

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <http://www.agequal.ru>

2020, №1 [http://www.agequal.ru/pdf/2020/AGE\\_QUALITY\\_1\\_2020.pdf](http://www.agequal.ru/pdf/2020/AGE_QUALITY_1_2020.pdf)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Орехов С.Е., Лобанов А.В., Матвеев Е.Ю., Семенов А.Л. Методологические аспекты совершенствования перспективных информационно-коммуникационных узлов, предназначенных для решения высокопроизводительных задач на основе облачных технологий // Электронный научный журнал «Век качества». 2020. №1. С. 142-157. Режим доступа: <http://www.agequal.ru/pdf/2020/120011.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 004.75

**Методологические аспекты совершенствования перспективных информационно-коммуникационных узлов, предназначенных для решения высокопроизводительных задач на основе облачных технологий**

**Орехов Сергей Евгеньевич**

*кандидат технических наук,*

*начальник кафедры, Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (г. Серпухов) Россия, 142210, Московская обл., г. Серпухов, Бригадная улица, 17*  
*[majorose@mail.ru](mailto:majorose@mail.ru)*

**Лобанов Алексей Владимирович**

*соискатель, Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (г. Серпухов) Россия, 142210, Московская обл., г. Серпухов, Бригадная улица, 17*  
*[asu@modernit.ru](mailto:asu@modernit.ru)*

**Матвеев Евгений Юрьевич**

*соискатель, Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (г. Серпухов) Россия, 142210, Московская обл., г. Серпухов, Бригадная улица, 17*  
*[metrolog@modernit.ru](mailto:metrolog@modernit.ru)*

**Семенов Андрей Леонидович**

*соискатель, Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (г. Серпухов) Россия, 142210, Московская обл., г. Серпухов, Бригадная улица, 17*  
*[tau@modernit.ru](mailto:tau@modernit.ru)*

**Аннотация.** В статье освещается концепция создания распределенного кластера параллельных вычислений и вопросы аппаратно-программного обеспечения на основе мобильных и модульных информационно-

коммуникационных узлов, обеспечивающих высокую степень отказоустойчивости за счет децентрализованной архитектуры управления и автономности, внедрения энергоэффективных технологий, обоснованного выбора контролируемых и измеряемых параметров и теории адаптивного управления.

Статья описывает подход к построению высокопроизводительных вычислительных модулей – ключевых элементов в информационно-коммуникационных узлах, имеющих высокоплотную компоновку вычислительных элементов за счет внедрения технологии охлаждения с фазовым переходом, проводится сравнительный анализ с существующими способами конвекционного и иммерсионного охлаждения.

В статье рассматриваются зависимости по повышению достоверности измерительного контроля, выбор контролируемых и измеряемых параметров, которые используются на критически важных узлах, выбор средств измерений и создание информационной системы в информационно-коммуникационных узлах, а также возможность применения адаптивной системы управления, построенной на основе машинного обучения.

**Ключевые слова:** интегрированная система управления; информационно-коммуникационный узел; параллельные вычисления; измерительная система; теплообмен; машинное обучение.

Эволюционирование систем управления и обеспечивающих их функционирование сетей связи обусловило появление нового важного компонента – автоматизированной системы управления связью, при этом поддержка принятия решений согласно общепринятым научным взглядам должна быть прерогативой еще одного, не менее важного, компонента – искусственного интеллекта. Последний компонент, базируясь на технологиях высокопроизводительных распределенных (облачных) вычислений, также для своей работы использует сеть каналов связи и аппаратно-программные комплексы сбора, хранения и обработки информации. Совокупность указанных

компонентов, предназначенных для решения задач по достижению общей цели, обозначим термином «интегрированная система управления» (ИСУ).

