Ликбез
по **жидкостному** охлаждению вычислительных GPU-кластеров

Василий Кирсанов

Технологическая Компания «Связь»

ТК - СВЯЗЬ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

г. Москва

Московский государственный текстильный университет имени А.Н. Косыгина

ДИПЛОМ

С ОТЛИЧИЕМ

АВС 1195994

Решением Государственной аттестационной комиссии

от 17 июня 2003 года

КИРСАНОВУ

Василию Михайловичу

 присуждена квалификация

ИНЖЕНЕР

по специальности:

„Промышленная теплоэнергетика."

Председатель Государственной аттестационной комиссии

Ректор

Дисклеймер, спойлер и пр.

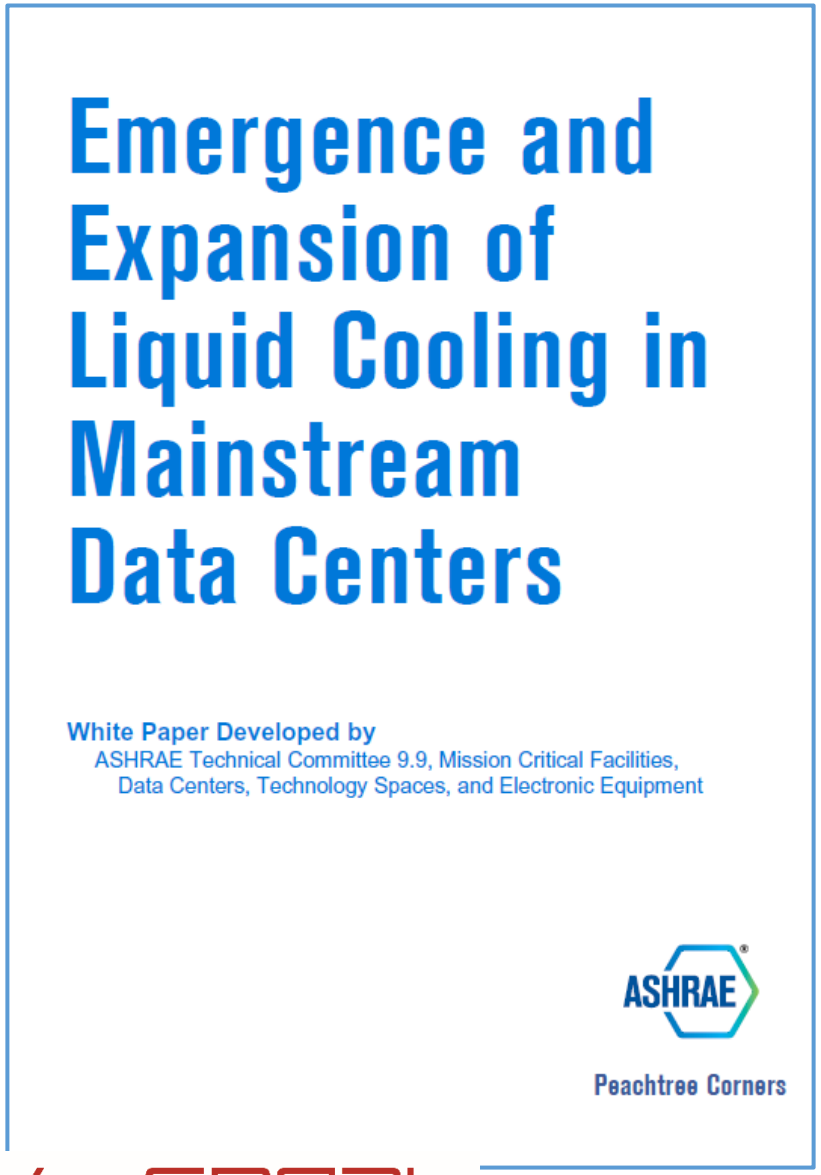
Рост энергопотребления – Нехватка электричества/Рост тарифов

Рост тепловыделения – Нехватка охлаждения

Долгий запуск проекта – Задержка получения прибыли

Снижение CAPEX и OPEX – Ускорение окупаемости

Воздуха недостаточно ?

