

УДК 004.3'124

# Сравнительный анализ способов охлаждения серверов вычислительных центров и банков данных.

## Часть 1. Схемотехнические решения и их особенности

Д-р техн. наук И. А. АРХАРОВ, И. Д. МАХОТИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ilyamakh@icloud.com

МГТУ им Н. Э. Баумана

*В работе рассматриваются перспективы применения диэлектрика в качестве теплоносителя в системах охлаждения серверов, используемых в центрах обработки и хранения данных. Скорость роста ИТ-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. В процессе работы все компоненты сервера выделяют тепло. Работа при высоких температурах может привести к сбоям в работе, потерям мощности и поломкам в электронных системах. В настоящее время промышленная ИТ-сфера все чаще сталкивается с проблемой перегрева серверного оборудования при использовании воздушных систем охлаждения. Однако, на сегодняшний день существует более эффективная и экономичная альтернатива воздушным системам теплоотвода — жидкостное охлаждение. В статье рассчитывается мощность теплового потока для двух актуальных в настоящее время методов отвода тепла от электронных компонентов: воздушного и жидкостного. Расчеты производятся на основании критериальных уравнений конвективного теплообмена для различных случаев теплоотдачи. Исходные данные по скорости потока, размерам теплоотводящей пластины, температуре потока и охлаждаемой поверхности взяты одинаковые для воздушной и жидкостной среды. Рассматриваются случаи обтекания текущей средой горизонтально расположенного процессора вынужденными ламинарными потоками жидкости и воздуха. Любой процессор является сложным многокомпонентным устройством, поэтому для уточнения расчета рассматривается теплоотвод от теплораспределяющей крышки процессора. На основании полученных результатов проведено сравнение двух приведенных методик теплоотвода и сформулирован вывод о перспективах жидкостного охлаждения.*

**Ключевые слова:** охлаждения серверов, ЦОД, теплотехнический расчет, критерии подобия, мощность теплового потока обмен в каналах.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 06.05.2022, одобрена после рецензирования 01.08.2022, принята к печати 12.08.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-21-26

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Архаров И. А., Махотин И. Д. Сравнительный анализ способов охлаждения серверов вычислительных центров и банков данных. Часть 1. Схемотехнические решения и их особенности. // Вестник Международной академии холода. 2022. № 3. С. 21–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-21-26

# Comparative analysis of cooling methods for data center servers and data banks. Part 1. Circuit designs and features

D. Sc. I. A. ARKHAROV, I. D. MAKHOTIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ilyamakh@icloud.com

Bauman Moscow State Technical University

*The paper considers the prospects of using dielectric as a coolant in server cooling systems used in data centers and storage centers. The growth rate of the IT sector of the economy today is exponential. Large tasks require large computing resources, powerful processors, large data storages, and huge emitting heat during operation. All electronic components dissipate large amounts of heat as they operate. Operating at high temperatures can lead to malfunctions, loss of power, and breakdowns in electronic systems. Currently, the industrial IT-sphere is increasingly faced with the problem of the server equipment overheating by using air-cooling systems. However, today liquid-cooling is considered to be a more effective and economical alternative to the air heat removal systems. The article calculates the power of heat flow for the two currently relevant methods of heat removal from electronic components: air and liquid-cooling. Calculations are made on the basis of the criterial equations of convective heat transfer for different heat transfer cases. Initial data on flow velocity, size of heat dissipating plate, flow temperature, and cooled surface are the same for air and liquid medium. The cases of fluid flow*

around a horizontally placed processor by forced laminar liquid and air flows are considered. Any processor is a complex multi-component device, therefore, the heat dissipation from the heat dissipating cover of the processor is considered to clarify the calculation. Based on the results obtained, a comparison of the two methods of heat dissipation is made and a conclusion about the prospects for liquid-cooling is formulated.

**Keywords:** server cooling, CPU, thermal calculation, similarity criteria, heat flow power exchange in the channels.

### Article info:

Received 06/05/2022, approved after reviewing 01/08/2022, accepted 12/08/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-21-26

Article in Russian

### For citation:

Arkharov I. A., Makhotin I. D. Comparative analysis of cooling methods for data center servers and data banks.

