

УДК 004.3'124

Сравнительный анализ способов охлаждения серверов вычислительных центров и банков данных. Часть 2. Экономическая эффективность систем с жидкостным и воздушным охлаждением

Д-р техн. наук И. А. АРХАРОВ, И. Д. МАХОТИН¹

¹ilyamakh@icloud.com

Московский авиационный институт

В работе рассматриваются перспективы применения диэлектрика в качестве теплоносителя в системах охлаждения серверов, используемых в центрах обработки и хранения данных. Проведено обсуждение двух методов охлаждения серверов. Первый метод — классический воздушный, где поток охлажденного воздуха подводится к серверным шкафам через фальшпол. Второй метод более инновационный. Он подразумевает заполнение каждого сервера диэлектриком, который посредством естественной конвекции циркулирует в сервере и забирает вырабатываемое компонентами тепло. Расчет и сравнение двух описанных выше методик охлаждения проводится по следующим основным параметрам: анализ капитальных затрат и энергоэффективность системы охлаждения. Все рассматриваемые параметры рассматриваются при различной плотности размещения серверов в стойке. В результате проведения сравнительного анализа получены данные о преимуществе жидкостного охлаждения, как в капитальных затратах на строительство, так и в энергоэффективности.

Ключевые слова: охлаждения серверов, центр (хранения и) обработки данных (ЦОД), капитальные затраты, экономическая эффективность.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 16.05.2022, одобрена после рецензирования 01.08.2022, принята к печати 12.08.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-21-28

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Архаров И. А., Махотин И. Д. Сравнительный анализ способов охлаждения серверов вычислительных центров и банков данных. Часть 2. Экономическая эффективность систем с жидкостным и воздушным охлаждением. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 4. С. 21–28. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-21-28

A comparative analysis of ways to cool data center servers and data banks. Part 2. Cost-effectiveness of liquid and air-cooled systems

D. Sc. I. A. ARKHAROV, I. D. MAKHOTIN¹

¹ilyamakh@icloud.com

Moscow Aviation Institute

The paper considers the prospects of using dielectric as a coolant in server cooling systems used in data centers and storage centers. This article discusses two methods of server cooling. The first method is the classic air method, where a stream of cooled air is brought to the server cabinets through the raised floor. The second method is more innovative. It involves filling each server with dielectric, which by means of natural convection circulates in the server and takes away the heat generated by the server components. Calculation and comparison of the two cooling techniques described above is carried out according to the following main parameters: analysis of capital costs and energy efficiency of the cooling system. All parameters in question are considered at various server rack densities. As a result of a comparative analysis, the data on the advantage of liquid cooling, both in terms of capital costs for construction and energy efficiency, is obtained.

Keywords: server cooling, chassis, capital costs, cost-effectiveness.

Article info:

Received 16/05/2022, approved after reviewing 01/08/2022, accepted 12/08/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-21-28

Article in Russian

For citation:

Arkharov I. A., Makhotin I. D. A comparative analysis of ways to cool data center servers and data banks. Part 2. Cost-effectiveness of liquid and air-cooled systems. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 4. p. 21-28. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-21-28

Введение

Скорость роста IT-сектора экономики сегодня носит экспоненциальный характер.

Большие задачи требуют больших вычислительных ресурсов, мощных процессоров, больших хранилищ данных, огромных серверов, которые в ходе работы выделяют тепло.

Известно, что нагрев является серьезной проблемой в области компьютерной и электронной техники. Все электронные компоненты при работе рассеивают большое количество тепла, и, как правило, чем быстрее они обрабатывают информацию, тем больше тепла они выделяют.

Работа при высоких температурах может привести к колебаниям мощности и сбоям, которые являются причиной различных ошибок в компьютерных и электронных системах. Без контролируемого охлаждения целостность данных вычислительной и электронной системы неизбежно будет повреждена.

В данный момент промышленная IT-сфера все чаще сталкивается с проблемой перегрева серверного оборудования при использовании воздушной системы охлаждения. Однако на сегодняшний день существует более эффективная, но менее распространенная альтернатива воздуху — жидкостное охлаждение серверов [1, 2].

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- анализ существующих методов охлаждения серверов;
- анализ и сравнение капитальных затрат на жидкостное и воздушное охлаждение серверов.

- сравнение и расчет экономической эффективности использования серверов с жидкостным охлаждением и серверов с воздушным охлаждением.

Методы и подходы

Решение поставленных задач осуществляется с использованием следующих методов и подходов:

- Метод анализа публикаций, в том числе с использованием сети Интернет и электронных баз данных для анализа и систематизация передового зарубежного опыта и современной отечественной практики развития инновационных предприятий.
- Методика факторного анализа капитальных затрат на закупку необходимого оборудования.
- Метод сравнения аналогов.

Сравнение капитальных затрат при сборке систем охлаждения

В данном разделе будет проведено исследование и сравнение двух систем охлаждения:

- стандартная система с воздушным охлаждением (рис. 1).
- система погружного жидкостного охлаждения (рис. 2).