Функционирование и развитие ИСУ осуществляется на основе современных клиент-серверных технологий, реализующих концепцию децентрализованного управления сетью, а также распределенного хранения и обработки данных. Главное преимущество децентрализованной ИСУ заключается в достижении максимальной потенциально возможной функциональной устойчивости за счет обеспечения наивысшего уровня самоорганизации. Процесс самоорганизации, как правило, состоит из двух этапов: этап инсталляции физической сети и этап конфигурирования логической сети (рис. 1).

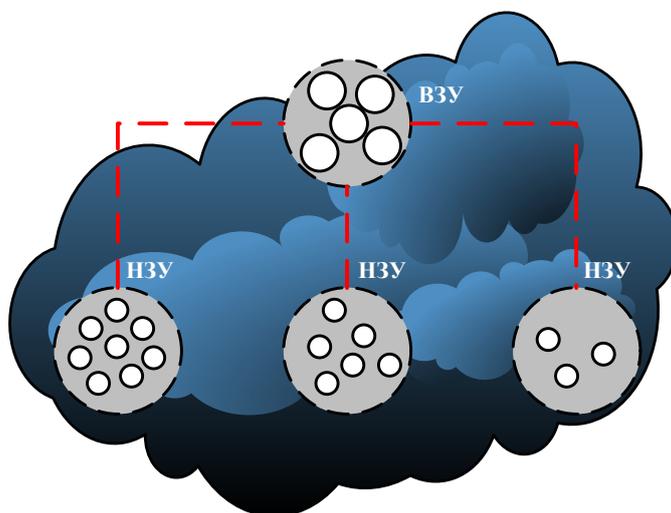


Рис. 1. Принцип физической децентрализации информационной сети ИСУ с сохранением ее логической централизованной структуры

Пример, представленный на рисунке, демонстрирует используемый при самоорганизации принцип физической децентрализации информационной сети ИСУ (иерархическая сеть, состоящая из одного верхнего звена управления (ВЗУ) и трех нижних звеньев управления (НЗУ)) с сохранением ее логической централизованной структуры. Каналы связи в логической сети, так же как и звенья управления, виртуализируются. Виртуализация каналов осуществляется на основе технологии VPN и метода многомерной маршрутизации пакетов (ММП) [1].

В качестве типовых элементов физической информационной сети ИСУ – информационно-коммуникационных узлов (ИКУ) – могут применяться мобильные или быстроразворачиваемые микроцентры обработки данных (микроЦОД) контейнерного или модульного исполнения, преимущественно, с автономной системой энергоснабжения. Обобщенная структура физической информационной сети ИСУ представлена на рис. 2.

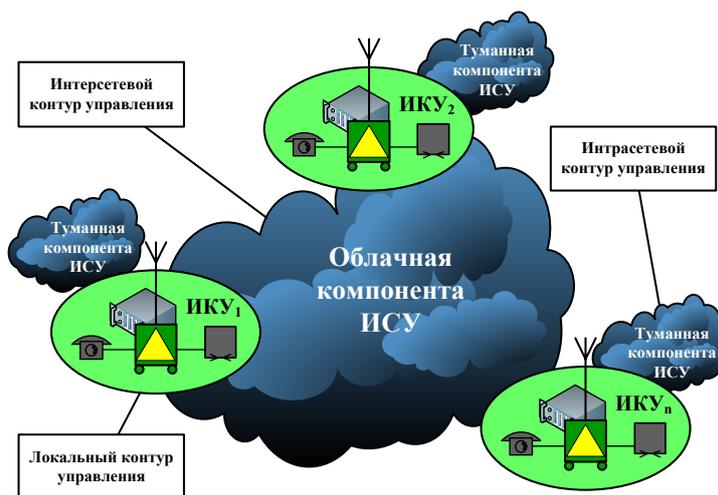


Рис. 2. Обобщенная структура физической информационной сети ИСУ

Аппаратно-программный состав ИКУ в целях унификации используемого оборудования представляет собой совокупность однотипных вычислительных модулей, устройств хранения, распределения и передачи информации.