Part 1. Circuit designs and features. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 3. p. 21–26.

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-21-26

## Введение

Скорость роста ИТ-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 [1].

В процессе работы все компоненты вычислительной машины выделяют тепло. Чем выше нагрузка на устройство, тем больше тепла оно выделяет. Слишком высокая температура может привести к непостоянству мощности и поломкам, которые недопустимы в крупных ИТ компаниях [2].

В данный момент промышленная ИТ-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 [3]–[5].

В данной работе будет рассмотрено два принципиально разных подхода к отводу тепла от работающего сервера.

Первый подход стандартный с использованием направленного воздушного потока. С подачей воздуха через фальшпол и использованием системы вытяжной вентиляции (рис. 1).

При данном методе охлаждения холодный воздух подводится к серверным стойкам через фальшпол и существует дополнительная вытяжка горячего воздуха.

Второй подход более инновационный. В нем для отвода тепла от сервера используется жидкость. В качестве рабочего вещества в таких системах используется непроводящая жидкость (диэлектрик). В основном диэлектрик состоит из минерального масла, благодаря которому его теплоемкость в разы больше, чем у воздуха при одинаковых объемах. Пример такой системы приведен на рис. 2.

## Цели и задачи исследования

Целью проводимого исследования является осуществление теплотехнического расчета, с последующим анализом эффективности работы системы жидкостного охлаждения (СЖО).

Для достижения результатов, в задаче решаются следующие основные задачи:

- исследование актуальных методов охлаждения серверов;
- анализ и сравнение мощности теплового потока при охлаждении серверов жидкостью и газом;
- заключение об эффективности жидкостного метода охлаждения.

