испарения жидкого теплоносителя. Перенос тепла в замкнутом цикле испарение-конденсация происходит в герметичном объеме ТТ. При этом эффективная теплопроводность ТТ, в десятки раз превосходит теплопроводность меди или алюминия.

#### **4.2 Расчёт температурных режимов работы кластера**

По предварительным расчётам при источнике тепла мощностью 15-20Вт максимальное тепловое сопротивление будет составлять 1,6 – 2,0°C / Вт, при этом радиатор будет нагреваться до температуры 44-50°C, а процессорный элемент до 70°C. Следует иметь в виду, что расхождение между расчётными данными и характеристиками реальной системы охлаждения может достигать до 20-25%. Это обычная погрешность расчетов тепловых режимов систем. Она связана с невозможностью учета всех конструктивных и теплофизических особенностей системы охлаждения и элементов конструкции. Поэтому необходимо проведение экспериментальных работ. Для проведения исследований в условиях приближенным к

реальным условиям эксплуатации был изготовлен макет с двумя алюминиевыми оребренными точечными радиаторами с тепловыми трубками (рисунок 5). Нагрев осуществлялся с помощью плоского электрического нагревателя (30 Вт), а охлаждение воздушной естественной конвекцией. Температура замерялась в точках, показанных на рисунке 6, после достижения стационарного теплового режима. Для радиаторов с тепловыми трубками и без них температурные замеры проводились в одних и тех же точках.

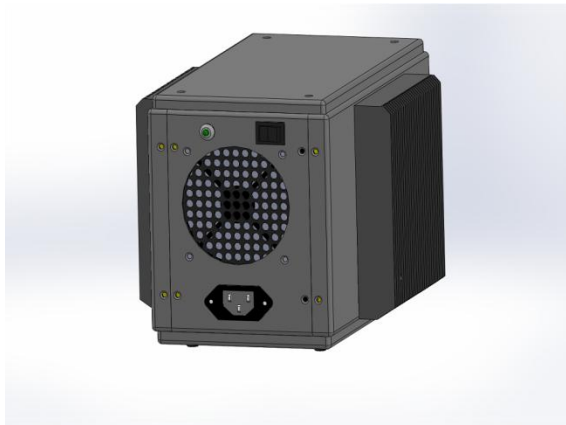


Рис. 5. Внешний вид макет

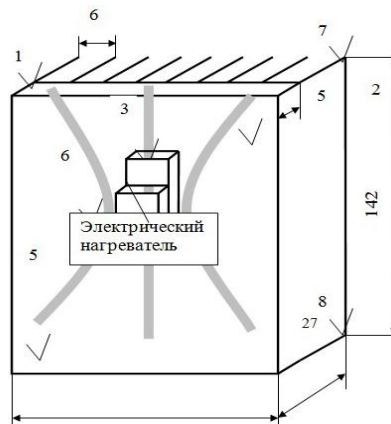


Рис. 6. Радиатор с точками съема температур

Результаты замеров после достижения установившегося теплового режима приведены в таблице 1:

Таблица 1. Значения температур при нагреве радиатора с ТТ и без ТТ

Температура, °С (температура окружающего воздуха 20 °С)								
Точки замеров	1	2	3	4 (Tmax)	5	6	7	8
без ТТ	48,9	48,3	56,4	<b>71,4</b>	44,7	48,8	45,0	44,7
$T_{max}-T_i$	22,5	23,1	15,0	0	26,7	22,6	26,4	26,7
с ТТ	49,1	49,4	54,7	<b>65,3</b>	47,2	51,3	48,1	47,8
$T_{max}-T_i$	16,2	15,9	10,6	0	18,1	14,0	17,2	17,5

Как видно из таблицы, применение ТТ, обеспечивающих теплопроводность, превышающую теплопроводность алюминия, позволило снизить максимальную температуру на 6,1 градуса, а перепады температуры по радиатору на 5 – 9 градусов.

## 5. Заключение

В представленной работе приведены принципы создания малогабаритных офисных кластеров семейства «СКИФ-ГЕО», разрабатываемых в рамках программы Союзного государства «СКИФ-НЕДРА». Описано применяемое программное обеспечение и основные конструктивно-технологические решения. Особое внимание уделяется обеспечению тепловых режимов работы кластера с использованием тепловых трубок собственного производства. Отличительными особенностями данной разработки по сравнению с аналогичными доступными на рынке решениями [7, 8] являются: применение современных процессорных элементов Intel NUC, наличие вычислений двойной точности на CPU и GPU, собственная система охлаждения, пониженный уровень допустимого шума. Опытный образец малогабаритного офисного кластера с учетом проведенных исследований будет изготовлен в четвертом квартале 2016 года.

## Литература

1. Исследования и разработка высокопроизводительных информационно-вычислительных технологий для увеличения и эффективного использования ресурсного потенциала углеводородного сырья Союзного государства. Концепция научно-технической программы Союзного государства «СКИФ-НЕДРА». Одобрена Постановлением Совета Министров Союзного государства № 42 от 12.12.2012.
2. С.М. Абрамов, В.В. Анищенко, Н.Н. Парамонов, А.Г. Рымарчук, О.П. Чиж. Отраслевые суперкомпьютеры семейства «СКИФ» в республике Беларусь: состояние и перспективы развития. // Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (23-28 сентября 2013 г., г. Новороссийск). — М.: Изд-во МГУ, 2013. — С. 258-263.
3. Комплекты Intel NUC. URL: <http://www.intel.com/content/www/us/en/nuc/overview.html/> (дата обращения: 10.06.2016).
4. The open source CFD toolbox. URL: <http://www.openfoam.com/> (дата обращения: 10.06.2016).
5. PARALUTON Labs. URL: <http://www.paralution.com/> (дата обращения: 10.06.2016).
6. В.В. Мазюк, Н.Н. Парамонов, А.Г. Рымарчук, О.П. Чиж. Исследования и и разработка методов обеспечения допустимых тепловых режимов для суперкомпьютерных конфигураций терафлопсного диапазон. // Труды международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России», г. Москва, 28-29 сентября 2015 г. - М.: Изд-во МГУ, 2015. – С. 206-214.
7. У «Росатома» разыгрался суперкомпьютерный аппетит. URL: [http://www.cnews.ru/news/top/u\\_rosatoma\\_razygralsya\\_superkompyuternyj](http://www.cnews.ru/news/top/u_rosatoma_razygralsya_superkompyuternyj) (дата обращения: 10.06.2016).
8. Семейство T-Mini P. URL: <http://www.t-platforms.ru/products/hpc/p-class.html> (дата обращения: 10.06.2016).