Будут исследованы разные варианты плотности размещения серверного оборудования в стойке, чтобы показать разницу в цене для жидкостного охлаждения.

Анализ капитальных затрат на закупку систем охлаждения будем проводить на основе центра обработки данных, с вычислительной мощностью 2 МВт.

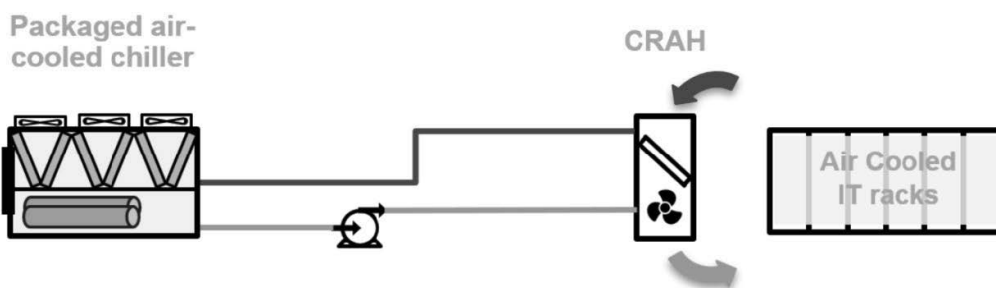


Рис. 1. Система воздушного охлаждения серверов

Fig. 1. Systems of server air cooling

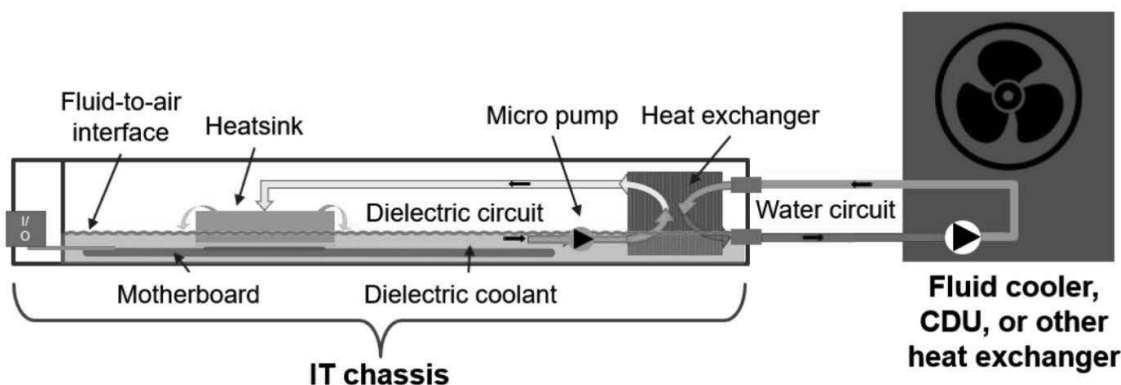


Рис. 2. Устройство системы жидкостного охлаждения

Fig. 2. System of liquid cooling

Исследования затрат на монтаж оборудования не проводятся, так как рассчитываются индивидуально под каждый ЦОД и могут кардинально отличаться в стоимости от объекта к объекту и в зависимости от используемого оборудования. В данном разделе не будет приведена стоимость закупки серверного оборудования, так как под каждую задачу требуется свой сервер, с разными комплектующими под разные задачи. Сравнение будет производиться по тепловыделению одной серверной стойки стандартной мощности.

1. Архитектура систем жидкостного охлаждения

Базовым вариантом для данного анализа капитальных затрат является центр обработки данных с воздушным охлаждением, использующий упакованный чиллер. Эта архитектура включает в себя:

- резервные пакетные чиллеры с воздушным охлаждением;
- резервный пакет насосов.
- дублирующие охлаждающие вентиляционные установки для компьютерных залов (CRAH) для IT-пространства.
- отсутствие фальшпола, необходимого для подвода охлажденного воздуха к серверным стойкам (рис. 3).

Данная архитектура была выбрана в качестве базовой для сравнения, поскольку это экономически эффективная конструкция и очень распространена для средних и крупных центров обработки данных. На рис. 3 приведена стандартная схема установки воздушного охлаждения серверов.

В данной установке CRAH выполняет роль кондиционера, в котором воздух, нагретый серверами, отводится за счет специальной жидкости (фреон/гликоль/подготовленная вода), которая потом насосом перегоняется в чиллер (воздушный теплообменник), где тепло от серверов рассеивается в атмосферу.

2. Архитектура систем жидкостного охлаждения

Для данного анализа выберем систему жидкостного охлаждения, в которой серверы заполняются диэлектриком, поскольку оно подходит для привычной архитектуры стойки центра обработки данных и отводит почти все тепло через жидкость (рис. 2).

IT chassis — это сервер, заполненный диэлектрической жидкостью.