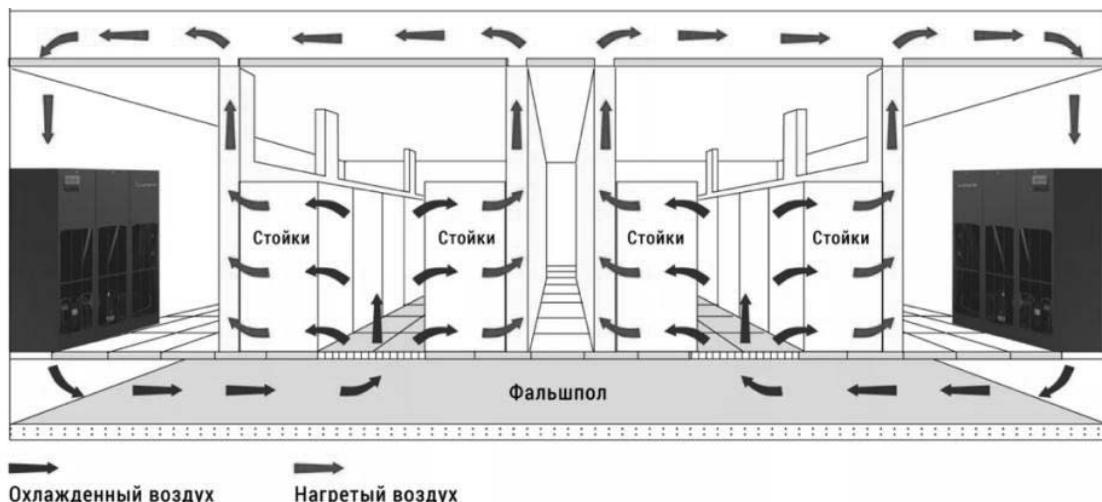


Рис. 1. Подача холодного воздуха через фальшпол и вытяжка

Fig. 1. Cold air input through the raised floor and air exhaust

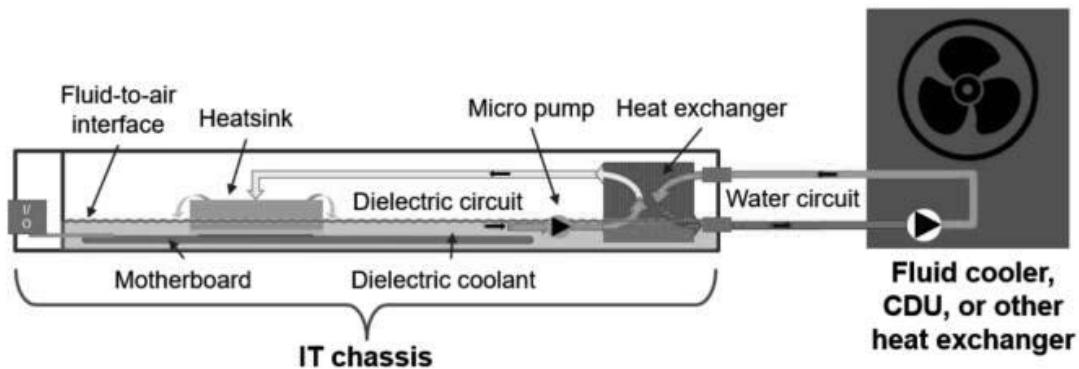


Рис. 2. Устройство системы жидкостного охлаждения

Fig. 2. Liquid-cooling system

### Сравнение теплофизической эффективности жидкостного и воздушного охлаждения

Для сравнения теплофизической эффективности двух приведенных выше методов теплоотвода была выбрана следующая модель: поток жидкости и газа обтекает плоское горизонтальное тело.

Анализ мощности теплового потока будет проводиться при обтекании текучей средой процессора. Считаем, что течение среды происходит в неограниченном пространстве. Для равнозначности расчета параметры воздушной и жидкостной среды, такие как — скорость потока и температура текучей среды — взяты одинаковые.

Для решения поставленных целей необходимо решить задачу конвективного теплообмена в однофазных текучих средах (жидкость и газ).

Конвективный теплообмен происходит вместе с процессом теплопроводности, из-за пограничного слоя на границе между охлаждаемым твердым телом и текущей средой.

Следовательно, тепловой поток при таком виде теплообмена рассчитывается по формуле (1) [6, 7].

$$\bar{q}_{\text{кто}} = \bar{q}_{\text{конв}} + \bar{q}_{\text{конд}} = \rho_w \bar{v} + -\lambda_f \nabla T, \quad (1)$$

где  $\bar{q}_{\text{кто}}$  — плотность теплового потока при конвективном теплообмене, Вт/м<sup>2</sup>;  $\nabla T$  — градиент температурного поля флюида, К/м;  $\bar{q}_{\text{конв}}$  — плотность теплового потока за счет конвекции текучей среды, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_f$  — коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);  $\bar{q}_{\text{конд}}$  — плотность теплового потока при кондуктивном теплообмене в текучей среде, Вт/м<sup>2</sup>;  $h = c_p T$  — удельная энталпия флюида, Дж/кг;  $\rho$  — плотность флюида, кг/м<sup>3</sup>;  $\bar{v}$  — скорость движения жидкости, м/с;  $c_p$  — удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $T$  — температура, °C или K.

Формула, приведенная выше говорит о необходимости рассматривать температурное поле флюида и учитывать скорость движения флюида.

В решаемой задаче в обоих случаях тепло от сервера отводится при помощи вынужденной конвекции. То есть движение среды вызвано разницей давления в потоке, за счет транспортирующего устройства, например насоса или вентилятора.

Для решения подобных задач инженеры сегодня используют информационную базу лабораторных и промышленных экспериментов и теорию подобия физиче-

ских процессов, методологической базой которых служит система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена.

В расчетах мощности теплового потока необходимо воспользоваться формулой (2) [8].

$$Q = \alpha \nabla T F, \quad (2)$$

где  $T_f$  — температура текучей среды, °C;  $\Delta T = |T_w - T_f|$  — модуль разности температур между стенкой и флюидом, °C;  $T_w$  — температура поверхности теплообмена (процессор), °C;  $Q$  — тепловой поток, Вт;  $F$  — площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

В итоге, задача сводится к определению коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , так как геометрические размеры и разность температур заданы. В сложной системе коэффициент теплоотдачи зависит от множества переменных, следовательно чтобы его получить необходимо провести бесконечное множество экспериментов. Теория подобия процессов конвективного теплообмена позволяет снизить число независимых параметров в коэффициенте  $\alpha$ . Данная теория использует критерии подобия. Это безразмерные комплексы, характеризующие отношения физических параметров [9].