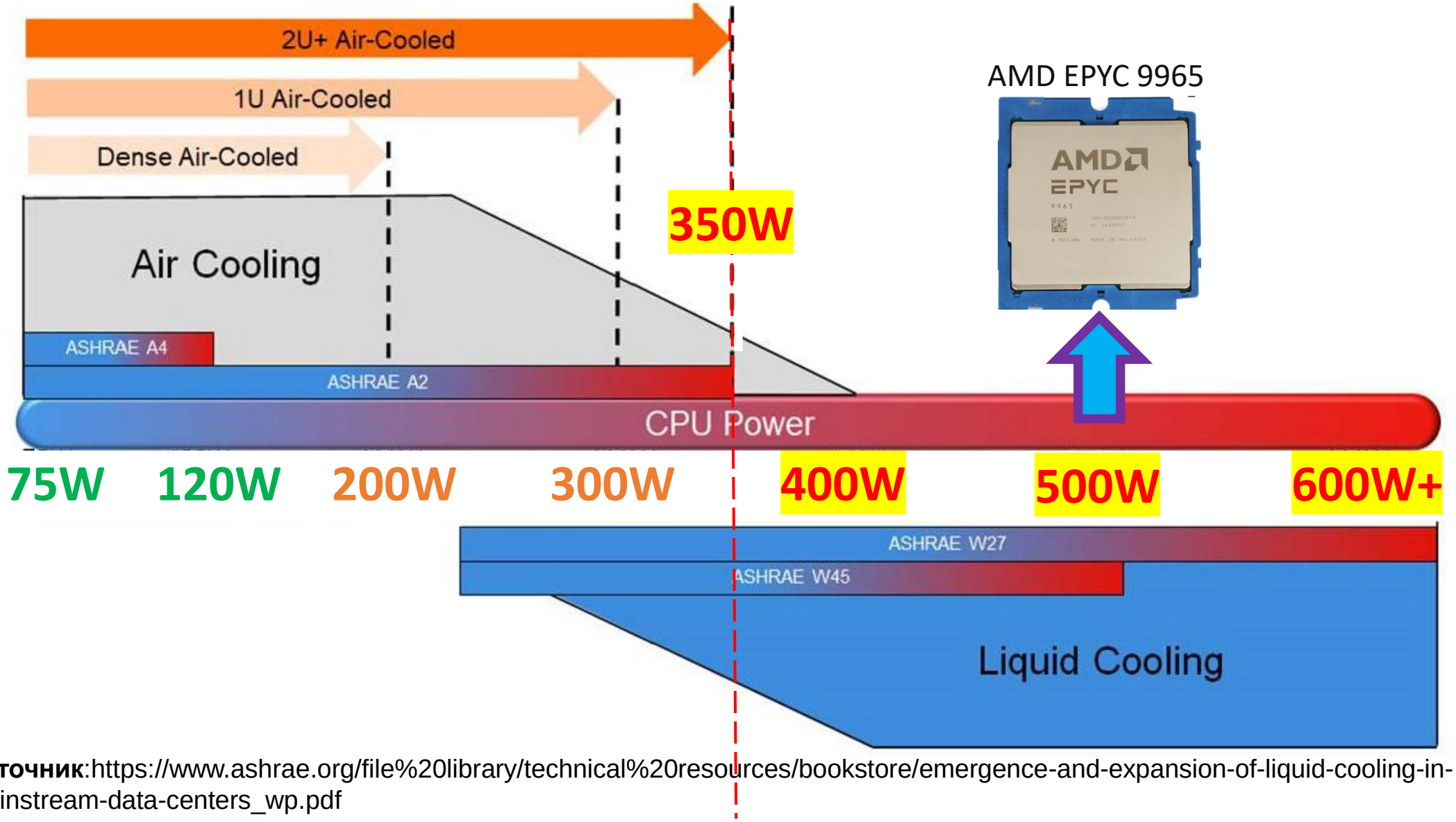


Появление и распространение жидкостного охлаждения в типовых центрах обработки данных.

2021г.

Источник:https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/emergence-and-expansion-of-liquid-cooling-in-mainstream-data-centers_wp.pdf

…или достаточно?



Источник:https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/emergence-and-expansion-of-liquid-cooling-in-mainstream-data-centers_wp.pdf

Воздух перестаёт быть эффективным

15кВт x 4 = 60кВт

Networking

- NVIDIA Quantum-X800 InfiniBand or NVIDIA Spectrum-X Ethernet for up to 800Gb/s compute fabric
- Ethernet leaf switches for in-band management
- Out-of-band 1G/10G IPMI switch
- Non-blocking network

Compute

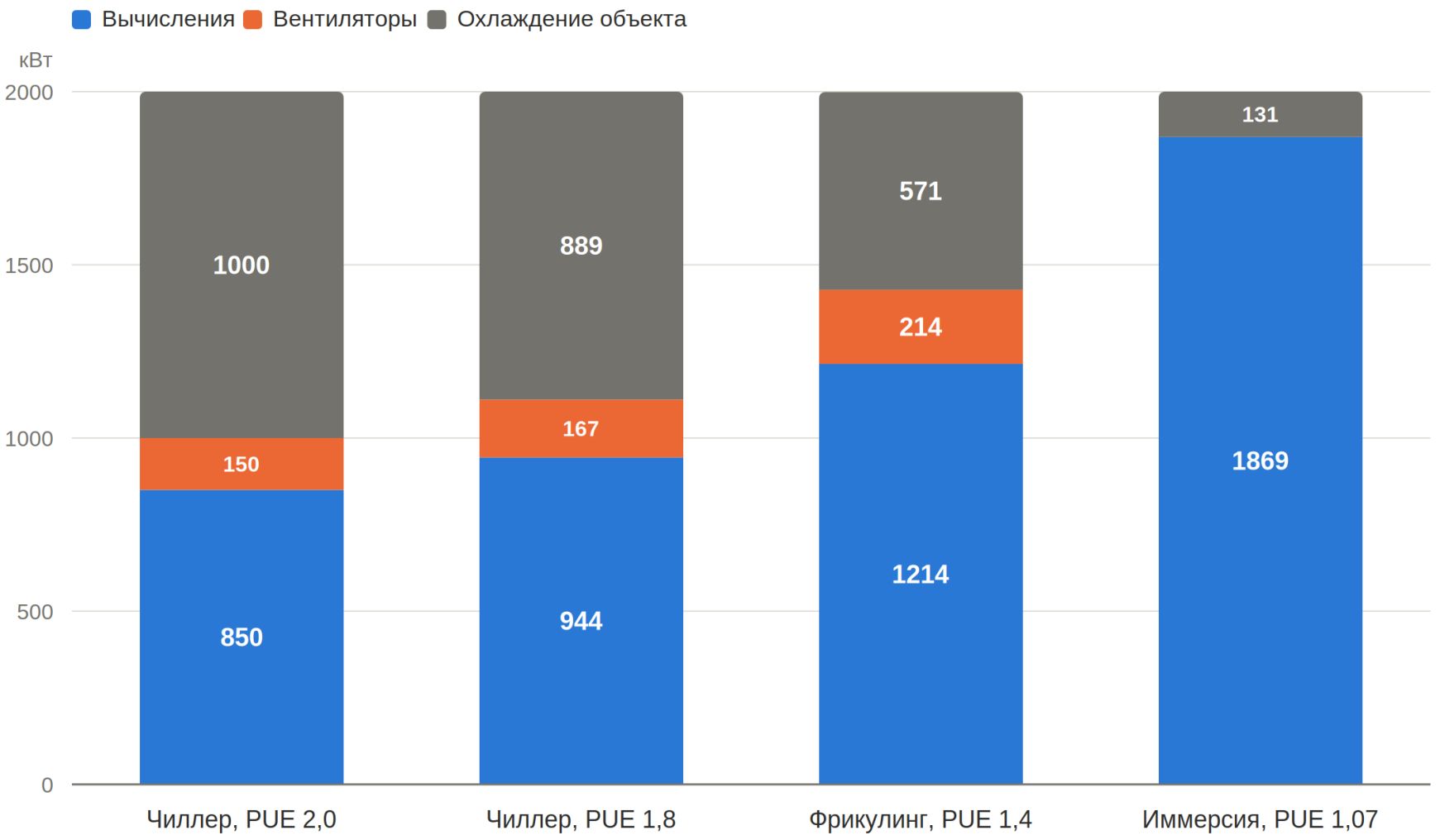
- 4x SYS-822GS-NB3RT or AS -8126GS-NB3RT
- 32x NVIDIA Blackwell Ultra B300 GPUs per rack
- 9.2TB HBM3e per rack
- Dedicated storage fabric options with full NVIDIA GPUDirect RDMA and Storage or RoCE support

Источник:https://www.supermicro.com/datasheet/datasheet_SuperCluster_B300_Front_IO.pdf

Из ~15 кВт на вентиляторы пойдёт ~3-4 кВт

Источник:https://www.gigabyte.com/de/Enterprise/GPU-Server/G893-ZD1-AAX3

Нужно больше ~~золота~~ токенов



Распределение 2 МВт выделенной мощности. Вентиляторы — 15% ИТ-нагрузки на воздушных платформах.