В качестве программно-аппаратного ядра перспективной ИСУ используется кластер Hadoop [2]. Обработка больших данных (Big Data) осуществляется путем распределения имеющегося объема информации по узлам облачного вычислительного кластера, который хранится в формате HDFS (Hadoop Distributed File System) [2, 3]. Обработка клиентских запросов распределенным вычислительным кластером осуществляется с помощью MapReduce – разбиением глобальной области определения функциональной зависимости на более мелкие локальные подмножества, которые могут храниться на разных серверах центра хранения данных (ЦХД), объединенных общей HDFS, и обрабатываться по заранее установленным мапирующим

правилам собственными вычислительными мощностями – мапирующими процессорами вычислительных модулей ИСУ.

В настоящее время отсутствуют научно обоснованные технические решения по динамической реконфигурации телекоммуникационной платформы под оптимальную для облачного высокопроизводительного вычислительного кластера топологию. В качестве варианта предлагается использовать технологию программно-определяемых сетей (SDN) совместно с виртуализацией сетевых функций (NFV) и ММП/ПСТ для реализации схемы MapReduce в зависимости от типа пользовательской задачи и загруженности динамически реконфигурируемой телекоммуникационной платформы, чему и посвящены дальнейшие исследования.

Реализация программных алгоритмов, требующих трудоемких параллельных вычислений с заданной производительностью, при создании модульных и мобильных вычислительных систем, требует совершенствования технологии построения высокопроизводительных вычислительных модулей (ВВМ) [5].

Уровень современной разработки высокопроизводительных вычислительных систем (ВВС) находится на том этапе, когда возможности вычислительных устройств опережают возможности систем охлаждения. Для полноценной реализации возможностей вычислительных систем требуется повышение эффективности теплоотведения и увеличение плотности размещения вычислительных элементов, а также оптимизации остальных систем и узлов.

Существующие практические методы проектирования ВВС определяют две эффективные технологии охлаждения: воздушное и жидкостное.

Обобщая накопленный опыт эксплуатации ВВС можно сделать вывод о достижении предела эффективности воздушного охлаждения при мощности тепловыделения на уровне 40 кВт с одной серверной стойки, при этом такое решение характеризуется значительными массогабаритными параметрами, высокими энергозатратами на циркуляцию значительного объемного расхода

воздуха (3000-4000 м<sup>3</sup>/ч) через вычислительные устройства, охлаждение промежуточного теплоносителя, а также созданием значительного звукового давления (95 Дб).

В связи с необходимостью перехода к более эффективным технологиям охлаждения в последних ВВС была реализована технология иммерсионного охлаждения. Если сравнивать эффективность принципов теплопередачи, то по сравнению с воздушным, жидкостное охлаждение позволяет осуществлять теплоъем до 20 раз эффективнее воздушного. Такой подход существенно расширил возможности повышения вычислительной и энергетической плотности при проектировании ВВС.

Однако, анализ эксплуатации ВВС показывает, что при увеличении вычислительной и энергетической мощности систем такого рода возникает необходимость применения специальных холодильных машин (чиллеров), способных обеспечить низкий температурный график хладоносителя.

Недостатки такого решения заключаются более чем в двукратном увеличении площади, необходимой для размещения инженерной инфраструктуры ВВС, в 30-40% энергозатратах на обеспечение собственных нужд, снижении надежности за счет увеличения количества узлов потенциального отказа и значительных эксплуатационных издержках.

При использовании технологии фазового перехода для охлаждения ВВС возможное достижение передачи тепловой энергии происходит до 4000 раз интенсивнее по сравнению с конвекционной воздушной теплопередачей.

На базе свойств фторкетонных соединений создан макет, позволяющий исследовать принцип двухфазного иммерсионного охлаждения, при котором вычислительные устройства погружаются во фторкетонную жидкость и при достижении на вычислительных элементах (тепловых имитаторах) рабочей температуры заставляют жидкость вскипать и испаряться. Пары фторкетона, поднимаясь над жидкостью, конденсируются на конденсаторах охлаждения, передавая тепловую энергию во внешний холодильный контур, затем в жидкой фазе стекают обратно к вычислительным устройствам.

