

# Технические аспекты и экономический эффект использования иммерсионной системы охлаждения

И.П. Осинин<sup>1</sup>, А.В. Шатохин<sup>1</sup>

ФГБОУ ВПО «Вятский государственный университет»<sup>1</sup>

Иммерсионное охлаждение является вариантом охлаждения, при котором происходит полное погружение электронных компонент в диэлектрическую жидкость. Имеют место различные мнения о целесообразности использования данного типа охлаждения. Как правило, их можно отнести к одной из трех больших групп: энергоэффективность, ограничения машинного зала и удобство эксплуатации. В данной статье проанализированы как преимущества, так и недостатки иммерсионных систем, приведен вариант оценки коммерческого эффекта при его использовании для охлаждения крупной супер-ЭВМ.

*Ключевые слова:* высокопроизводительные вычисления, иммерсионное охлаждение, энергоэффективность.

## 1. Введение

Вычислительные мощности суперкомпьютеров наращиваются постоянно. Важным рубежом развития технологий является создание системы эксафлопного уровня. По предварительным расчетам от каждой стойки первого эксафлопного компьютера необходимо будет отводить не менее 80 кВт [1]. Десять лет назад эта цифра звучала как недостижимая. Сегодня она вполне реальна, благодаря применению жидкости в качестве теплоносителя, у которой многократно более высокая теплоемкость и плотность по сравнению с воздухом. Существует несколько устойчивых подходов при создании систем жидкостного охлаждения (СЖО):

- охлаждение отдельных элементов, при котором электронные компоненты имеют контакт с водоблоками (решения компаний Asetek, SGI и др.);
- охлаждение всех элементов материнской платы за счет наложения на неё специальной пластины – coldplate (решения компаний PCK, Eurotech и др.);
- иммерсионные системы охлаждения (ИСО), в которых электроника полностью погружается в диэлектрическую жидкость (решения компаний Green Revolution Cooling, Immers, Iceotop, Hardcore Computer и др. [2-5]).

Ведущие производители вычислительной техники: IBM, HP, Google, Intel и некоторые другие проводят работы по созданию ИСО, что говорит о перспективности данного направления.

Считается, что иммерсионному подходу соответствует множество преимуществ по сравнению с другими СЖО: высокая эффективность и надежность, возможность использования в неблагоприятных условиях окружающей среды. А предполагаемыми недостатками являются: высокая стоимость, большой вес системы, нерациональное использование пространства машинного зала и ряд других. Учитывая совокупность достоинств подобных систем, разработка и применение иммерсионной системы жидкостного охлаждения для супер-ЭВМ является актуальной задачей.

Целью данной статьи является проведение анализа предполагаемых недостатков и ответа на вопрос – насколько предполагаемые недостатки иммерсионных систем охлаждения в действительности могут повлиять на перспективы их внедрения. Данная статья имеет следующую структуру:

- в пункте 1 (введение) приведена проблематика исследования и актуальность задачи;
- в пункте 2 рассмотрена общая концепция иммерсионной системы охлаждения, приведен обзор имеющихся на рынке решений;
- в пункте 3 приведены технические аспекты применимости иммерсионного подхода;
- в пункте 4 описан возможный экономический эффект от применения иммерсионного типа охлаждения в крупной супер-ЭВМ;
- в пункте 5 (заключение) приведено обобщение результатов данного исследования.

## 2. Иммерсионный подход к охлаждению электронных компонент

ИСО подразумевает, что вычислительное оборудование погружается в диэлектрическую жидкость (хладагент) и передает ей тепло внутри контейнера. Хладагент посредством насосной группы поступает из контейнера в сухую градирню, где происходит процесс передачи отводимого тепла во внешнюю среду, после чего хладагент вновь поступает в контейнер. На рис. 1 представлена общая организация ИСО. В общем случае несколько контейнеров могут быть подключены в один внешний контур охлаждения.

Равномерное распределение потока хладагента по всей емкости контейнера происходит посредством распределительного коллектора, расположенного в нижней части контейнера.