Жидкость циркулирует в сервере при помощи специализированного насоса. Тепло отводится в медном теплообменнике типа жидкость-жидкость при помощи подготовленной воды. Затем вода, которая забрала тепло у диэлектрика отдает это тепло в атмосферу с помощью драйкулера.

Инфраструктура объекта значительно упрощается при использовании иммерсионного охлаждения описанного типа, поскольку IT-оборудование может использоваться для охлаждения теплую воду. Принимаем температуру охлаждающей воды 40 °С в качестве температуры на входе, что позволяет обеспечить 100% естественное охлаждение во многих климатических условиях.

Далее приведен список оборудования, которую учитывается при расчете капитальных затрат и принимает непосредственное участие в процессе охлаждения серверов:

- диэлектрическая жидкость;
- микронасосы;
- трубы;
- теплообменники;
- жидкостные радиаторы;
- герметичные серверные корпуса;
- водяной коллектор стойки.

3. Анализ капитальных затрат

Проанализируем разницу в стоимости центра обработки данных мощностью 2 МВт.

Для корректного сравнения и анализа необходимо привести все характеристики оборудования к общему знаменателю. Традиционно стоимость строительства центра обработки данных определяется как стоимость одного IT-ватт мощности. Например, если центр обработки данных может разместить до 2 МВт IT-нагрузки, и его строительство обошлось в 20 млн \$ США, то его стоимость составляет \$10/Вт. Затраты могут значительно отличаться в зависимости от избыточности оборудования или выбора архитектуры.

При сравнении архитектуры с воздушным охлаждением с архитектурой с жидкостным охлаждением существует проблема при расчете стоимости одного

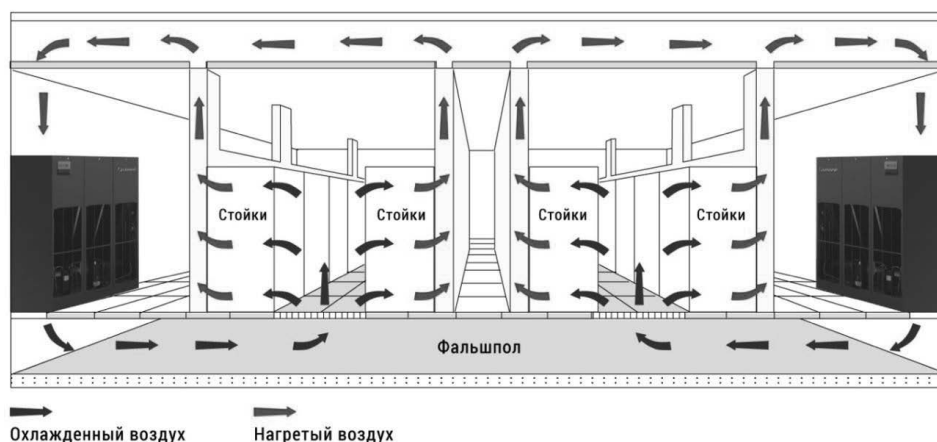


Рис. 3. Организация воздушной системы охлаждения ЦОД

Fig. 3. Air-cooling system for a data processing center

IT-ватта. При одинаковом объеме вычислений, жидкостное охлаждение имеет более низкую общую нагрузку на IT. Внутренние IT-вентиляторы серверов с воздушным охлаждением серверов потребляют больше энергии, чем внутренние микронасосы для систем с жидкостным охлаждением, при одинаковой вычислительной нагрузке. Чтобы компенсировать это, определяем IT-нагрузку как «мощность сервера без охлаждения».

Сравнение капитальных затрат проводится при помощи разницы в стоимости установки основных элементов жидкостного и воздушного охлаждения. Все основные составляющие данных видов охлаждения описаны выше.

Плотность размещения серверов 10 кВт на стойку

В первой итерации рассматривается одинаковая плотность размещения серверов в стойке, как для жидкостного (рис. 5), так и для воздушного охлаждения (рис. 4). Для такой плотности размещения оборудования IT-мощность составить 10 кВт на стойку.

Разница между воздушным и жидкостным охлаждением при одинаковой плотности размещения серверов в стойке незначительна и составляет всего 0,04 \$/Вт (рис. 6).

При переходе от традиционного воздушного охлаждения к жидкостному красным цветом выделены столбы, где жидкостное охлаждение проигрывает. Зеленым цветом выделены параметры, где жидкостное охлаждение является более выгодным.