Насколько плотные стойки в 2026 году?
по данным AFCOM

27 кВт

Насколько плотные стойки в 2026 году?
по данным Uptime Institute – с учётом стоек >30кВт

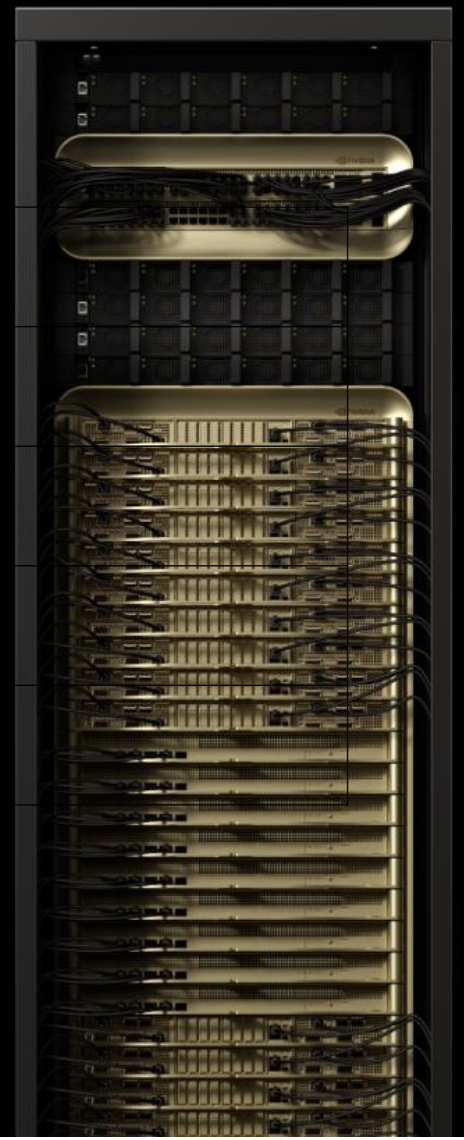
11 кВт

Насколько плотные стойки в 2026 году?
по данным Uptime Institute – без учёта стоек >30кВт

7,8 кВт

Энергопотребление одной стойки NVIDIA

Blackwell GB200 NVL72	120 – 132 кВт
Blackwell GB300 NVL72 (Ultra)	132 – 142 кВт
Vera Rubin NVL72	190 – 240 кВт
Vera Rubin NVL144 (CPX)	~370 кВт
Rubin Ultra NVL576 (Kyber)	600+ кВт