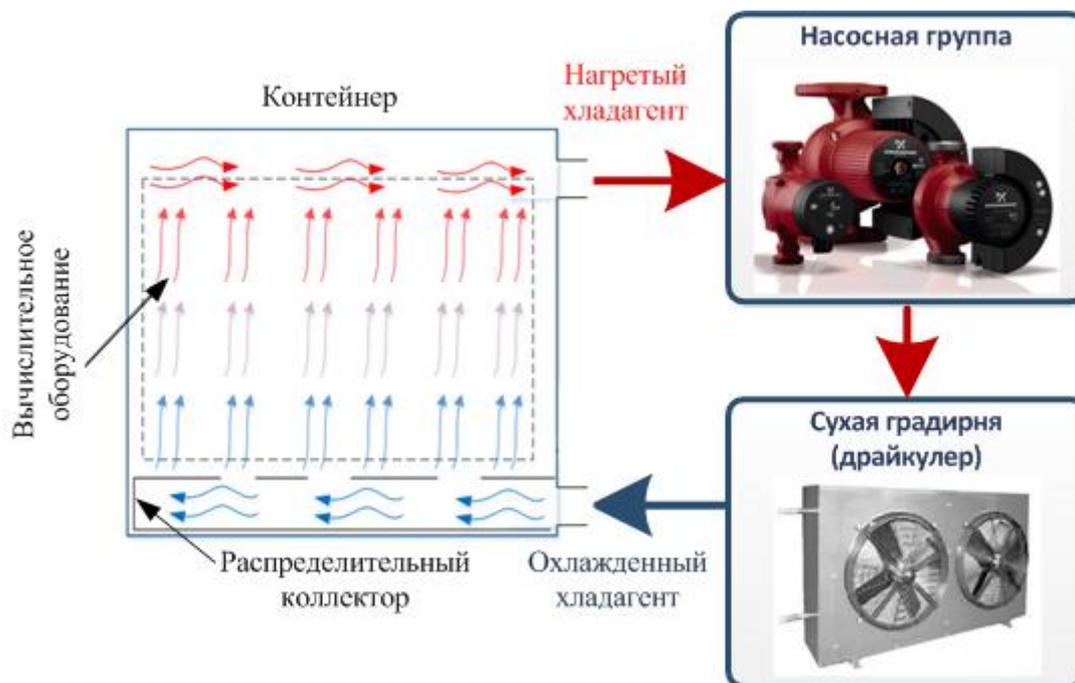


Рис. 1. Общая организация иммерсионного способа охлаждения

К хладагенту ИСО предъявляется ряд специфических требований: вязкость, достаточная теплоемкость и теплопроводность для охлаждения оборудования, диэлектрические параметры, экологичность, не токсичность, взрыво- и пожаробезопасность и т.д. Оптимальное сочетание этих характеристик является залогом высокой надежности работы вычислительного оборудования, простоты его обслуживания и эксплуатации. Примером такого хладагента может служить полиметилсилоксан. И хотя его теплопроводность значительно ниже, чем у воды, данный тип жидкости вполне подходит для ИСО. Он может свободно контактировать с электроникой без каких-либо негативных последствий.

На сегодняшний день большинство решений, реализующих иммерсионный подход к охлаждению вычислительных компонент, можно разделить по размеру контейнера:

- уровень стойки (рис. 2а), когда сервера монтируются вертикально в слоты единого контейнера, представляющего собой горизонтально расположенный телекоммуникационный шкаф; преимущество данного подхода состоит в простоте конструкции и высокой защищенности от протечек, так как количество жидкостных соединений минимизировано, недостаток состоит в нерациональном использовании площади машинного зала и сложности при извлечении сервера для ремонта или обслуживания, данный подход реализован компаниями Green Revolution Cooling [2] и Immers [3];

- уровень сервера (рис. 2б), когда каждая материнская плата расположена в отдельном контейнере (герметичный блейд-модуль), которые вставляются в специальные шасси; преимущества и недостатки противоположны уровню стойки (в целях экономии полезной площади машинного зала возможно многоуровневое размещение шасси, но большое количество быстро-

разъёмных гидравлических соединений существенно снижает надёжность системы), данный подход реализован компаниями Iceotopre [4] и Hardcore Computer [5].

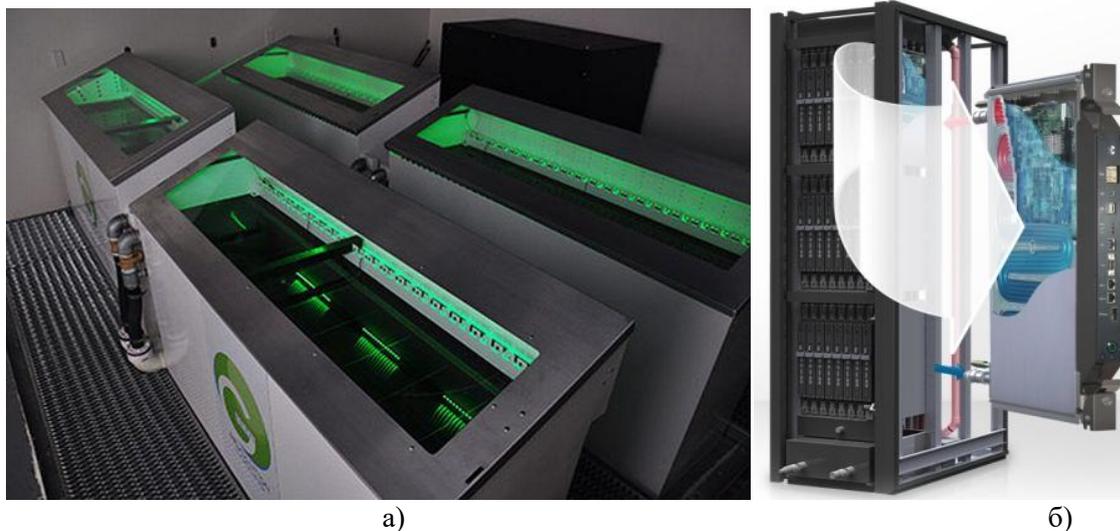


Рис. 2. Известные ИСО: уровня стойки (а) и уровня сервера (б)

Приведенные в следующих разделах статьи расчеты, касающиеся иммерсионного типа охлаждения, проведены на базе предлагаемого авторами контейнера (уровень стойки, как на рисунке рис.2а) вместимостью 16U и шириной 19”, что соответствует габаритам стандартного IT-оборудования. Охлаждение вычислительного оборудования происходит путем циркуляции диэлектрической жидкости. Отвод тепла выполняется во внешнюю среду посредством системы насосов и сухой градирни. Внешний вид предлагаемого контейнера с отмеченными габаритами и конструктивными элементами представлен на рис. 3.

При использовании современного серверного оборудования можно обеспечить вычислительную мощность порядка 34 Тфлоп/с на универсальных процессорах Intel Xeon E5-2680 v4 (16 серверов · 4 процессора · 14 ядер · 16 команд за такт · 2,4 ГГц).