В данной работе воспользуемся критериальными уравнениями подобия конвективной теплоотдачи для решения конкретной задачи, а именно теплоотдачи пластины при ламинарном течении.

Для расчета мощности теплового потока по критериальным уравнениям подобия необходимо выполнить следующие операции [10].

1. Определить вид конвективного теплообмена и объект, в котором рассчитывают конвективную теплоотдачу.

2. Определить режим течения среды. Для вынужденного движения среды определяем режим по числу Рейнольдса ( $Re$ ).

3. Рассчитать определяющие параметры, такие как определяющий размер, определяющую температуру, определяющую скорость (при вынужденной конвекции). При помощи справочной литературы определить формулы критериального расчета для заданного вида конвективного теплообмена.

4. Расчет безразмерного коэффициента теплоотдачи — числа Нуссельта ( $Nu$ ).

5. Расчет значения коэффициента  $\alpha$ .

6. Расчет мощности теплового потока, согласно закону Ньютона–Рихмана.

### Анализ теплофизической эффективности воздушного охлаждения

В данной задаче происходит теплоотдача. Это вид конвективного теплообмена между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела.

Режим течения среды:

- в сервере, принятом для расчета, используется вентилятор диаметром 120 мм;
- максимальный объемный расход вентилятора:  $Q=110 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- площадь сечения вентилятора:  $S=0,045 \text{ м}^2$ ;
- скорость потока воздуха:  $\omega=Q/3600S=0,679 \text{ м}/\text{с}$ ;
- длина поверхности теплообмена  $L=25 \text{ мм}=0,025 \text{ м}$ ;
- динамическая вязкость воздуха при температуре 20 °C:  $\mu=1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;
- плотность воздуха при 20 °C:  $\rho=1,204 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

$$\text{Re} = \frac{\rho \omega L}{\mu} = \frac{1,204 \cdot 0,679 \cdot 0,025}{1,85 \cdot 10^{-5}} = 1,005 \cdot 10^3, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность теплоносителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\omega$  — скорость воздушного потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $L$  — размер поверхности,  $\text{мм}$ ;  $\mu$  — динамическая вязкость,  $10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Число Рейнольдса  $\text{Re}$  рассчитывается по формуле (3) и характеризует переход течения от ламинарного к турбулентному. Экспериментально установлено, что ламинарный режим течения в пограничном слое существует при числах Рейнольдса  $\text{Re} < 10^4$ , турбулентный режим при  $\text{Re} > 10^6$ , а переходный от ламинарного к турбулентному режим при  $\text{Re}=10^4 \div 10^6$  [11, 12].

В данном расчете  $\text{Re} < 10000$ , следовательно, течение является ламинарным.

Определяющие параметры расчета

1. Скорость воздушного потока вдоль горизонтальной поверхности.

В сервере, принятом для расчета, используется вентилятор диаметром 120 мм.

Максимальный объемный расход вентилятора  $V=110 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Площадь сечения вентилятора  $S=0,045 \text{ м}^2$ .

Скорость потока воздуха  $\omega=V/3600S=0,679 \text{ м}/\text{с}$ .

2. Температура охлаждающего воздуха сервера  $t_b=20^\circ\text{C}$ .

3. Температура поверхности процессора  $t_n=60^\circ\text{C}$ .

4. Степень черноты поверхности  $\varepsilon=0,78$ .

5. Длина теплораспределющей пластины  $L=0,025 \text{ м}$

Любой процессор является многокомпонентной системой, состоящей из кремниевой пластины, транзисторов, текстолитовой платы и металлической теплораспределительной крышки.

Для данной задачи будем считать, что процесс теплообмена происходит исключительно с тепло распределительной пластиной, изготовленной из меди.

В рассматриваемой задаче происходит теплоотдача при внешнем обтекании тел газом или жидкостью. Поток ламинарный. Решение задачи расчета коэффициента теплоотдачи выполняется по формуле 4 [13]:

$$\text{Nu} = 0,67 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2}, \quad (4)$$

где  $\text{Nu}$  — это определяемый коэффициент Нуссельта, характеризующий отношение плотности теплового потока конвективной теплоотдачи к плотности кондуктивного теплового потока в слое текучей среды вблизи стенки;  $\text{Pr}$  — физический параметр среды Прандтля.