Для работы макета применяется фторкетоновая жидкость, имеющая температуру кипения  $61^{\circ}\text{C}$ , температуру замерзания  $-135^{\circ}\text{C}$ , а также диэлектрические свойства. Свойства фторкетоновых соединений возможно использовать для построения систем охлаждения ВВМ с более высоким уровнем вычислительной и энергетической плотности из расчета 4 кВт тепловыделений вычислительного устройства на 1 л жидкости. Температурный режим работы ВВМ в самый жаркий период эксплуатации составит  $46/52^{\circ}\text{C}$ , что обеспечивает потенциал для применения ВВС практически в любой географической зоне. В холодное время года система охлаждения позволяет функционировать в режиме полного свободного охлаждения с минимальными энергозатратами.

Одним из технически сложных решений в обеспечении двухфазного теплообмена является выбор технологии создания фторкетоновых теплообменных конденсаторов. Было установлено, что в зависимости от структуры, поверхность может быть более эффективна для конвекции, кипения или конденсации. Для интенсификации теплообмена выбрана высокоразвитая микроструктурированная поверхность, выполненная по технологии деформирующего резания [6, 7, 8]. В качестве материала для изготовления конденсатора с микроструктурированной поверхностью используются медные трубы, выполненные по ГОСТ 859-2001 из твердой-полутвердой меди чистоты М1-М2, с повышенной или нормальной точностью [9].

Исходя из результатов натурного макетирования двухфазного иммерсионного процесса, были произведены расчеты тепловой мощности полноразмерного конденсатора в зависимости от расхода водного раствора этиленгликоля через конденсатор и числа трубок:

1. Для создания конденсатора требуемой мощности можно использовать как оребренные трубы с  $d_{\text{вн}} = 14$  мм, так и трубы с  $d_{\text{вн}} = 16$  мм – разница между этими вариантами с точки зрения теплообмена невелика. Важно, чтобы заданные для расчета геометрические параметры микроструктуры оребрения были достаточно точно соблюдены при изготовлении труб.

2. В качестве интенсификатора теплообмена со стороны этиленгликоля необходимо использовать скрученную стальную ленту с толщиной 0,5 мм и  $S_{\text{ленты}}/d_{\text{вн}}$  от 2 до 3, тогда число труб можно принять равным 50 и обеспечить расход этиленгликоля через теплообменник  $G_{\Sigma}$  от 5 кг/с [10].

3. Конструктив теплообменника - шахматный трубный пучок с чередованием количества труб в рядах: первый ряд – 6 труб, второй – 5 труб и т.д. Минимальное расстояние между трубами в пучке - 4 мм.

Исполнение теплообменника для конденсации фторкетона представлено на рис. 3.