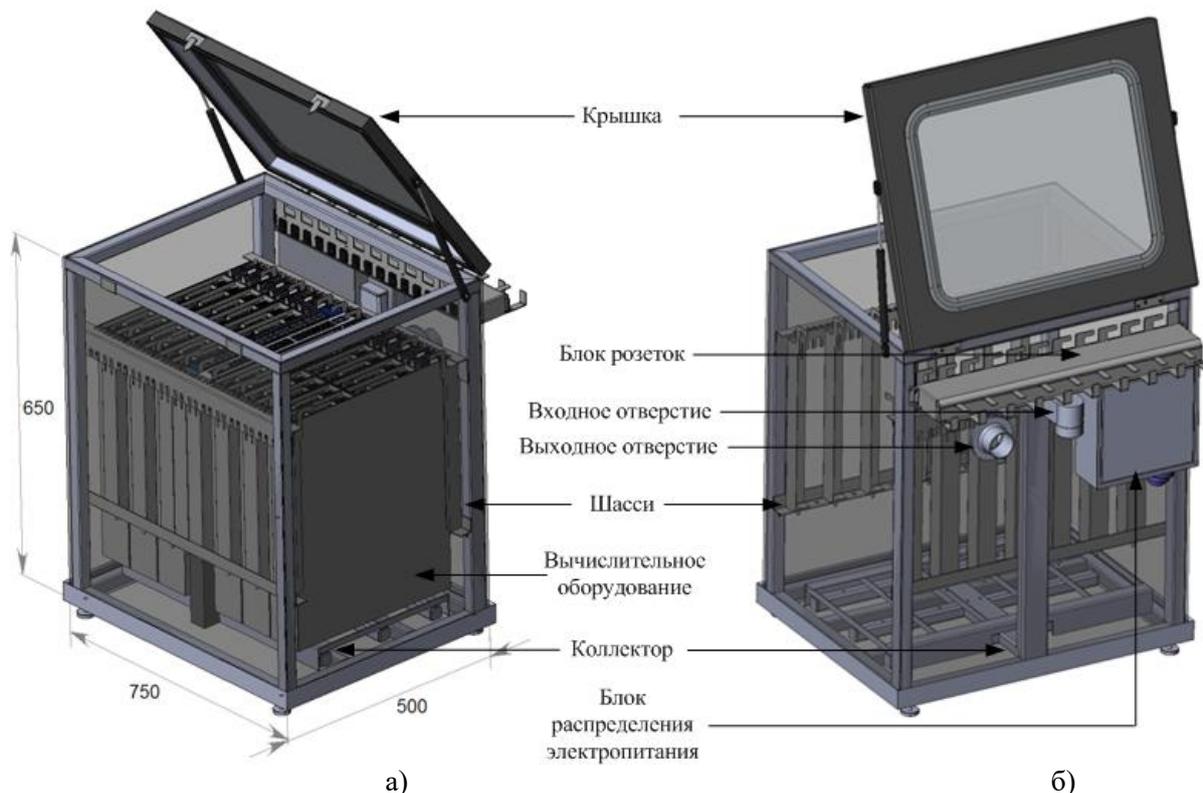


Рис. 3. Внешний вид предлагаемого контейнера: с вычислительным оборудованием (а) и без него (б)

### 3. Технические аспекты применимости иммерсионного подхода

Имеют место различные мнения о целесообразности использования иммерсионного типа охлаждения. Как правило, их можно отнести к одной из трех больших групп: энергоэффективность, ограничения машинного зала и удобство эксплуатации. Рассмотрим их более подробно.

#### 3.1 Коэффициент энергоэффективности

При сравнении систем охлаждения различных типов наиболее часто применяется коэффициент энергоэффективности  $PUE$ , вычисляемый как отношение общих энергозатрат к энергозатратам вычислительного оборудования:

$$PUE = \frac{P_{ВЫЧ} + P_{ИНЖ}}{P_{ВЫЧ}},$$

где  $P_{ВЫЧ}$  – энергопотребление вычислительного оборудования, Вт;

$P_{ИНЖ}$  – энергопотребление инженерного оборудования, Вт.

При этом нет единой методики расчета  $PUE$ , каждый производитель оборудования может по-своему рассчитать показатель энергоэффективности вычислительной системы, зачастую не учитывая всех параметров. Под воздушным типом охлаждения будем понимать технологию охлаждения с применением внутрирядных кондиционеров (InRow) во внутреннем контуре и холодильной машиной (чиллером) во внешнем (этилен-гликолевом) контуре системы охлаждения. Энергопотребление инженерного оборудования систем с воздушным и иммерсионным типом охлаждения складывается из энергопотребления компонент, представленных на рис. 4.