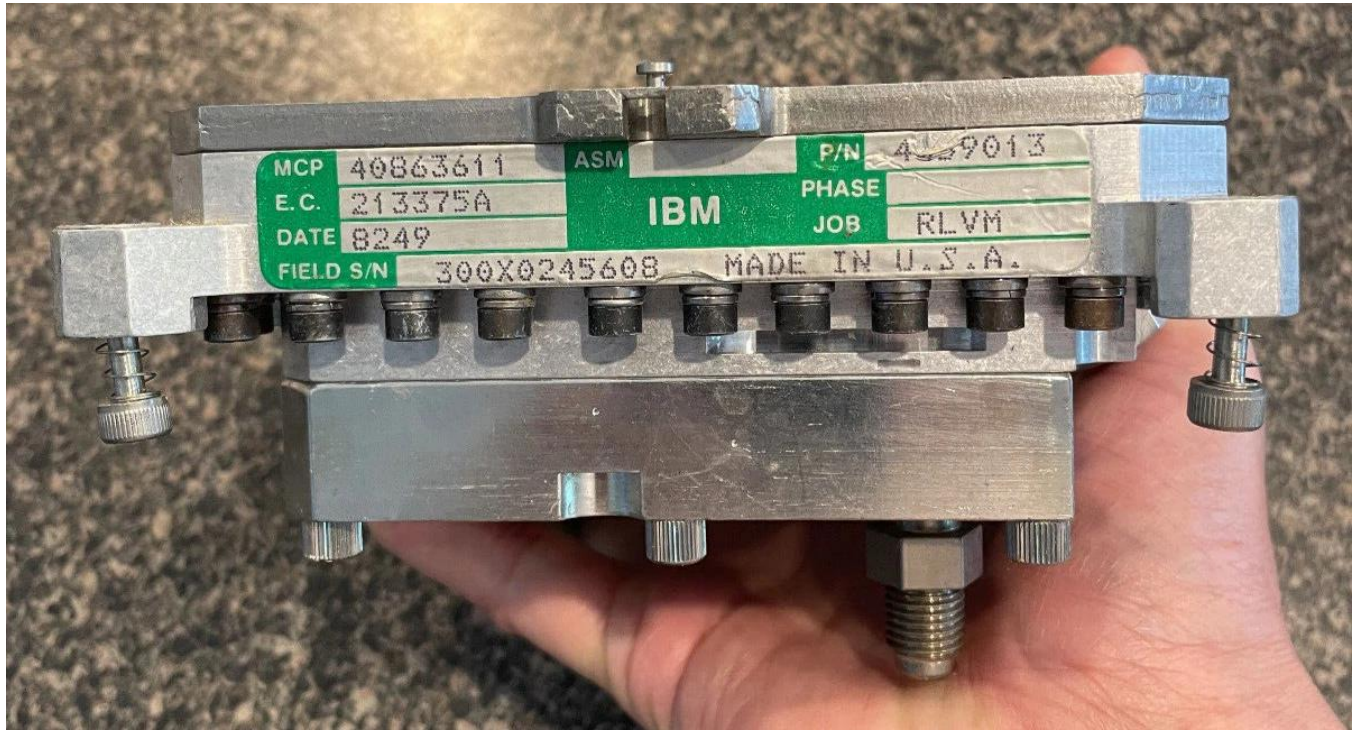


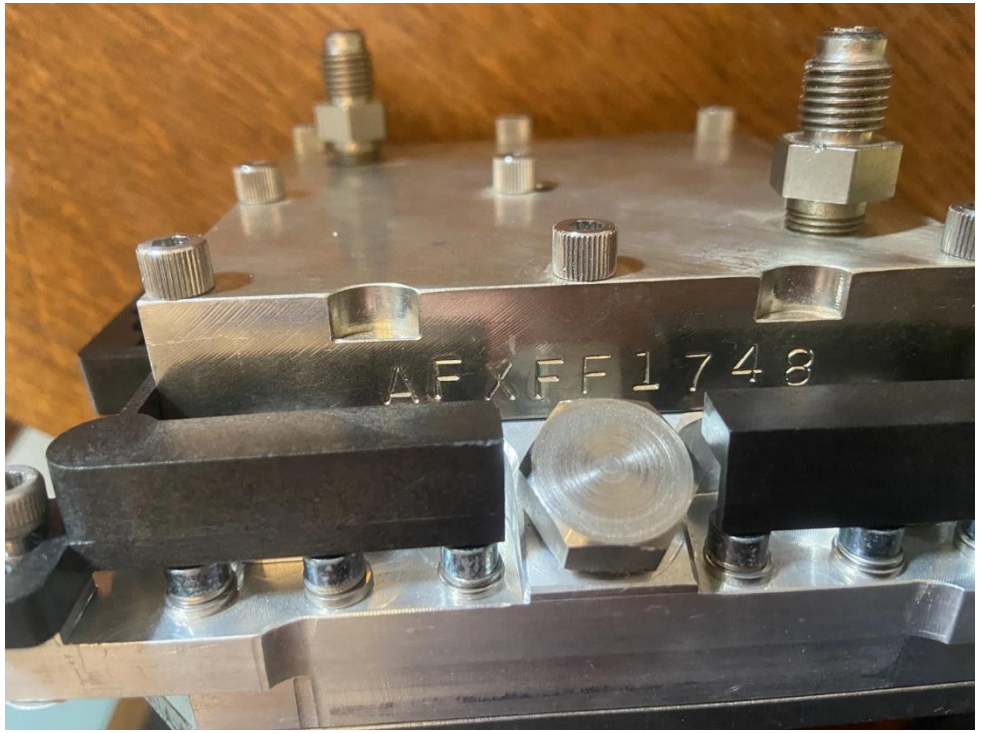
Такое уже было…

IBM System/360 (серед. 60-х)

IBM System/370 (конец 70-х)

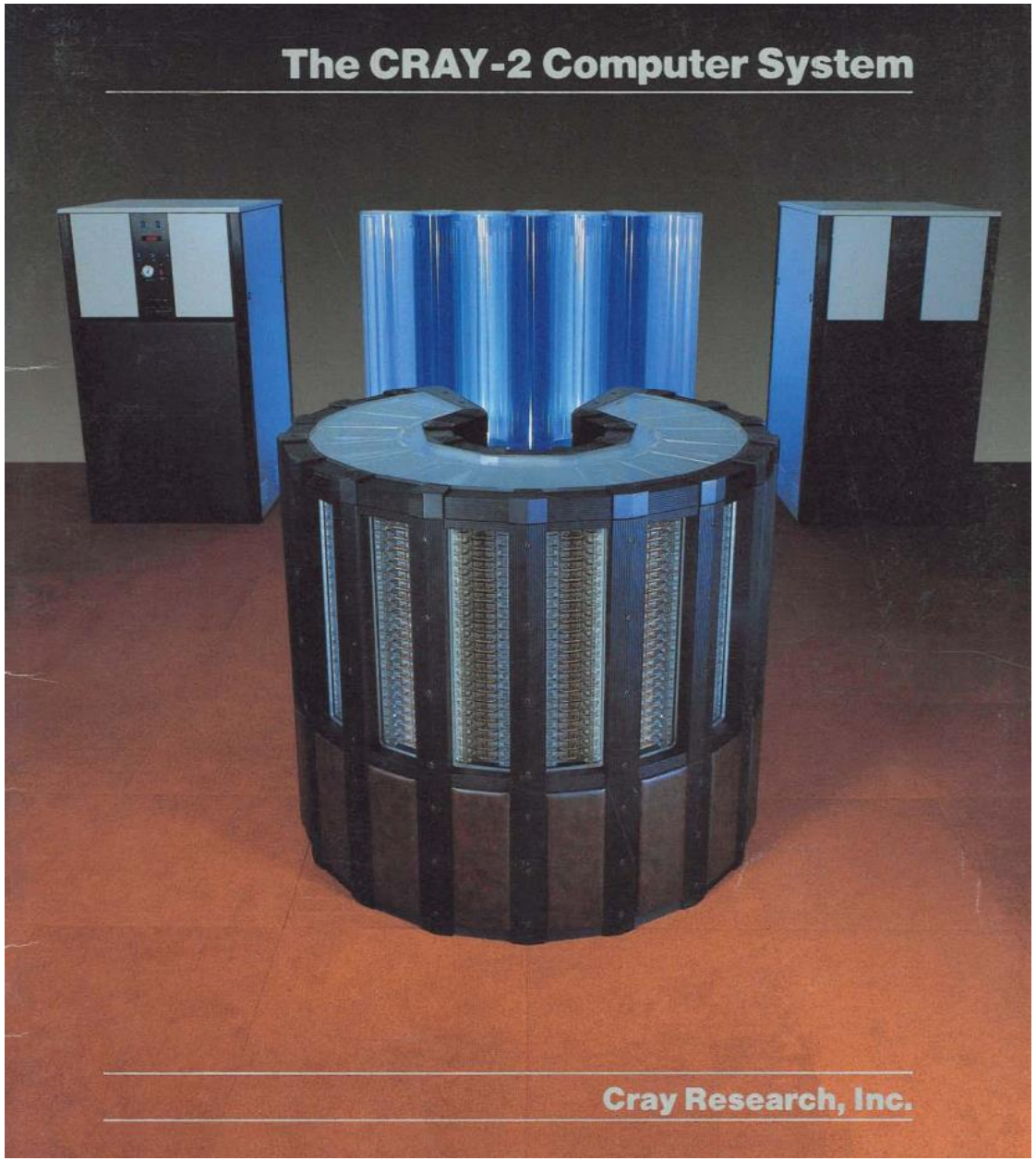
IBM Thermal Conduction Module (IBM System/370)





Источник:https://www.ebay.com/itm/256564826711

~150-190 кВт. Какой год?