Проанализируем ключевые пункты:

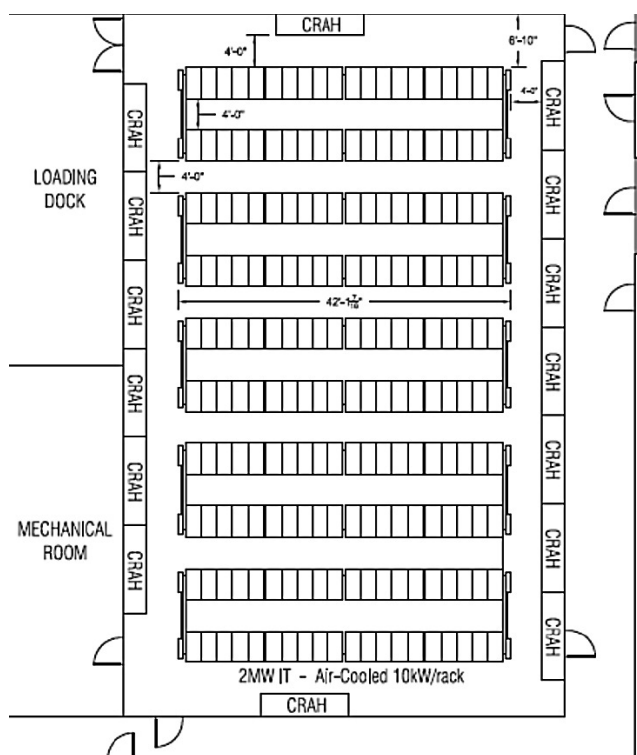


Рис. 4. Плотность размещения серверов с воздушным охлаждением при вычислительной IT-мощности 10 кВт/стойку

Fig. 4. Rack density for the servers with air-cooling and the computation power of 10 kW/rack

— избавление от чиллера и воздушного кондиционера — в данном пункте видно, что избавление от прецизионных кондиционеров в помещении и чиллера на улице позволяет сэкономить 0,91 \$ на 1 Вт IT-мощности;

— добавление жидкостного охлаждения, как уже указывалось в п. 2, включает в себя: диэлектрическую жидкость, микронасосы, трубки, теплообменники, жидкостные радиаторы, герметичные серверные корпуса, водяной коллектор стойки. И затраты на это составляют 0,77 \$/Вт [3];

— добавление драйкулера — это теплообменник, в котором нет холодильной машины, за счет этого он дешевле чиллера, но все равно требует средств на установку и покупку;

— прочие расходы заключаются в экономии полезного пространства за счет избавления от воздушных охладителей в помещении (CRAH), экономии в обеспечении пожарной безопасности, освещения, электрического подключения, воздушных фильтров и т. д.

Из диаграммы на рис. 6 видно, что при одинаковой плотности размещения серверов (10 кВт на стойку), разница в капитальных затратах незначительна. Выигрыш в стоимости жидкостного охлаждения составляет 0,57%.

Плотность размещения серверов 40 кВт на стойку

Одним из многих преимуществ жидкостного охлаждения является возможность делать очень плотное размещение серверов в стойке. В данном разделе будет сравниваться жидкостное охлаждение серверов с плотностью размещения 40 кВт IT-мощности на стойку (рис. 8) и воздушное охлаждение с плотностью разме-

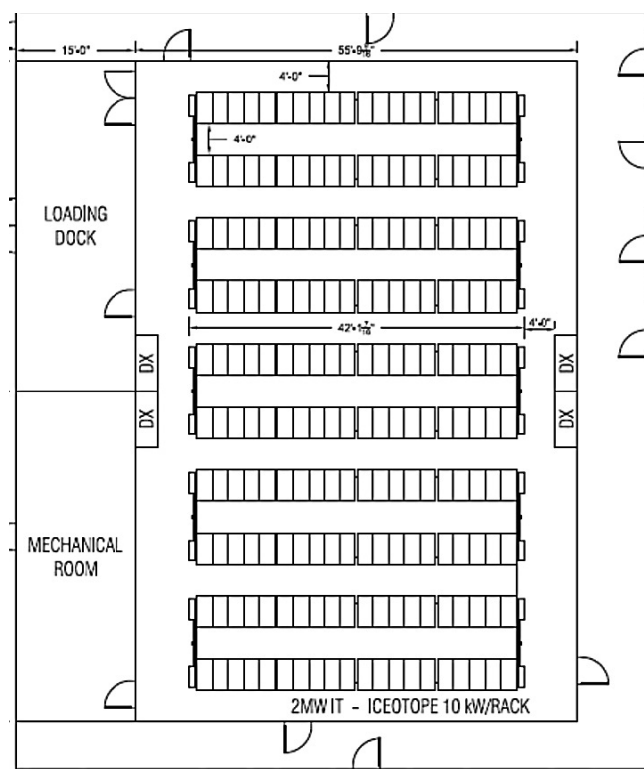


Рис. 5. Плотность размещения серверов с жидкостным охлаждением при вычислительной IT-мощности 10 кВт/стойку

Fig. 5. Rack density for the servers with liquid cooling and the computation power of 10 kW/rack



Рис. 6. Ценовая дельта в капитальных затратах (\$/Вт)

Fig. 6. Price delta for capital costs \$/W

щения 10 кВт на стойку (рис. 7). Воздушное охлаждение не позволяет добиться плотности размещения оборудования более 15 кВт на стойку, за счет меньшей теплоемкости воздуха, и тепловым потерям, которые возникают из-за неравномерности движения воздушного потока [2].