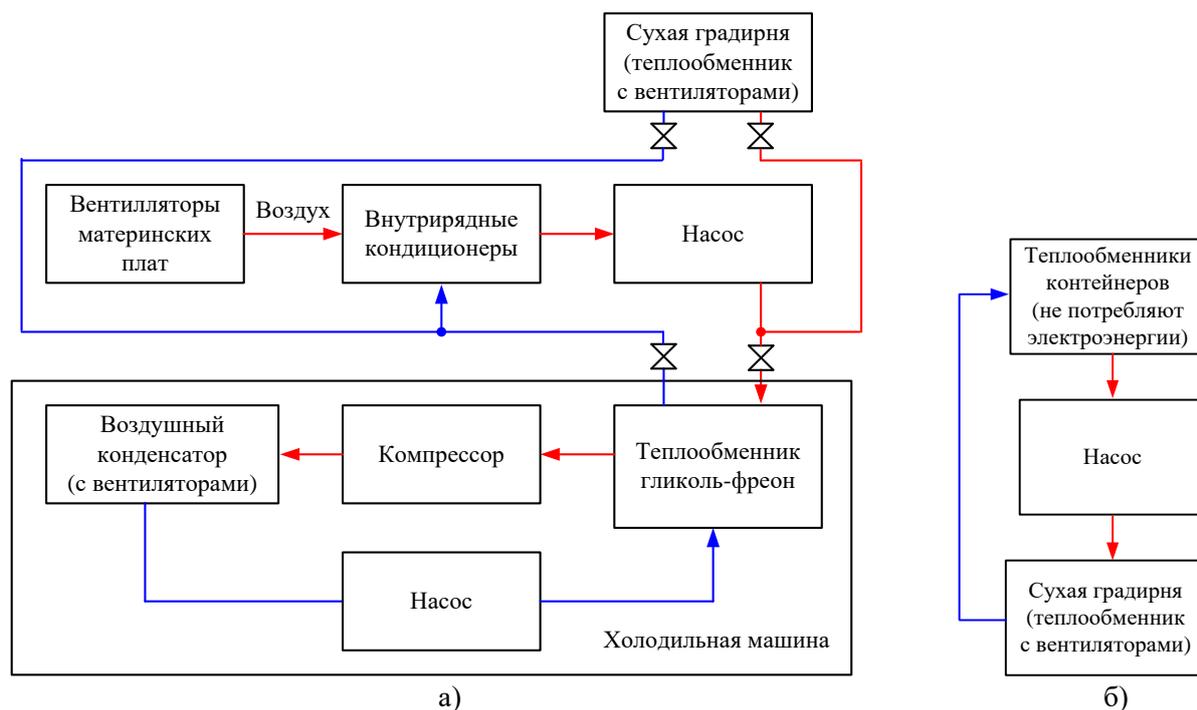


Рис. 4. Компоненты воздушной (а) и иммерсионной (б) систем охлаждения

Из рисунка видно, что для ИСО в режиме фрикулинга (то есть охлаждение без парокомпрессионного цикла до достижения определенной температуры окружающей среды), количество компонент, потребляющих электроэнергию, значительно сокращается. Таким образом, значение  $PUE$  вычислительных систем с ИСО находится в диапазоне 1,037–1,1 [2, 3], тогда как для воздушного охлаждения типичный коэффициент  $PUE$  находится в диапазоне 1,4–1,8 [6]. Подобный эффект достигается также за счет того, что коэффициент теплоотдачи при вы-

нужденной конвекции жидкого хладагента около 30 раз больше чем при вынужденной конвекции воздуха [7].

### 3.2 Ограничения машинного зала

Другой аспект, вызывающий сомнения в пригодности применения ИСО для супер-ЭВМ, состоит в кажущейся на первый взгляд нерациональности использования помещения машинного зала из-за горизонтального расположения стоек.

На рис. 5 представлено сравнение занимаемого пространства машинного зала вычислительным сегментом на 252 юнита (для примера) для воздушной (6 стоек 42U с внутрирядными кондиционерами – InRow) и иммерсионной системы охлаждения (16 предлагаемых контейнеров – в 1 контейнере по 16 серверов 1U).

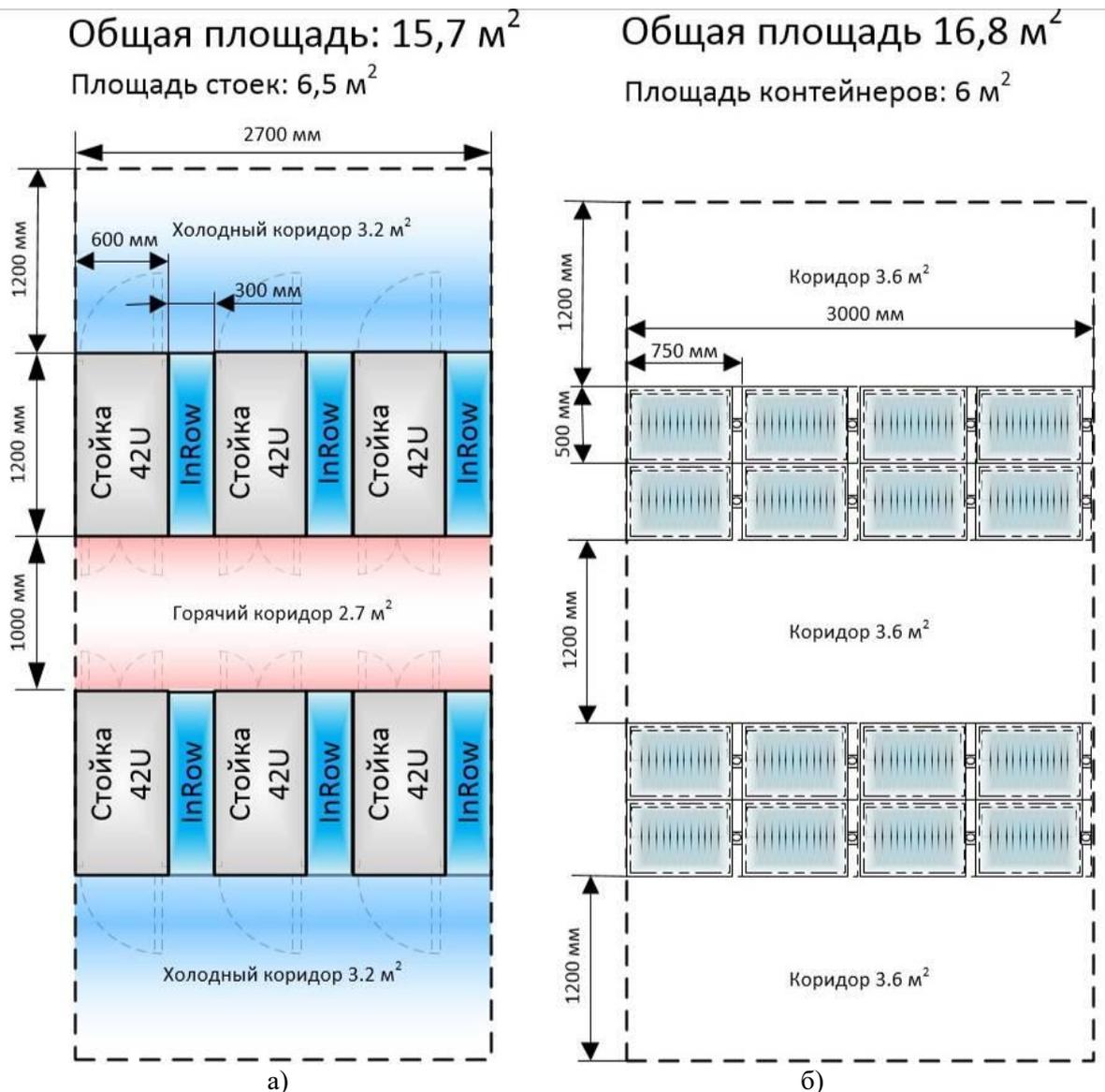


Рис. 5. Занимаемое пространство для воздушной (а) и иммерсионной (б) систем охлаждения

Как видно из рисунка, площадь, занимаемая стойками и контейнерами, примерно одинакова (6,5 м<sup>2</sup> и 6 м<sup>2</sup>), однако ширина холодных коридоров должна быть минимум 1,2 м для горизонтального монтажа вычислительного оборудования в стойке (длина сервера при извлечении из стойки). В случае иммерсионного охлаждения нет необходимости в разделении коридоров. Они необходимы лишь для монтажа и обслуживания вычислительного оборудования.