Университетский комплекс в Петродворце. 1987

Источник:https://pastvu.com/p/1039414

Туда – сюда – обратно

Жидкость

ECL

1965

Cray-1, 1976: фреон
~115 кВт

Cray-2, 1985: иммерсия
150–200 кВт

Воздух

1990

CMOS

CPU: ~5–130 Вт
GPU: ~5–100 Вт

2005

Много ядер

CPU: ~65–280 Вт
GPU: ~100–300 Вт

Жидкость

2020

GPU

CPU: до 500 Вт
GPU: 400–1200 Вт

H100: 700 Вт
B200: 1 кВт+

Почему жидкость лучше?

m – масса теплоносителя (кг)

$$Q = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T \quad \Rightarrow \quad V = \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot \Delta T}$$

Среда	Плотность ρ, кг/м³	Удельная теплоёмкость c, кДж/(кг·°C)	Объёмная теплоёмкость ρ·c, кДж/(м³·°C)
Вода	1 000	4,19	4 190
Воздух	1,2	1,005	1,206
Отношение (вода / воздух)	833,33	4,17	3 474,30

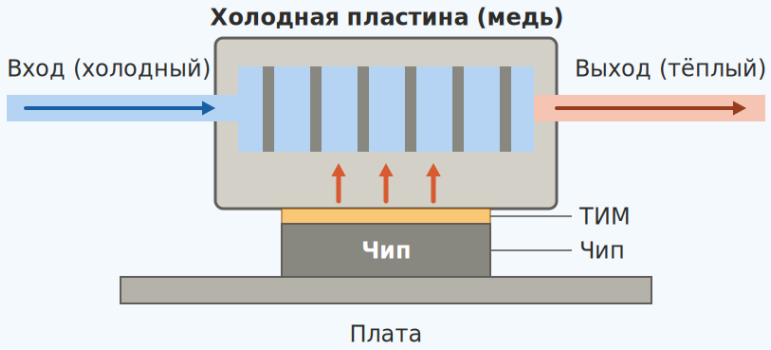
Два ведра воды против морского контейнера воздуха

Всё ещё дуете на яйца?

Источник:https://design-mate.ru/read/news/rustam-usmanov-sozdal-podstavku-dlya-yayca-v-forme-sputnika