Если  $\text{Pr} < 1$ , то среда является жидким металлом, если  $\text{Pr}=1$ , то это газ. В случае, когда  $\text{Pr} > 1$ , перед нами текучая среда.

Для определения критерия Прандтля необходимо получить критерий Пекле, по формуле (5).

$$\text{Pe} = \frac{c_p \rho \omega L}{\lambda} = 712,295, \quad (5)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость среды,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho$  — плотность теплоносителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\omega$  — скорость потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $L$  — размер поверхности,  $\text{м}$ ;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Исходя из полученных данных, определяется критерии Прандтля и Нуссельта по формулам (6)–(7), соответственно.

$$\text{Pr} = \frac{\text{Pe}}{\text{Re}} = 0,709. \quad (6)$$

$$\text{Nu} = 0,67 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2} = 18,958. \quad (7)$$

Тогда коэффициент теплоотдачи вычисляется по формуле (8).

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{L} = 20,528. \quad (8)$$

Далее, согласно формуле Ньютона — Рихмана определяем мощность теплового потока при обтекании теплоотводящей пластины процессора потоком воздуха.

$$Q = \alpha \Delta T \cdot F = 0,513 \text{ Вт}. \quad (9)$$

Итого при обтекании теплоотводящей пластины процессора потоков воздуха, температурой 20 °C, мощность теплового потока составит 0,513 Вт.

### Анализ теплофизической эффективности жидкостного охлаждения

Для корректного сравнения мощности теплообмена значения скорости жидкостного потока принимаются равными скорости воздушного потока [14].

Скорость потока воздуха  $\omega=V/3600S=0,679 \text{ м}/\text{с}$ .

Температура охлаждающего потока диэлектрика  $t_b=20^\circ\text{C}$ .

Температура поверхности процессора  $t_n=60^\circ\text{C}$ .

Длина теплораспределющей пластины  $L=0,025 \text{ м}$ .

Для расчета используется диэлектрики типа ТермоЛан Е. Это высоко экологичные органические теплоносители-диэлектрики на основе насыщенных углеводородов с рабочим интервалом температур от 0 °C до 300 °C для охлаждения серверов, систем хранения данных, майнинг-ферм с погружением электронного оборудования в диэлектрический теплоноситель.

Свойства диэлектрика, необходимые для расчета:

- удельная теплоемкость  $c_p=2184 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- плотность  $\rho=833 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- динамическая вязкость  $\mu=0,02649 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;
- коэффициент теплопроводности  $\lambda=0,142 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{с})$ ;

Как и в случае с обтеканием теплоотводящей пластины процессора воздухом, расчет начинается с определения критерия Рейнольдса по формуле (10).

$$Re = \frac{\rho \omega L}{\mu} = \frac{833 \cdot 0,679 \cdot 0,025}{0,02649} = 533,793, \quad (10)$$

где  $\rho$  — плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  — скорость воздушного потока, м/с;  $L$  — размер поверхности, мм;  $\mu$  — динамическая вязкость, 10<sup>-5</sup> Па·с.

В данном расчете  $Re < 10000$ , следовательно, течение является ламинарным [15].

Затем определяется критерий Пекле по формуле (11).

$$Pe = \frac{c_p \rho \omega L}{\lambda} = 2,175 \cdot 10^5. \quad (11)$$

Исходя из полученных данных, определяется критерий Прандтля по формуле (12).

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = 407,424. \quad (12)$$

Для определения критерия Нуссельта необходимо воспользоваться формулой (13).

$$Nu = 0,67 Pe^{1/3} Re^{1/2} = 112,48. \quad (13)$$

Тогда коэффициент теплоотдачи вычисляется по формуле (14).

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} = 638,888. \quad (14)$$

Далее, согласно формуле Ньютона–Рихмана определяем мощность теплового потока при обтекании теплоотводящей пластины процессора потоком воздуха по формуле (16).

$$Q = \alpha |T_{\text{тела}} - T_{\text{поверхности}}| F = 15,97 \text{ Вт}. \quad (16)$$

Итого при обтекании теплоотводящей пластины процессора потоком воздуха, температурой 20 °C, мощность теплового потока составит 15,79 Вт.