Далее рассчитаем массу иммерсионной вычислительной системы и сравним с воздушным вариантом для того, чтобы узнать, потребуется ли укрепление перекрытий машинного зала из-за дополнительной массы, приходящейся на один квадратный метр

$$F = \frac{M}{P},$$

где  $M$  – масса вычислительной системы, кг;  
 $P$  – общая площадь, занимаемая стойками.

Масса вычислительной системы (ВС) в общем случае определяется формулой

$$M = M_{СЕРВ} \cdot U + (M_{СТОЙКА} + M_{INROW}) \cdot N,$$

где  $M_{СЕРВ}$  – масса сервера размера 1U, кг;  
 $M_{СТОЙКА}$  – масса стойки (контейнера), кг;  
 $M_{INROW}$  – масса кондиционера InRow (при наличии), кг;  
 $U$  – количество юнитов в ВС, штук;  
 $N$  – количество стоек в ВС, штук.  
 Масса иммерсионной стойки составляет

$$M_{СТОЙКА} = V \cdot \rho + M_{КОРП}$$

где  $V$  – объем жидкости в контейнере;  
 $\rho$  – плотность диэлектрической жидкости;  
 $M_{КОРП}$  – масса корпуса.

Сравним массу масштабируемых вычислительных сегментов на 252 юнита (рисунок 4) для воздушной (6 стоек 42U с кондиционерами InRow) и иммерсионной систем охлаждения (16 контейнеров по 16U). Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1. Расчет массы вычислительной системы

Обозн.	Описание	Воздух	Иммерс.	Ед. изм.
$M_{СЕРВ}$	масса сервера размера 1U, для иммерсионной системы сервер будет модернизирован с целью уменьшения массы (устранены вентиляторы, некоторые элементы корпуса)	21	19	кг
$M_{ОБОРУД}$	масса вычислительного оборудования	5292	4788	кг
$U$	количество серверов 1U в ВС	252		штук
$N$	количество стоек в ВС (42 сервера в воздушной стойке и 16 серверов в иммерсионной стойке)	6	16	штук
$V$	объем жидкости в контейнере (с учетом вытесненной ИТ-оборудованием жидкости)	-	0,21	м <sup>3</sup>
$\rho$	плотность диэлектрической жидкости (в данном расчете жидкость ПМС-5)		918	кг/м <sup>3</sup>
$M_{жс}$	масса жидкости		193	кг
$M_{КОРП}$	масса корпуса контейнера		60	кг
$M_{СТОЙКА}$	масса стойки без оборудования (с жидкостью в иммерсионной системе)	190	253	кг
$M_{INROW}$	масса кондиционера InRow	162	-	кг
	масса одной стойки (с InRow для воздуха и с жидкостью для иммерс.)	1234 (нужно 6 стоек)	552 (нужно 16 стоек)	кг
$M$	искомая масса ВС	<b>7404</b>	<b>8836</b>	кг
$P$	площадь, занимаемая стойками, включая InRow	6,5	6	м <sup>2</sup>
$F$	удельная нагрузка на м <sup>2</sup>	<b>1139</b>	<b>1473</b>	кг/м <sup>2</sup>

Таким образом, удельная нагрузка на квадратный метр фальш-пола (величина  $F$  из таблицы 1) для иммерсионной системы на 23% больше аналогичной величины для воздушного охлаждения. При этом нагрузка на стандартный фальш-пол не превысит допустимого значения даже если контейнер расположить на одной панели фальш-пола, так как панель площадью 0,36 м<sup>2</sup> выдерживает 2000 кг/м<sup>2</sup> [8].

### 3.3 Удобство эксплуатации

Считается, что эксплуатация вычислительной системы с иммерсионным охлаждением более трудоемка, чем с воздушным охлаждением из-за необходимости замены вычислительных модулей при ремонте и обслуживании. Однако в предлагаемом варианте иммерсионного контейнера вычислительное оборудование вынимается и устанавливается на специальное приспособление сверху контейнера так, чтобы диэлектрическая жидкость стекала обратно в контейнер. Преимущество состоит в том, что сервер не нужно транспортировать в «мокром» виде. Замену необходимых модулей можно производить без окончательной сушки оборудования и специальных приспособлений. В отличие от решения Iceotop, не требуется разборка узла, слив из него жидкости, нет требований к герметичности узла.

Известно, что не всё оборудование возможно погрузить в диэлектрическую жидкость, например, обычные жесткие диски из-за негерметичности подвижных частей. Тем не менее, на сегодняшний день существуют герметичные модели жестких дисков большой емкости (6-10 Тбайт), заполненных гелием. Если необходима высокая скорость работы дисковой подсистемы, то возможно применение твердотельных дисков SSD, которые не содержат подвижных частей.

Проведённые авторами эксперименты показали, что волоконно-оптические QSFP-разъемы неработоспособны в диэлектрической жидкости, однако, при организации коммуникационной сети возможно использование медных кабелей вместо оптических в местах погружения. Также оптические разъемы можно использовать после их доработки – герметизации.

## 4. Экономический эффект иммерсионного типа охлаждения

Особое место в споре о целесообразности применения иммерсионных систем занимают оценки коммерческого эффекта такого типа охлаждения. Ниже предложен вариант оценки использования рассмотренной иммерсионной системы для крупной вычислительной системы (ВС), рассчитанной на 40 стандартных телекоммуникационных стоек высотой 42U (итого 1680U). Предположим, что ВС расположена в Московской области.

Также приведено сравнение с традиционным подходом, где во внутреннем контуре системы охлаждения используются внутрирядные кондиционеры, передающие тепло ИТ-оборудования гликолю. Во внешнем – холодильная машина (чиллер – аппарат для охлаждения жидкости), рассеивающая тепло гликоля во внешнюю среду и сухая градирня.

Приведенные значения, оценивающие стоимость, являются комплексным и могут варьироваться в некоторых пределах. Авторы приводят среднее значение, которое им удалось найти. При необходимости расчет может быть повторен при иных исходных данных, например, для другого региона.