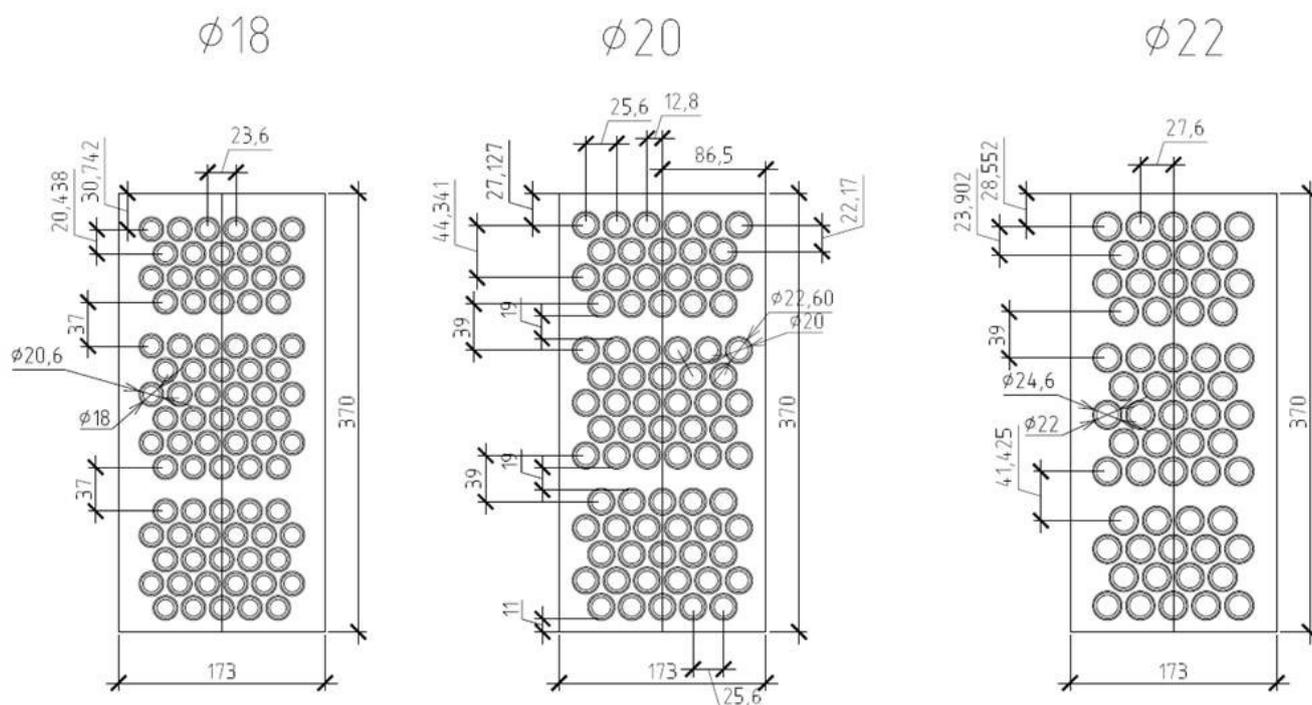


Рис. 3. Теплообменники для конденсации фторкетона с различными вариантами исполнения.

Для внешней утилизации тепла используется сухая вентиляторная градирня, гидромодуль с основным и резервным циркуляционным насосом. Коэффициент энергоэффективности Power Usage Effectiveness (PUE) ВВС в составе ИКУ варьируется в значениях 1,03 – 1,07 в зависимости уличной температуры.

По сравнению с иммерсионными системами охлаждения без фазового перехода, концепция фазового позволяет увеличить плотность размещения вычислительных элементов в ВВМ на 300%.

Концепция модульного/мобильного (контейнерного) ИКУ платформенного решения с двухфазным иммерсионным охлаждением под размещение ВВМ любой заданной современной или перспективной вычислительной архитектуры имеет широкое климатическое и географическое применения с возможностью функционирования в условиях ограничения центров электропитания.

Модульное решение должно обеспечивать более технологичный и компактный подход к решению задачи построения высокопроизводительных вычислительных комплексов.

Для контроля состояния оборудования и режимов функционирования систем при разработке ВВС применяются системы SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных). Они позволяют получить информацию о процессах, протекающих в инженерном оборудовании, и необходимые средства для воздействия на них. Однако эти программно-аппаратные средства являются так называемым «верхним» уровнем работы системы, управляют лишь автоматическими алгоритмами, заложенными в контроллеры «среднего» уровня, и не отслеживают процессы, происходящие в центрах питания и распределенных вычислительных кластерах Hadoop [11].

В целях повышения оперативности выполнения вычислительных задач и недопущения аварий предлагается объединить математический аппарат и алгоритмы обработки данных в адаптивную систему управления (Adaptive Control System), построенную на основе машинного обучения, которая объединяет SCADA, MapReduce и BigData appliance в единое целое (структура объединенной системы представлена на рис. 4).