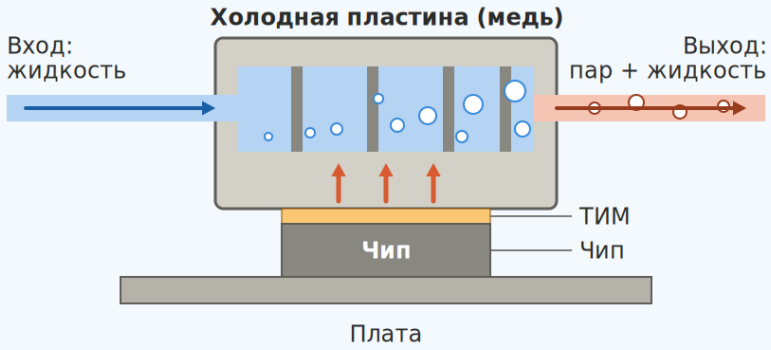
DLC однофазное

Холодная пластина: теплоноситель не кипит



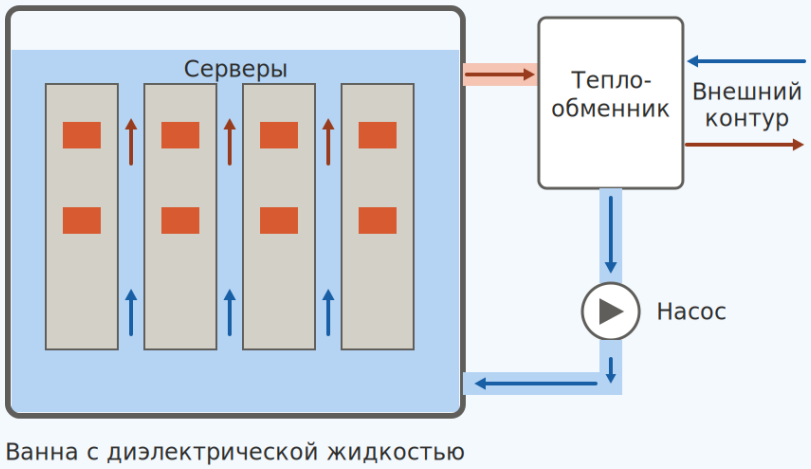
DLC двухфазное

Холодная пластина: теплоноситель кипит



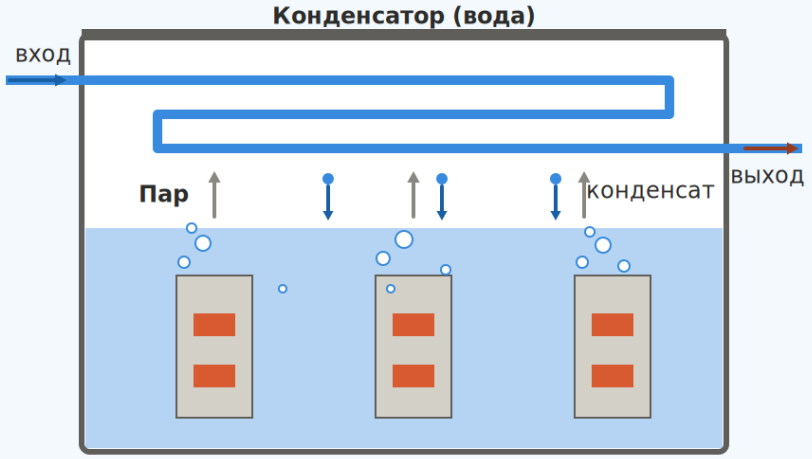
Иммерсия однофазная

Диэлектрик не кипит, циркулирует насосом



Иммерсия двухфазная

Диэлектрик кипит на чипах и конденсируется