При выделении 80% юнитов на вычислительные сервера на базе универсальных процессоров Intel Xeon E5-2680 v4 ей соответствует производительность порядка 2,89 Пфлоп/с ( $0,8 \cdot 1680$  серверов  $\cdot 4$  процессора  $\cdot 14$  ядер  $\cdot 16$  команд за такт  $\cdot 2,4$  ГГц).

Энергопотребление вычислительного оборудования составит порядка 1,4 МВт (в расчете 1 кВт на сервер и 60 кВт на остальное оборудование, например, коммутаторы).

Заметим, что в предыдущих расчетах для соотнесения размеров ВС использовалось одинаковое количество юнитов. Данный параметр удобен тем, что он не зависит от конфигурации стоек, а также форм-факторов и производительности вычислительного оборудования. Поэтому экономический эффект применения той или иной системы охлаждения предлагается оценивать в расчете на один юнит.

Для оценки экономического эффекта введём величину  $S$  (см. пункт 7 расчета), отражающую стоимость охлаждения одного универсального юнита (1U) в течение одного часа (единица измерения – тыс.руб/час), для всего периода эксплуатации вычислительной системы:

$$S = \frac{S_{\text{ПР}} + S_{\text{ВЛ}} \cdot E}{E \cdot U},$$

где  $S_{\text{ПР}}$  – стоимость приобретения ВС, тыс.руб (см. пункт 5 расчета);

$S_{\text{ВЛ}}$  – стоимость владения ВС в течение одного часа, тыс.руб/час (см. пункт 6 расчета);

$E$  – срок эксплуатации, часов;

$U$  – количество юнитов в ВС, штук.

Расчет включает следующие пункты:

1. Количество стоек в вычислительной системе

$$N_{\text{СТОЕК}} = \frac{U}{N_C},$$

где  $U$  – количество юнитов для размещения вычислительного оборудования ВС;

$N_C$  – количество юнитов в одной стойке, штук.

Для воздушной системы охлаждения  $N_{\text{СТОЕК}}=40$  штук является исходным данным. Для иммерсионной системы вместимость одной предлагаемой стойки (контейнера) составляет 16U, тогда  $N_{\text{СТОЕК}}=1680/16=105$  штук.

2. Площадь машинного зала (таблица 2, исходные данные соотносятся с п.3.2 статьи) определяется по формуле

$$P_{\text{МАШЗАЛ}} = P_{\text{СТОЙКА}} \cdot K_{\text{INROW}} \cdot K_{\text{ИНЖ}} \cdot N_{\text{СТОЕК}},$$

где  $P_{\text{СТОЙКА}}$  – площадь, занимаемая одной стойкой, м<sup>2</sup>;

$K_{\text{INROW}}$  – коэффициент увеличения площади инженерным оборудованием (таким как внутренние кондиционеры) на каждую стойку;

$N_{\text{СТОЕК}}$  – количество стоек в ВС, штук;

$K_{\text{ИНЖ}}$  – коэффициент увеличения площади машинного зала за счет организации коридоров.

Таблица 2. Площадь машинного зала

Обозн.	Описание	Воздух	ИСО	Ед. изм.
$P_{\text{СТОЙКА}}$	площадь, занимаемая одной стойкой	0,72	0,375	м <sup>2</sup>
$K_{\text{INROW}}$	коэффициент увеличения площади инженерным оборудованием (например, кондиционеры InRow) на каждую стойку	1,5	1	
$K_{\text{ИНЖ}}$	коэффициент увеличения площади машинного зала за счет организации коридоров	2,5	2,6	
$N_{\text{СТОЕК}}$	количество стоек в ВС	40	105	штук
$P_{\text{МАШЗАЛ}}$	<b>площадь машинного зала</b>	<b>108</b>	<b>102,375</b>	<b>м<sup>2</sup></b>

3. Стоимость постройки машинного зала  $S_{\text{МАШЗАЛ}}$  (таблица 3) зависит от его площади и стоимости постройки квадратного метра. Вопрос оценки стоимости строительства производственных помещений является комплексным и зависит от региона строительства и технологий, применяемых при строительстве. В данном исследовании выбрана одна из доступных технологий – сэндвич-панели. Исследование рынка показало, что средняя цена квадратного метра такого помещения со специальной подготовкой (в виде фальш-пола, фальш-потолка, кабельных каналов и т.д.) в Московской области составляет порядка 40 тыс. рублей.

$$S_{\text{МАШЗАЛ}} = P_{\text{МАШЗАЛ}} \cdot (S_{\text{КВ.М}} + S_{\text{СП}}),$$

где  $P_{\text{МАШЗАЛ}}$  – площадь машинного зала, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{КВ.М}}$  – стоимость постройки квадратного метра помещения, тыс.руб/м<sup>2</sup>;

$S_{\text{СП}}$  – стоимость спец. подготовки квадратного метра помещения, тыс.руб/м<sup>2</sup>;

Таблица 3. Стоимость постройки машинного зала

Обозн.	Описание	Воздух	ИСО	Ед. изм.
$P_{\text{МАШЗАЛ}}$	площадь машинного зала	108	102,375	м <sup>2</sup>
$S_{\text{КВ.М}}$	стоимость постройки одного квадратного метра		30	тыс.руб/м <sup>2</sup>
$S_{\text{СП}}$	стоимость специальной подготовки одного квадратного метра помещения		10	тыс.руб/м <sup>2</sup>
$S_{\text{МАШЗАЛ}}$	<b>стоимость постройки машинного зала</b>	<b>4 320</b>	<b>4 095</b>	<b>тыс.руб</b>

4. Так как инженерное оборудование является импортным, то формула расчета стоимости инженерного оборудования  $S_{\text{ОБОРУД}}$  учитывает изменение курса доллара с помощью соответствующего коэффициента

$$S_{\text{ОБОРУД}} = ((S_{\text{СТОЙКА}} + S_{\text{INROW}}) \cdot N_{\text{СТОЕК}} + S_{\text{КОНД}}) \cdot K_{\text{ДОЛЛАР}},$$

где  $S_{\text{СТОЙКА}}$  – стоимость стойки без вычислительного оборудования, тыс.долл;

$N_{\text{СТОЕК}}$  – количество стоек в ВС, штук;

$S_{\text{КОНД}}$  – стоимость кондиционеров внешнего контура, тыс.долл;

$K_{\text{ДОЛЛАР}}$  – коэффициент, учитывающий курс доллара.