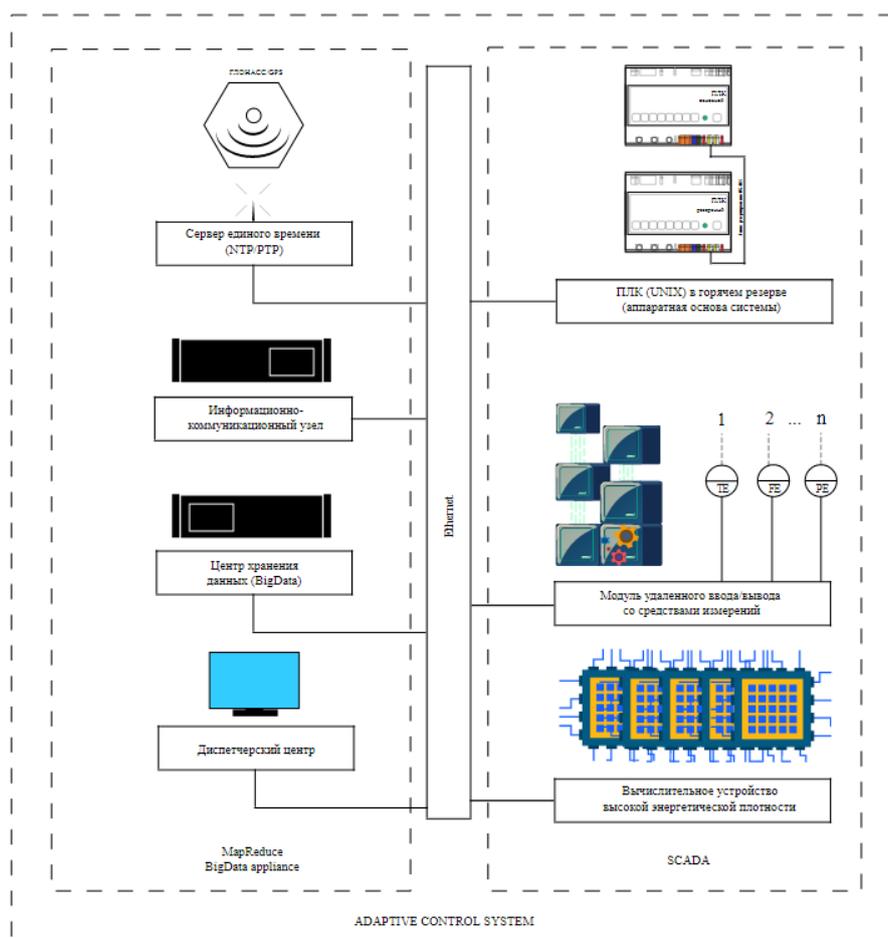


Рис. 4. Структура объединенной системы адаптивного управления.

Положительный эффект достигается за счет применения алгоритмов адаптивного управления кластером Hadoop на основе текущей информации, полученной от SCADA системы, и обратного контроля с ее стороны текущего состояния вычислительного кластера на предмет предстоящей реконфигурации, что положительно влияет на распределение вычислительных задач и распределение энергетических ресурсов инженерного оборудования [12]. Применение машинного обучения в ходе настройки адаптивной системы управления позволяет с использованием алгоритма обратного распространения выбрать подходящую комбинацию коэффициентов, которые контролируют текущую загруженность ВЭС, прогнозируют (на основе регрессионного анализа архивных данных) поведение в предстоящий момент как инженерного оборудования, так и вычислительного кластера [13]. При моделировании оказывает положительное влияние как на время отклика, так и на получение оценки сигнала с наименьшим средним квадратом ошибки. Все это в

совокупности позволяет правильно отреагировать на различные нештатные ситуации в ходе работы и не допустить возникновения аварий.