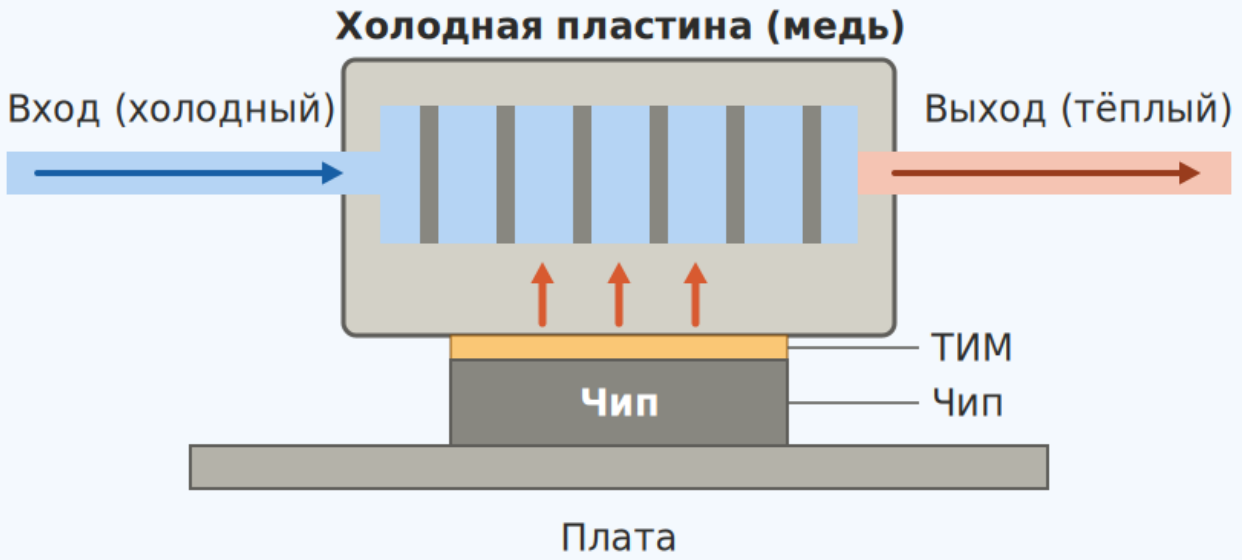


ТК - СВЯЗЬ

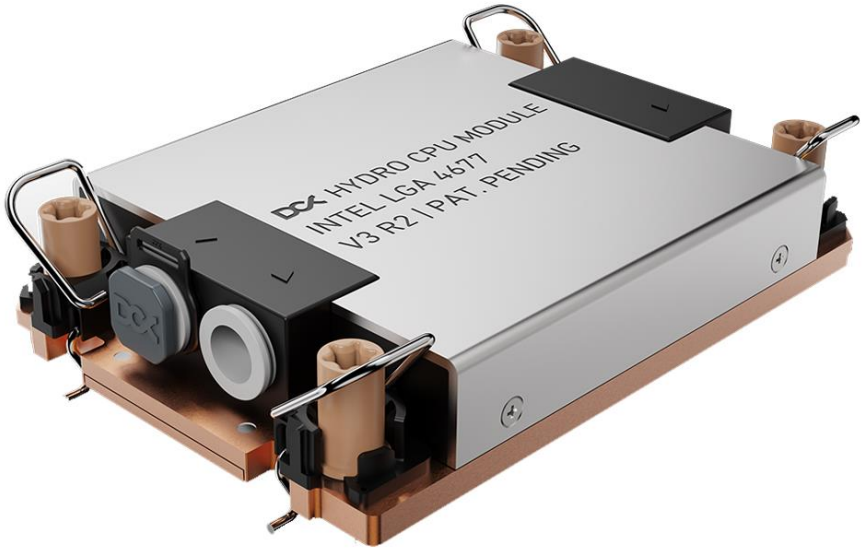
DLC / DTC / Cold Plate однофазное

DLC однофазное

Холодная пластина: теплоноситель не кипит



DLC / DTC / Cold Plate

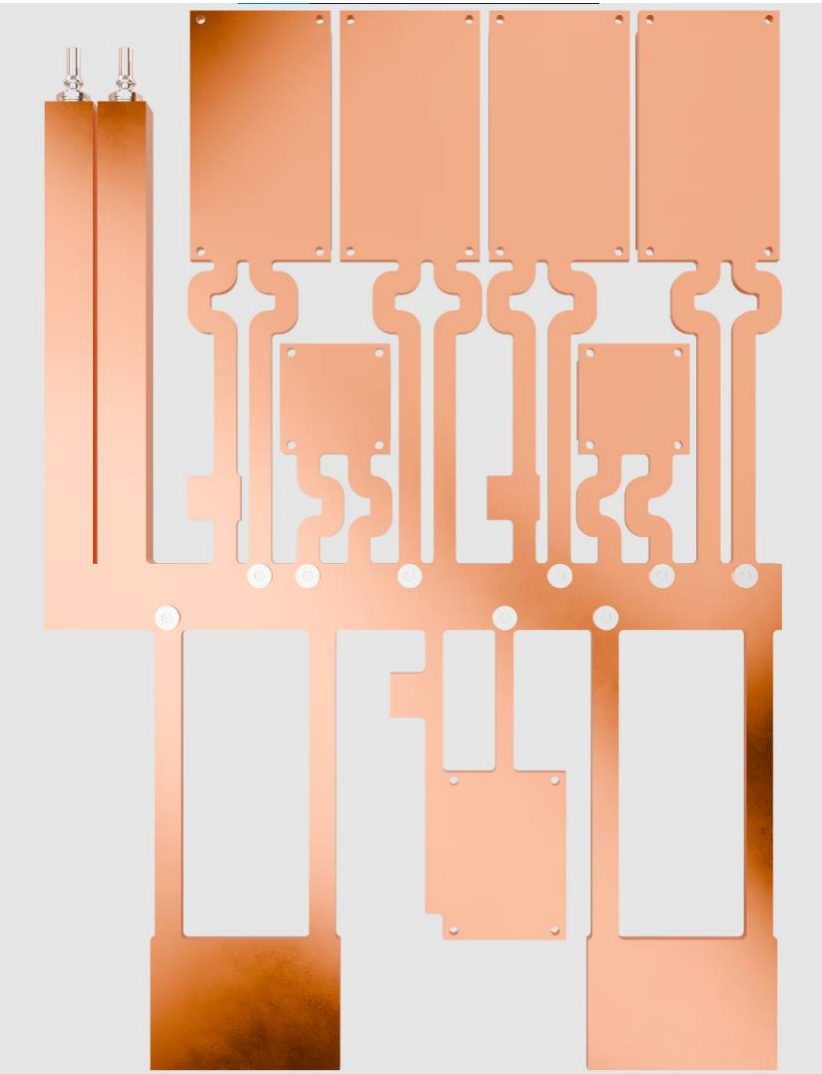


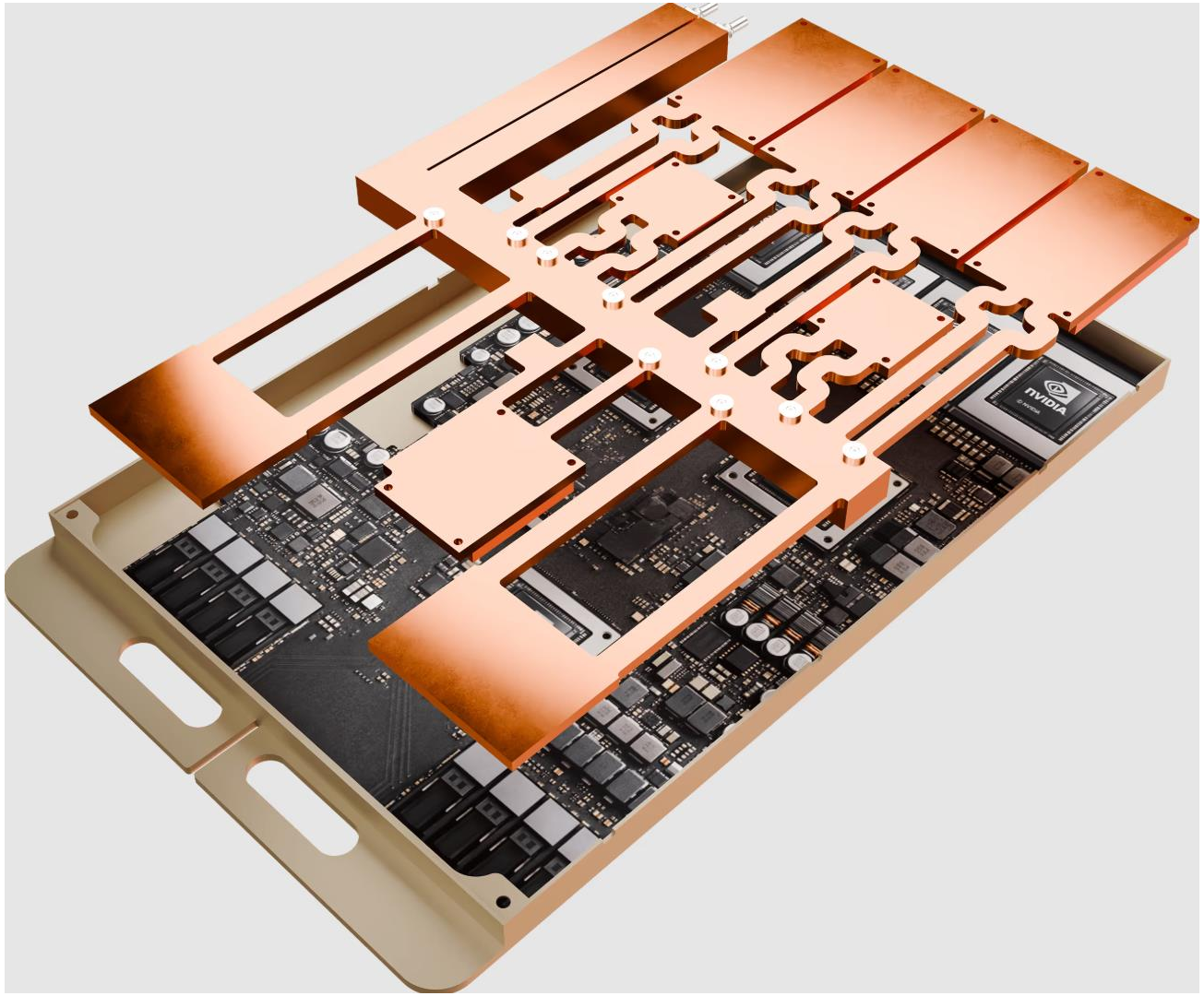
CPU

GPU

Источник: https://www.dcx.eu/blog/cold-plates-in-ai-ready-data-centers