Исходные данные для расчета стоимости и ориентировочные цены оборудования представлены в таблице 4.

**Таблица 4.** Стоимость оборудования

Обозн.	Описание	Воздух	ИСО	Ед. изм.
$S_{\text{СТОЙКА}}$	стоимость стойки без вычислительного оборудования	2,5 тыс.долл	340 тыс.руб	
$S_{\text{INROW}}$	стоимость внутрирядного кондиционера InRow холодопроизводительностью 35 кВт	11	-	тыс.долл
$N_{\text{СТОЕК}}$	количество стоек в ВС	40	105	штук
$S_{\text{КОНД}}$	Стоимость оборудования внешнего контура для отвода минимум 1,4 МВт тепла	600 + 30 (чиллер + драйкулер)	30 (драйкулер)	тыс.долл
$K_{\text{ДОЛЛАР}}$	коэффициент, учитывающий курс доллара	63		-
$S_{\text{ОБОРУД}}$	<b>стоимость оборудования</b>	<b>73 710</b>	<b>35 700</b>	<b>тыс.руб</b>

5. Стоимость приобретения ВС (таблица 5) вычисляется следующим образом

$$S_{\text{ПР}} = S_{\text{МАШЗАЛ}} + S_{\text{ОБОРУД}} + S_{\text{ПНР}},$$

где  $S_{\text{МАШЗАЛ}}$  – стоимость постройки машинного зала, тыс.руб;

$S_{\text{ОБОРУД}}$  – стоимость оборудования, тыс.руб;

$S_{\text{ПНР}}$  – стоимость пуско-наладочных работ, тыс.руб (вдвое большая величина для воздушной системы охлаждения обусловлена высокой стоимостью подключения холодильной машины и внутрирядных кондиционеров).

**Таблица 5.** Стоимость приобретения ВС

Обозн.	Описание	Воздух	ИСО	Ед. изм.
$S_{\text{МАШЗАЛ}}$	стоимость постройки машинного зала	4 320	4 095	тыс.руб
$S_{\text{ОБОРУД}}$	стоимость оборудования	73 710	35 700	тыс.руб
$S_{\text{ПНР}}$	стоимость пуско-наладочных работ	40 000	20 000	тыс.руб
$S_{\text{ПР}}$	<b>стоимость приобретения ВС</b>	<b>118 030</b>	<b>59 795</b>	<b>тыс.руб</b>

6. Стоимость владения ВС в течение одного часа (таблица 6) складывается из стоимости электроэнергии и стоимости трудозатрат обслуживающего персонала

$$S_{\text{ВЛ}} = E_{\text{ВЫЧ}} \cdot PUE \cdot S_{\text{МВт·час}} + S_{\text{ТРУД}},$$

где  $E_{\text{ВЫЧ}}$  – энергопотребление вычислительного оборудования, МВт;

$PUE$  – коэффициент энергоэффективности ВС – помимо технической реализации, зависит от температурного режима региона, в данном расчете принят для Московской области;

$S_{\text{МВт·час}}$  – стоимость МВт·час электроэнергии, тыс.руб;

$S_{\text{ТРУД}}$  – стоимость трудозатрат обслуживающего персонала в час, тыс.руб·час.

**Таблица 6.** Стоимость электроэнергии за час эксплуатации ВС

Обозн.	Описание	Воздух	ИСО	Ед. изм.
$E_{\text{ВЫЧ}}$	энергопотребление вычислительного оборудования	1,4		МВт
$PUE$	коэффициент энергоэффективности	1,6 [6]	1,037 [3]	
$S_{\text{МВт·час}}$	стоимость МВт·ч электроэнергии	1,228		тыс.руб
$S_{\text{ТРУД}}$	стоимость трудозатрат 2 человек обслуживающего персонала в час	1		тыс.руб·час
$S_{\text{ВЛ}}$	<b>стоимость владения ВС в час</b>	<b>3,75</b>	<b>2,783</b>	<b>тыс.руб</b>

7. Подставив в исходную формулу полученные величины, вычислим величину  $S$  (таблица 7), отражающую стоимость охлаждения одного универсального юнита (1U) в течение одного часа (единица измерения – руб·час) с учетом периода эксплуатации ВС 5 лет.

**Таблица 7.** Стоимость охлаждения одного юнита в течение одного часа

Обозн.	Описание	Воздух	ИСО	Ед. изм.
$S_{ПР}$	стоимость приобретения ВС	118 030	59 795	тыс.руб
$S_{ВЛ}$	стоимость владения ВС в час	3,75	2,783	тыс.руб
$U$	количество юнитов в ВС	1680		штук
$E$	срок эксплуатации ВС	5 лет = 43800 ч		
$S$	<b>стоимость охлаждения одного юнита в течение одного часа</b>	<b>3,837</b>	<b>2,469</b>	<b>руб·ч</b>

Таким образом, для ВС с воздушным типом охлаждения стоимость охлаждения одного универсального юнита (1U) в течение одного часа составляет  $S_{ВОЗД}=3,837$  руб/час, тогда как для ИСО  $S_{ПОГРУЖ}=2,469$  руб/час, что на 35% меньше.

Стоимость приобретения инженерной системы машинного зала с иммерсионным типом охлаждения вдвое меньше воздушной, так как для функционирования достаточно сухой градирни вместо внутрирядных кондиционеров, холодильной машины и сухой градирни.

Стоимость владения иммерсионной системой на 25% меньше воздушной за счет высокой энергоэффективности, которая достигается за счет применения фрикулинга и конвективной циркуляции диэлектрической жидкости внутри контейнера.