### Сравнение теплофизических свойств

Для сравнения эффективности двух описанных выше методов теплообмена была рассчитана мощность теплового потока по формуле Ньютона–Рихмана (2) для стационарного процесса теплообмена при неизменных температуре среды и площади поверхности тела для двух случаев.

### Литература

1. Jie Li, Liang Guo, Bin Lan, Lina Xie. Liquid cooling revolution. // The People's Posts and Telecommunications Press. 2019. 08:110–116.
2. Lina Xie, Liang Guo. Discussion on liquid cooling technology and its development. // Information Communication Technology and Policy. 2019. 02:22–25.
3. Andreu Carbó, Eduard Oró, Jaume Salom, et al. Experimental and numerical analysis for potential heat reuse in liquid cooled data centres. // Energy Conversion and Management. 2016. 112:135–145.
4. Pin Chen, Souad Harmand, Safouene Ouenzerfi. Immersion cooling effect of dielectric liquid and self-rewetting fluid

Тепловой поток, полученный при вынужденном конвективном теплообмене металлической пластины в ламинарном потоке газа (воздуха) и ламинарном потоке жидкости (диэлектрика). Результаты исследования приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Мощность теплового потока**

*Table 1*

**Heat flow capacity**

| Вид среды  | Мощность теплового потока, Вт |
|------------|-------------------------------|
| Воздушная  | 0,513                         |
| Жидкостная | 15,79                         |

В результате проведенного анализа можно заключить, что использование жидкого диэлектрика непосредственно контактирующего с тепловыделяющими компонентами является более эффективным с физической точки зрения решением и обеспечивает многократное превосходство в сравнении с воздушным методом охлаждения.

### Заключение

В результате проведения расчета была получена значительная разница между мощностью теплового потока в жидкостной и воздушной среде. Следует отметить, что для равнозначности расчеты выполнялись при одинаковых параметрах текущих сред. Следовательно, использование жидкостной среды предоставляет огромный запас для уменьшения скорости потока и уменьшения температурной разницы между тепловыделяющей поверхностью и текучей средой. Таким образом возможна существенная экономия на средствах, обеспечивающих вынужденную конвекцию среды (насосы и пр.) и на установках для охлаждения отработанного хладагента.

Также при использовании жидкостной системы охлаждения серверов появляется возможность удаления вентиляторов из корпуса сервера. Такое решение позволяет дополнительно сэкономить 10–25% энергии.

Использование более эффективной жидкостной системы позволяет многократно увеличивать плотность размещения серверного оборудования и как следствие экономить полезное пространство в центрах обработки данных.

Данные преимущества позволяют делать положительные выводы о перспективах жидкостного охлаждения серверов.

### References

1. Jie Li, Liang Guo, Bin Lan, Lina Xie. Liquid cooling revolution. // The People's Posts and Telecommunications Press. 2019. 08:110–116.
2. Lina Xie, Liang Guo. Discussion on liquid cooling technology and its development. // Information Communication Technology and Policy. 2019. 02:22–25.
3. Andreu Carbó, Eduard Oró, Jaume Salom, et al. Experimental and numerical analysis for potential heat reuse in liquid cooled data centers. // Energy Conversion and Management. 2016. 112:135–145.
4. Pin Chen, Souad Harmand, Safouene Ouenzerfi. Immersion cooling effect of dielectric liquid and self-rewetting fluid