Применение вышеописанной системы адаптивного управления накладывает особые требования к выбору аппаратной части «среднего» и «низшего» уровня SCADA системы.

Как было сказано выше, к «среднему» уровню относятся контроллеры, а к «низшему» уровню - средства измерений и индикаторы. Контроллеры принимают информационные сигналы от средств измерений и индикаторов.

Повышение достоверности получения информации «верхним» уровнем напрямую зависит от:

- 1) детальной проработки и выбора измеряемых и контролируемых параметров на всех этапах создания ВВС;
- 2) проведения оценки достоверности измерительного контроля;
- 3) выбора методов и средств измерений, предназначенных для измерения выбранных параметров;
- 4) обеспечения экспериментов и макетных работ средствами измерений и испытаний.

Для мониторинга и анализа работоспособности ВВС выбраны следующие параметры:

- 1) температура теплоносителя до фторкетонных теплообменных конденсаторов;
- 2) температура теплоносителя после фторкетонных теплообменных конденсаторов;
- 3) температура внутренней поверхности фторкетонных теплообменных конденсаторов
- 4) температура жидкой и газообразной фаз фторкетонной жидкости;
- 5) температура воздушного порта;
- 6) температура вычислительных блоков;
- 7) расход теплоносителя в единицу времени;
- 8) давление теплоносителя в системе охлаждения.

Для контроля перечисленных параметров отобраны средства измерения, входящие в Государственный реестр средств измерений [14]. Как было сказано выше, информация от средств измерений передается по каналам связи к контроллерам «среднего» уровня, далее сигнал поступает на программно-программное средство – «верхний» уровень. В рамках метрологии для характеристики такой взаимосвязи используется понятие информационной системы (ИС) [15].

Для определения действительных значений измеряемой величины проведена процедура калибровки, по результатам которой определено, что достоверность измерительного контроля средств измерений, входящих в состав ВВС, и ИС в целом удовлетворяют метрологическим требованиям.

#### **Выводы:**

1. Для динамической реконфигурации телекоммуникационной платформы облачного высокопроизводительного вычислительного кластера необходимо использовать технологию SDN совместно с NFV и ММПИ/ПСТ для реализации схемы MapReduce.

2. Эффективным способом охлаждения высокопроизводительных вычислительных модулей является двухфазное иммерсионное охлаждение на основе фторкетонной жидкости.

3. Установлено влияние микроструктурированной поверхности на процесс конденсации фторкетона внутри макета высокопроизводительного вычислительного модуля.

4. Разработанный макет вычислительного модуля, позволяет исследовать способ двухфазного иммерсионного охлаждения высокопроизводительных вычислительных модулей и сравнительно определить увеличение плотности размещения вычислительных элементов.

5. Установлено положительное влияние применения машинного обучения на работу информационно-коммуникационного узла.

6. Произведен выбор измеряемых и контролируемых параметров, а также средств измерений для высокопроизводительных вычислительных модулей.

7. Определено дальнейшее направление исследований в области сбора, обработки и анализа данных телеметрии высокопроизводительных вычислительных модулей, позволяющих провести математическое моделирование для расчета показателей достоверности измерительного контроля.

### Список литературы

1. Орехов С.Е. Оптимизация распределения ТСП нагрузки по параллельному сетевому тракту сети связи с многомерной маршрутизацией пакетов / С.Е. Орехов, И.В. Сысоев // Известия Института инженерной физики. – 2014. – Т. 1. – № 31. – С. 57-59.
2. Holmes A. Hadoop in Practice. – NY: Manning Publications Co., 2012. – 537 p.
3. Big data. Тематическое приложение к газете «Вестник Ростелекома» // Ростелеком PRO. – 2016. – С. 63.
4. Scarpino M. OpenCL in Action. How to accelerate graphics and computation. – NY: Manning Publications Co., 2012. – 434 p.
5. Донцов Д.В., Лобанов А.В., Матвеев Е.Ю., Моисеенков П.И., Семенов А.Л., Ярославцев Д.С. Концепция автоматизированной системы управления высокопроизводительными комплексами специального назначения // I-methods. – 2018. – Т. 10. – № 2. – С. 22-30.
6. Зубков Н.Н. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, О.В. Кононов // Вестник МГТУ. – 1993. – № 4. – С. 79-82.
7. Зубков Н.Н. Совмещение процессов резания и обработки давлением в новом методе формообразования развитых поверхностных структур // КШП. ОМД. – 2002. – № 10. – С. 17–20; 29–34.
8. Попов И.А. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена / И.А. Попов, Х.М. Махьянов, В.М. Гуреев. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.