## 5. Заключение

В результате анализа предполагаемых недостатков ИСО выявлено, что:

- энергоэффективность погружных систем значительно выше по сравнению с традиционным воздушным охлаждением за счет постоянного охлаждения в режиме фрикулинга (требуется только сухая градирня) и отсутствия вентиляторов для охлаждения ИТ-оборудования;
- площадь машинного зала, занимаемая стойками и погружными контейнерами, примерно одинакова и для ИСО может быть уменьшена за счет сокращения ширины коридоров;
- удельная нагрузка на квадратный метр фальш-пола для ИСО на 23% больше аналогичной величины для воздушного охлаждения, однако, это не требует усиления перекрытий за счет значительного запаса прочности элементов стандартного фальш-пола;
- ограничения, связанные с не герметичностью некоторого ИТ-оборудования, преодолимы;
- удобство эксплуатации ИСО несколько ниже по сравнению с воздушным типом охлаждения из-за необходимости удаления диэлектрической жидкости с поверхности вычислительного модуля в случае ремонта или обслуживания.

Также в статье сделана попытка оценки экономического эффекта применения ИСО для крупной супер-ЭВМ вместимостью 40 стоек с вычислительным оборудованием (итого 1680U), расположенной в Московской области.

В результате расчета выявлено, что для ВС с иммерсионной системой охлаждения стоимость охлаждения одного универсального юнита (1U) в течение одного часа на 35% меньше оценки воздушной системы.

Стоимость приобретения инженерной системы машинного зала с иммерсионным типом охлаждения вдвое меньше воздушной, так как для функционирования достаточно сухой градирни вместо внутрирядных кондиционеров и холодильной машины. Стоимость владения иммерсионной системой на четверть меньше воздушной за счет высокой энергоэффективности, которая достигается за счет применения фрикулинга.

Приведенные значения параметров стоимости и энергоэффективности являются комплексными и могут варьироваться в некоторых пределах. В статье авторы привели среднее значение, которое им удалось найти. При необходимости расчет может быть повторен при иных исходных данных, например, для другого региона. Кроме того, в расчет могут быть включены такие неучтенные параметры, как стоимость подключения к коммуникациям (вода, свет и т.п.), стоимость проектирования и стоимость утилизации по истечении срока эксплуатации.

## Литература

1. Степаненко С.А. Эксафлопные супер-ЭВМ. Контуры архитектуры / С.А Степаненко, В.В. Южаков // Программные системы: теория и приложения. 2013. №4. С. 61-90.
2. Система CarnotJet от компании Green Revolution Cooling. URL: <http://aboutdc.ru/page/820.php> (дата обращения 15.05.2016).
3. Immers 880 – Компания Иммерс URL: <http://immers.ru/sys/immers880> (дата обращения 15.05.2016).
4. CeBIT: Iceotore охлаждает серверы полным погружением в жидкость. URL: <http://www.osp.ru/news/articles/2012/10/13013149/> (дата обращения 15.05.2016).
5. Hardcore Computer. URL: <http://www.rochestermagazine.com/hardcore/computer/story-514.html> (дата обращения 15.05.2016).
6. Эффективное управление электроэнергией в дата-центре URL: <http://habrahabr.ru/company/datapro/blog/228109> (дата обращения 15.05.2016).
7. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиэлектронной аппаратуре: учебник для ВУЗов // М:Высшая школа, 1984.
8. Панель из гипса с основанием из листовой стали. URL: [http://abn.ru/catalog/lindner/lindner\\_fl/panel\\_nortec/panel-1.shtml](http://abn.ru/catalog/lindner/lindner_fl/panel_nortec/panel-1.shtml) (дата обращения 15.05.2016).

## Technical aspects and economic benefits of using an immersion cooling system

I.P. Osinin<sup>1</sup>, A.V. Shatohin<sup>1</sup>  
Vyatka State University<sup>1</sup>

Immersion cooling is a variant of cooling at which is the full immersion of electronic components in a dielectric fluid. There have been different opinions on the usefulness of this type of cooling. As a rule, they can be classified into three large groups: energy efficiency, limit the computer room and the convenience of operation. This article analyzes advantages and disadvantages of immersion systems. The article gives an option of the commercial assessment of the effect when it is used for cooling large supercomputers.

*Keywords:* HPC, immersion cooling, PUE.

### References

1. Stepanenko S.A. Jeksaflopnyye super-JeVM. Kontury arhitektury [Exascale computing. The contours of the architecture]. Software Systems: Theory and Applications. 2013. №4. P. 61-90.
2. Sistema CarnotJet ot kompanii Green Revolution Cooling [CarnotJet system from the company Green Revolution Cooling]. URL: <http://aboutdc.ru/page/820.php> (accessed 15.05.2016).
3. Immers 880 – Kompanija Immers [Immers 880 – Company Immers] URL: <http://immers.ru/sys/immers880> (accessed 15.05.2016).
4. CeBIT: Iceotope ohlazhdaet servery polnym pogruzheniem v zhidkost' [CeBIT: Iceotope cools servers complete immersion]. URL: <http://www.osp.ru/news/articles/2012/10/13013149/> (accessed 15.05.2016).
5. Hardcore Computer. URL: <http://www.rochestermagazine.com/hardcore/computer/story-514.html> (accessed 15.05.2016).
6. Jeffektivnoe upravlenie jelektrojenergiej v data-centre [Efficient power management in the data center] URL: <http://habrahabr.ru/company/datapro/blog/228109> (accessed 15.05.2016).
7. Dul'nev G.N. Teplo- i massoobmen v radijelektronnoj apparature: uchebnik dlja VUZov [Heat and mass transfer in electronic equipment: a textbook for high schools] // Moscow: Publishing of the high school, 1984.
8. Panel' iz gipsa s osnovaniem iz listovoj stali [Gypsum with sheet steel base panel]. URL: [http://abn.ru/catalog/lindner/lindner\\_fl/panel\\_nortec/panel-1.shtml](http://abn.ru/catalog/lindner/lindner_fl/panel_nortec/panel-1.shtml) (accessed 15.05.2016).