- on smooth and porous surface. // *Applied Thermal Engineering*. 2020. 180:32–35. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115862
5. Ali C. Kheirabadi, Dominic Groulx. Experimental evaluation of a thermal contact liquid cooling system for server electronics. 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics — ExHFT-9. 2018. 129:1010–1025.
  6. Mustafa A. Kadhim, Nikil Kapur, Jonathan L. Summers, et al. Rack Level Study of Hybrid Liquid / Air Cooled Servers: The Impact of Flow Distribution and Pumping Configuration on Central Processing Units Temperature. 2020. 41 (19-20):1683–1698.
  7. Бухмиров В. В. Теоретические основы теплотехники. Основы тепломассообмена. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2011. 68 с.
  8. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учеб. для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
  9. Куталадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Машгиз, 1957.
  10. Солодов А. П. Практикум по теплопередаче: учеб. пособие для вузов / А. П. Солодов, Ф. Ф. Цветков, А. В. Елисеев, В. А. Осипова; под ред. А. П. Солодова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 296 с.
  11. Кирвель И. И., Бражников М. М., Зацепин Е. Н. Энергосбережение в процессах теплообмена. Минск: БГУИР, 2007. 28 с.
  12. Левин И. И., Дородуло А. И., Доронченко Ю. И. и др. Погружная система охлаждения реконфигурируемых вычислительных систем на основе ПЛИС. // Программные системы: теория и приложения. 2016. 7:4 (31). с. 65–81.
  13. Атаев А. Влияние теплового режима на надежность и параметры полупроводниковых и интегральных схем приборов. // Доклады БГУИР. 2016 № 8 (102).
  14. Антуфьев В. М., Белецкий Г. О. Теплопередача и аэродинамические сопротивления трубчатых поверхностей в попечном потоке. М.: Машгиз, 1948.
  15. Цирлин А. М., Ахременков А. А. Об оптимальной организации систем охлаждения на примере платы суперкомпьютера. // Программные системы: теория и приложения. 2010. № 1 (1). с. 61–73.
  16. on smooth and porous surfaces. *Applied Thermal Engineering*. 2020. 180:32–35. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115862
  17. Ali C. Kheirabadi, Dominic Groulx. Experimental evaluation of a thermal contact liquid cooling system for server electronics. 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics — ExHFT-9. 2018. 129:1010–1025.
  18. Mustafa A. Kadhim, Nikil Kapur, Jonathan L. Summers, et al. Rack Level Study of Hybrid Liquid / Air Cooled Servers: The Impact of Flow Distribution and Pumping Configuration on Central Processing Units Temperature. 2020. 41 (19-20):1683–1698.
  19. Бухмиров В. В. Теоретические основы теплотехники. Основы тепломассообмена. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2011. 68 с. (In Russian)
  20. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Heat transfer: textbook for universities. Moscow: Energoizdat, 1981. 416 p. (In Russian)
  21. Kataladze S. S. Fundamentals of Heat Transfer Theory. Moscow: Mashgiz, 1957. (In Russian)
  22. Solodov A. P. Workshop on Heat Transfer: Textbook for High Schools / A. P. Solodov, F. F. Tsvetkov, A. V. Eliseev, V. A. Osipova; ed. by A. P. Solodov. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 296. (In Russian)
  23. Kivel I. I., Brazhnikov M. M., Zatsepin E. N. Energy-saving in heat change processes. Minsk: BGUR, 2007. 28 p. (In Russian)
  24. Levin I. I., Dordopulo A. I., Doronchenko Y. I. et al. Immersion cooling system for reconfigurable FPGA-based computing systems. *Software Systems: Theory and Applications*. 2016. 7:4 (31). pp. 65–81. (In Russian)
  25. Ataev A. Influence of thermal mode on the reliability and parameters of semiconductor and integrated circuit devices. *Reports BSUIR*. 2016. No. 8 (102). (In Russian)
  26. Antufiev V. M. and Beletsky G. O. Heat transfer and aerodynamic resistance of tubular surfaces in transverse flow. Moscow: Mashgiz, 1948. (In Russian)
  27. Tsirlin A. M., Akhremenkov A. A. On the optimal organization of cooling systems by the example of a supercomputer board. *Software systems: theory and applications*. 2010. No. 1 (1). pp. 61–73. (In Russian)

## 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

Магистрант кафедры ИБМ7 — Инженерный бизнес и менеджмент, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, ilyamakh@icloud.com, ORCID: 0000-0002-7716-6741

## Information about authors

### Arkharov Ivan A.

Dr. 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.

Master's student of Department IBM7 — Engineering Business and Management MA, Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya St., 5, bld. 1, Moscow, Russia, 105005, ilyamakh@icloud.com, ORCID: 0000-0002-7716-6741



Статья доступна по лицензии  
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»