9. Ермолин В.К. Интенсификация конвективного теплообмена в трубе в условиях закрученного потока с постоянным по длине шагом // Инж.-физ. ж-л. – 1960. – Т. 3, – № 11. – С. 52-57.
10. Гиниятуллин А.А. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление труб со вставками в виде оребренных скрученных лент: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / ФГБОУ ВПО КНИТУ на правах рукописи. - Казань, 2015. С. 23-38.
11. Жмудь В.А. Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром // Автоматика и программная инженерия. - 2014. - № 2 (8). - С. 106-122.
12. Моисеенков П.И., Монахов М.А., Павленок А.М. Оценка ущерба в системе электроснабжения // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2014. - № 2(56). - С. 10-13.
13. Slama S., Errachdi A., Benrejeb M. Neural Adaptive PID and Neural Indirect Adaptive Control Switch Controller for Nonlinear MIMO Systems // Mathematical Problems in Engineering. - 2019. ID 7340392. - Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2019/7340392/>.
14. Данилевич С.Б., Колесников С.С. О выборе показателей достоверности результатов контроля // Законодательная и прикладная метрология. - 2008. - № 2. – С.48-51.
15. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. Учебное пособие. - М.: Логос, 2000.

## **A methodology for building promising information and communication nodes designed to solve high-performance tasks based on cloud technologies**

***Orekhov Sergey Evgenievich***

*Candidate of Technical Sciences, Head of Department, Branch of the Military academy of strategic missile forces named after Peter the Great  
Russia, 142210, Moscow region, Serpukhov, Brigadnaya street, 17  
majose@mail.ru*

***Lobanov Alexey Vladimirovich***

*Applicant, Branch of the Military academy of strategic missile forces named after Peter the Great  
Russia, 142210, Moscow region, Serpukhov, Brigadnaya street, 17  
asu@modernit.ru*

***Matveev Evgeny Yuryevich***

*Applicant, Branch of the Military academy of strategic missile forces named after Peter the Great  
Russia, 142210, Moscow region, Serpukhov, Brigadnaya street, 17  
metrolog@modernit.ru*

***Semenov Andrey Leonidovich***

*Applicant, Branch of the Military academy of strategic missile forces named after Peter the Great  
Russia, 142210, Moscow region, Serpukhov, Brigadnaya street, 17  
tau@modernit.ru*

**Annotation.** The article highlights the concept of creating a distributed cluster of parallel computing and hardware-software issues based on mobile and modular information and communication nodes that provide a high degree of fault tolerance due to the decentralized control architecture and autonomy, the introduction of energy-efficient technologies, the reasonable choice of controlled and measured parameters and adaptive theory management.

The article describes an approach to building high-performance computing modules - key elements in information and communication nodes that have a high-density layout of computing elements through the introduction of phase-transition cooling technology and carry out a comparative analysis with existing methods of convection and immersion cooling.

The article discusses the dependencies to increase the reliability of measuring control, the choice of monitored and measured parameters that are used on critical nodes, as well as the choice of measuring instruments and the creation of an information system in information and communication nodes, as well as the possibility of using an adaptive control system based on a machine learning.

**Key words:** integrated management system; information and communication node; parallel computing; measuring system; heat exchange; machine learning.