На рис. 9 приведена диаграмма сравнения капитальных затрат, в случае, когда плотность серверов в стойке с жидкостным охлаждением увеличена до 40 кВт на стойку.

По результату анализа данных, представленных на диаграмме, можно заметить, что прочие расходы существенно сокращаются. Это происходит за счет экономии на обеспечении пожарной безопасности, обвязке стоек, значительному уменьшению количества стоек.

В данном случае наблюдается существенная экономия капитальных затрат при использовании жидкостного охлаждения, а именно 16,6%.

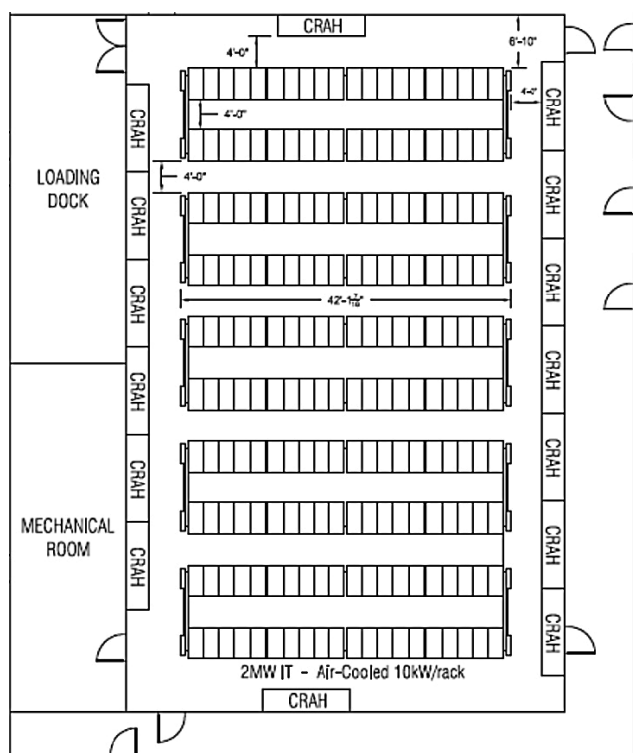


Рис. 7. Плотность размещения серверов с воздушным охлаждением при вычислительной ИТ-мощности 10 кВт/стойку

Fig. 7. Rack density for the servers with air-cooling and the computation power of 10 kW/rack

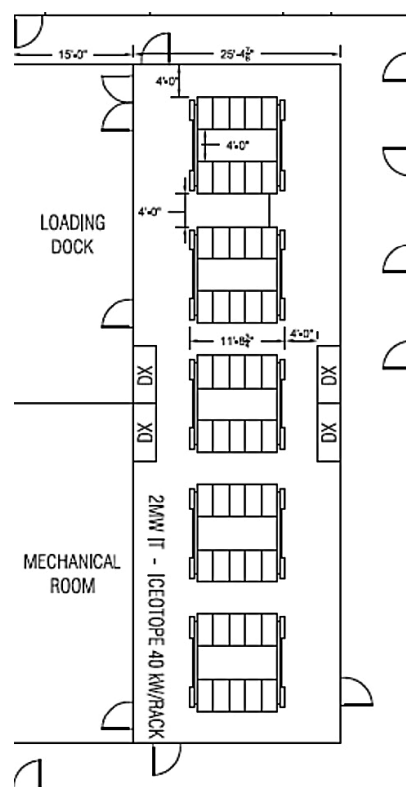


Рис. 8. Плотность размещения серверов с жидкостным охлаждением при вычислительной ИТ-мощности 40 кВт/стойку

Fig. 8. Rack density for the servers with liquid cooling and the computation power of 40 kW/rack

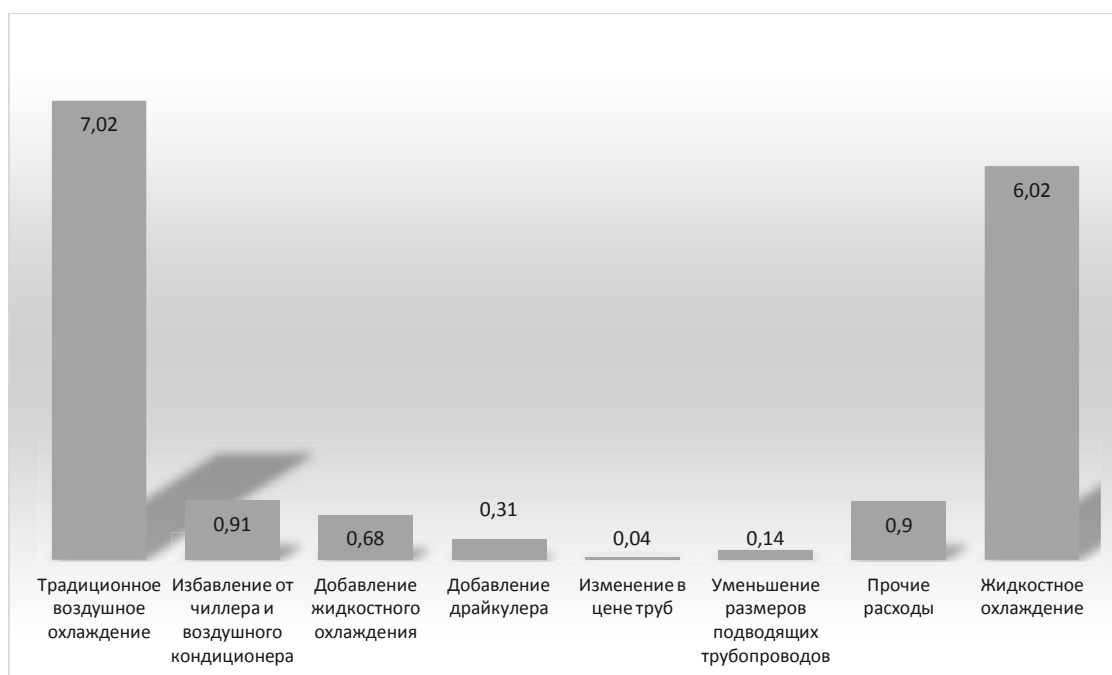


Рис. 9. Ценовая дельта в капитальных затратах \$/Вт

Fig. 9. Price delta for capital costs \$/w

Энергоэффективность работы двух систем охлаждения

Энергопотребление ИТ-оборудования определяется как энергия, потребляемая оборудованием, которое используется для управления, обработки, хранения или маршрутизации данных в рамках вычислительного пространства. То есть энергия, потребляемая ИТ-оборудованием, включает в себя энергию, которая затрачивается как на вычисления и хранение обрабатываемой ЦОДом информации, так и на работу сетевого и дополнительного оборудования (например, мониторов и рабочих станций/ноутбуков, используемых в дата-центре для контроля и управления).

Соответственно, полное энергопотребление ЦОДа — это энергопотребление ИТ-оборудования плюс потребление всего того, что поддерживает его работу, а именно:

- систем электропитания, в том числе ИБП, распределительных устройств, генераторов, батарей; сюда же входят потери при распределении внешнего питания к ИТ-оборудованию;
- компонентов систем охлаждения;
- других нагрузок, например освещения ЦОДа.

Для оценки энергоэффективности ЦОД используется показатель PUE. Он определяется как соотношение полной электрической энергии, потребляемой центром обработки данных, к той энергии, которая расходуется непосредственно ИТ-оборудованием [2].

$$PUE = \frac{\text{Полное энергопотребление}}{\text{Энергопотребление ИТ-оборудования}}$$

При сравнении энергопотребления воздушного и жидкостного охлаждения считаем, что расходы на электропитание, освещение, потери в проводах и пр. являются идентичными. Таким образом разница PUE демонстрирует именно энергоэффективность работы систем охлаждения.

Эффективность воздушного охлаждения

Как видно из рис. 10, на котором приведен график показателя эффективности PUE, современные системы воздушного охлаждения имеют эффективность около 1,5.

Для анализируемого в данной работе ЦОДа мощность ИТ-оборудования составляет 2 МВт ($2 \cdot 10^6$ Вт), следовательно энергопотребление прочих узлов ЦОДа, включая воздушное охлаждение, составляет 3 МВт.

Эффективность жидкостного охлаждения

Как видно из рис. 10, на котором приведен график показателя эффективности PUE, современные системы жидкостного охлаждения имеют эффективность около 1,1.

Для анализируемого в данной работе ЦОДа мощность ИТ-оборудования составляет 2 МВт ($2 \cdot 10^6$ Вт), следовательно энергопотребление прочих узлов ЦОДа, включая воздушное охлаждение, составляет 2,2 МВт.

Выводы

В результате данных, полученных в ходе работы, можно сделать следующие выводы.

1. Для сравнения воздушных и водяных систем охлаждения при одинаковой плотности серверов в стойке (10 кВт/на стойку) занесем полученные данные в сводную табл. 1.
2. Для анализируемого ЦОДа, вычислительной мощностью 2 МВт:
 - экономия капитальных затрат при использовании жидкостной системы охлаждения составит:

$$0,04 \frac{\$}{\text{Вт}} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ Вт} = 80000 \$;$$

— экономия на электроэнергию при использовании жидкостной системы охлаждения серверов за 1 ч работы при пиковой нагрузке на ИТ-оборудование по тарифам Москвы составит:

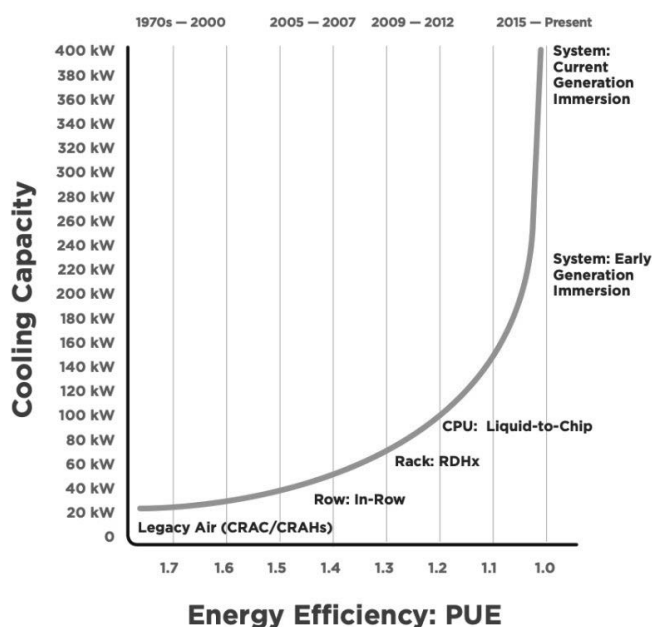


Рис. 10. График показателя PUE

Fig. 10. Variation of PUE value

$$0,8 \text{ МВт} \cdot 3445,56 \frac{\$}{\text{МВт} \cdot \text{ч}} = 2756 \text{ \$}.$$

Стоимость в данном расчете приводится в долларах США, так как все оборудование является импортным и закупочные цены на все компоненты указаны в \$.

3. Для сравнения воздушных и водяных систем охлаждения при различной плотности серверов в стойке (40 кВт/на стойку для жидкостного охлаждения и 10 кВт/на стойку для воздушного), занесем полученные данные в сводную табл. 2.

4. Для анализируемого ЦОДа, вычислительной мощностью 2 МВт:

— экономия капитальных затрат при использовании жидкостной системы охлаждения составит:

$$1 \frac{\$}{\text{Вт}} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ Вт} = 2 \text{ млн \$};$$

— экономия на электроэнергию при использовании жидкостной системы охлаждения серверов за 1 ч работы при пиковой нагрузке на ИТ-оборудование по тарифам Москвы составит:

$$0,8 \text{ МВт} \cdot 3445,56 \frac{\$}{\text{МВт} \cdot \text{ч}} = 2756 \text{ \$}.$$

Данные по эффективности энергопотребления систем жидкостного охлаждения в данном случае не изменяются, так как система работает по идентичному принципу.

На основании полученных расчетов можно с уверенностью сказать, что установка жидкостного охлаждения является более энергоэффективным и менее затратным, с точки зрения капитальных затрат. При проектировании ЦОД предпочтительней остановиться на жидкостной системе охлаждения и добиваться максимально возможной плотности размещения серверов в стойке.

Таблица 1

Сводная таблица для 10 кВт на стойку

Table 1

Summary table for 10kW per rack

	Воздушное охлаждение серверов	Жидкостное охлаждение серверов	Разница, абс.	Разница, отн.
Капитальные затраты, \$/Вт	7,02	6,98	0,04	0,56980057
Энергоэффективность, МВт	3	2,2	0,8	26,6666667

Таблица 2

Сводная таблица разной плотности серверов на стойку

Table 2

Summary table for various server density per rack

	Воздушное охлаждение серверов	Жидкостное охлаждение серверов	Разница, абс.	Разница, отн.
Капитальные затраты, \$/Вт	7,02	6,02	1	14,2450142
Энергоэффективность, МВт	3	2,2	0,8	26,6666667

Заключение

В результате выполнения работы был выполнен анализ существующих методик охлаждения серверов, проведен анализ капитальных затрат на строительство ЦОД с системой жидкостного охлаждения при различной плотности размещения серверного оборудования в стойке и аналогичной системы воздушного охлаждения. Анализ проводился методом факторного анализа капитальных затрат. Также был проведен экономический расчет эффективности использования двух видов охлаждения. Основным критерием для анализа выступал коэффициент эффективности использования электроэнергии при работе серверного оборудования. На основании полученных результатов было проведено сравнение жидкостного и воздушного охлаждения серверов, с точки зрения капитальных затрат и энергоэффективности систем. Сопоставление было проведено методом сравнения аналогов. В результате сравнения жидкостное охлаждение доказало свои преимущества, как с точки зрения капитальных затрат на строительство, так и с точки зрения энергоэффективности. Все преимущества достигаются за счет более плотного размещения серверных шкафов и более эффективной системе отвода тепла от нагруженных узлов сервера.

Литература

1. Седанов А. А., Белоус И. А. Формы Представления инвестиционного проекта: технико-экономическое обоснование и бизнес-план. В сборнике: Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки Материалы международной научно-практической конференции: электронный ресурс. 2014 С. 154–157.
2. Абрамов С. М., Чичковский А. А. Серверная ферма с иммерсионной системой охлаждения. Патент RU 2 500 012 C1. Заявлено: 2012127345/08, 02.07.2012, опубликовано 27.11.2013.
3. Корнев Г. Н., Калинина О. О. Факторный анализ капитальных вложений // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложения. 2013. 4 (36). С. 58–64.
4. Кирвель И. И., Бражников М. М., Зацепин Е. Н. Энергосбережение в процессах теплообмена. Мн.: БГУИР, 2007.
5. Гиляровская Л. Т., Endovitskaya A. V. Анализ и оценка финансовой устойчивости коммерческих организаций: учебное пособие. М.: Юнити-Дана, 2012. 159 с.
6. Кирпичев М. В., Михеев М. А., Эйгенсон Л. С. Теплопередача. 1949.
7. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (Fifth Edition), 2019.
8. Rajendra Karwa. Heat and Mass Transfer. 2017.
9. Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn. Principles of heat transfer (Seventh Edition), 2011.
10. Harlan H. Bengtson. Convection Heat Transfer Coefficient Estimation. 2010.
11. Eckert E. R. G. and Drake R. M. Analysis of Heat and Mass Transfer. // Aiche. 1972. Vol. 18 (3), p. 806.
12. Touloukian Y. S. Theoretical Properties of Matter. Vols. 1–6, 10, and 11. Purdue University, West Lafayette, IN, 1970 to 1975.
13. C. Y. Ho, R. W. Powell, P. E. Liley. Thermal conductivity of the elements: A comprehensive review. // J. Phys. Chem. Ref. 3, 1974.
14. Kadoya K., Matsunaga N., Nagashima A. Viscosity and thermal conductivity of dry air in the gaseous phase. // J. Phys. Chem. Ref. Data, 14 (4):947–970, 1985.
15. Adrian Bejan. Convection Heat Transfer (Fourth Edition), 2013.

Сведения об авторах

Архаров Иван Алексеевич

Д. т. н., профессор кафедры Э4 — Холодильная криогенная техника, системы жизнеобеспечения МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, ivanarkharov@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-1624-171X

Махотин Илья Дмитриевич

Аспирант кафедры ТКМКиМ — Технология композиционных материалов конструкций и микросхем, МАИ, 121552, Россия, Москва, Оршанская ул., 3, ilyamakh@icloud.com, ORCID: 0000-0002-7716-6741

References

1. Sedanov A. A., Belous I. A. Forms of Presentation of an Investment Project: Feasibility Study and Business Plan. In the collection: Development of road and transport and construction complexes and the development of strategically important territories of Siberia and the Arctic: contribution of science Proceedings of the International scientific and practical conference: electronic resource. 2014 p. 154–157. (in Russian)
2. Abramov S. M., Chichkovsky A. A. Server farm with immersion cooling system. Patent RU 2 500 012 C1. Announced: 2012127345/08, 02.07.2012, published on 27.11.2013. (in Russian)
3. Kornev G. N., Kalinina O. O. Factor Analysis of Capital Investments. *Modern Science-Intensive Technologies. Regional application*, 2013, Vol. 4, No. 36, P. 58–64. (in Russian)
4. Kirvel I. I., Brazhnikov M. M., Zatsepin E. N. Energy savings in heat change processes, Minsk, 2007. (in Russian)
5. Gilyarovskaya L. T., Endovitskaya A. V. Analysis and evaluation of financial stability of commercial organizations: a textbook. Moscow: Unity-Dana, 2012. 159 p. (in Russian)
6. Kirpichev M. V., Mikheev M. A., Eigenson L. S. Heat Transfer, 1949. (in Russian)
7. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (Fifth Edition), 2019.
8. Rajendra Karwa. Heat and Mass Transfer. 2017.
9. Frank Kreith, Raj M. Manglik, Mark S. Bohn, Principles of heat transfer (Seventh Edition), 2011.
10. Harlan H. Bengtson, Convection Heat Transfer Coefficient Estimation, 2010.
11. E. R. G. Eckert and R. M. Drake, Jr. Analysis of Heat and Mass Transfer. *Aiche*. 1972. Vol. 18 (3), p. 806.
12. Touloukian Y. S. Theoretical Properties of Matter. Vol. 1–6, 10, and 11. Purdue University, West Lafayette, IN, 1970 to 1975.
13. C. Y. Ho, R. W. Powell, P. E. Liley. Thermal conductivity of the elements: A comprehensive review. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 3, 1974.
14. Kadoya K., Matsunaga N., A. Nagashima. Viscosity and thermal conductivity of dry air in the gaseous phase. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 14 (4):947–970, 1985.
15. Adrian Bejan. Convection Heat Transfer (Fourth Edition), 2013.

Information about authors

Arkharov Ivan A.

D. Sc., Professor of Department E4 — Cryogenic Refrigeration, Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya St., 5, bld. 1, Moscow, 105005, Russia, ivanarkharov@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-1624-171X

Makhotin Ilya D.

Postgraduate student of the Department of TKMKiM — Technology of composite materials of structures and microcircuits, MAI, 121552, Russia, Moscow, Orshanskaya str. 3, ilyamakh@icloud.com, ORCID: 0000-0002-7716-6741



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»