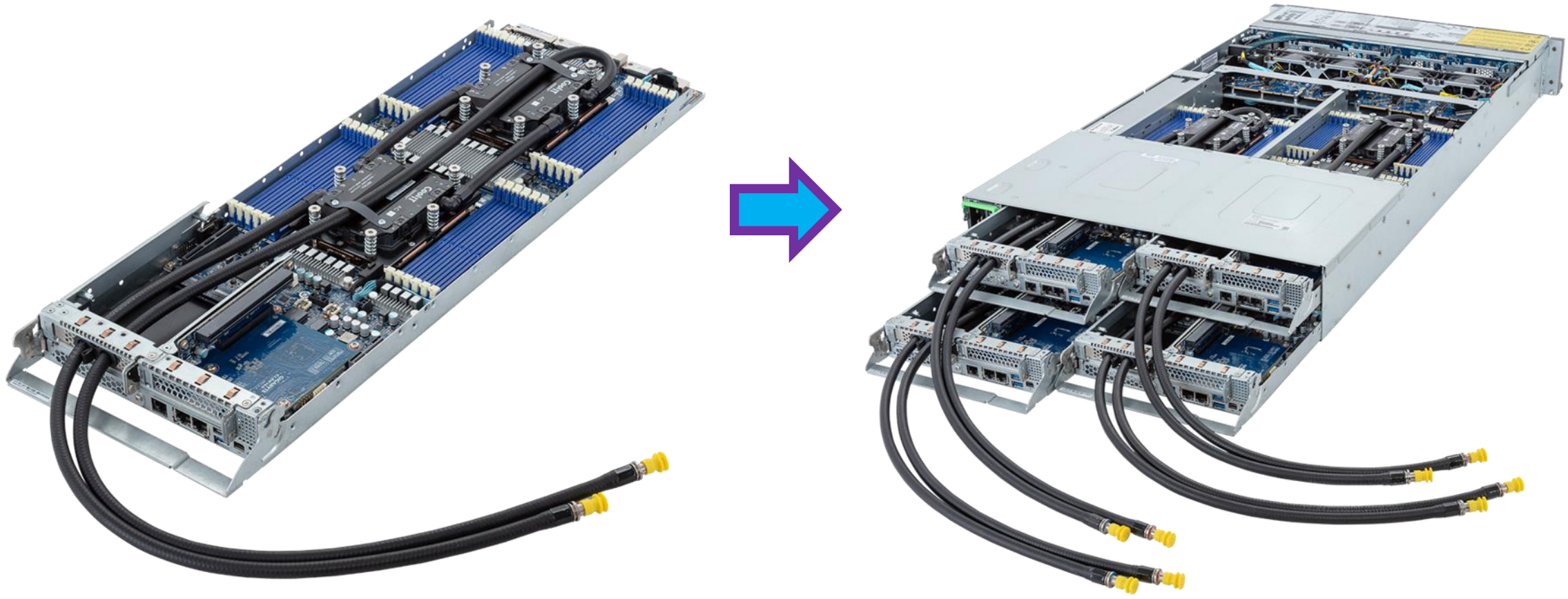
DLC / DTC / Cold Plate





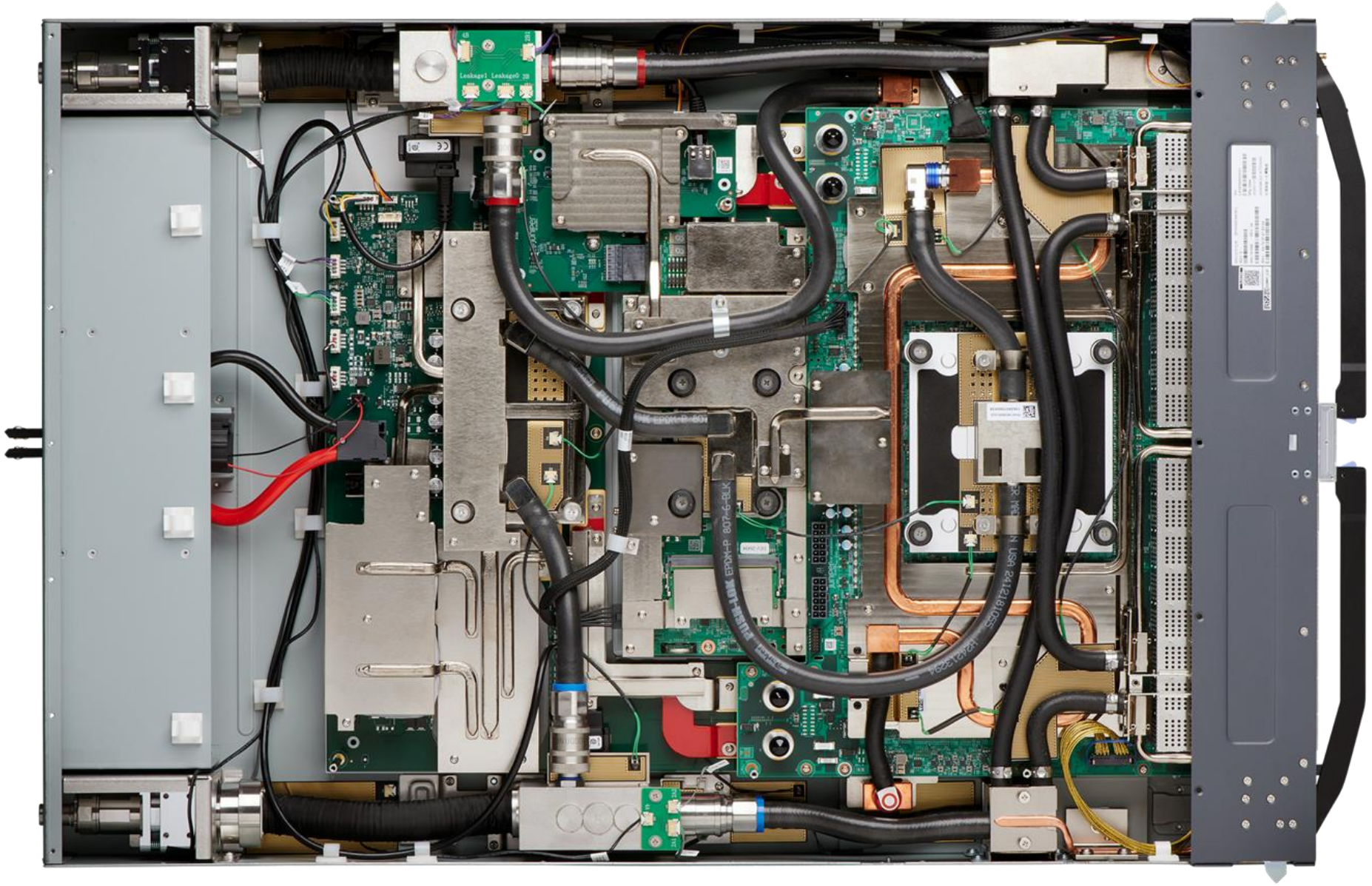
Источник: https://www.froresystems.com/products/liquidjet-nexus

Жидкостью охлаждается не всё. Часть – воздухом.



Источник: https://www.gigabyte.com/de/Enterprise/High-Density-Server/H273-Z80-LAW1-rev-3x

Что это такое?



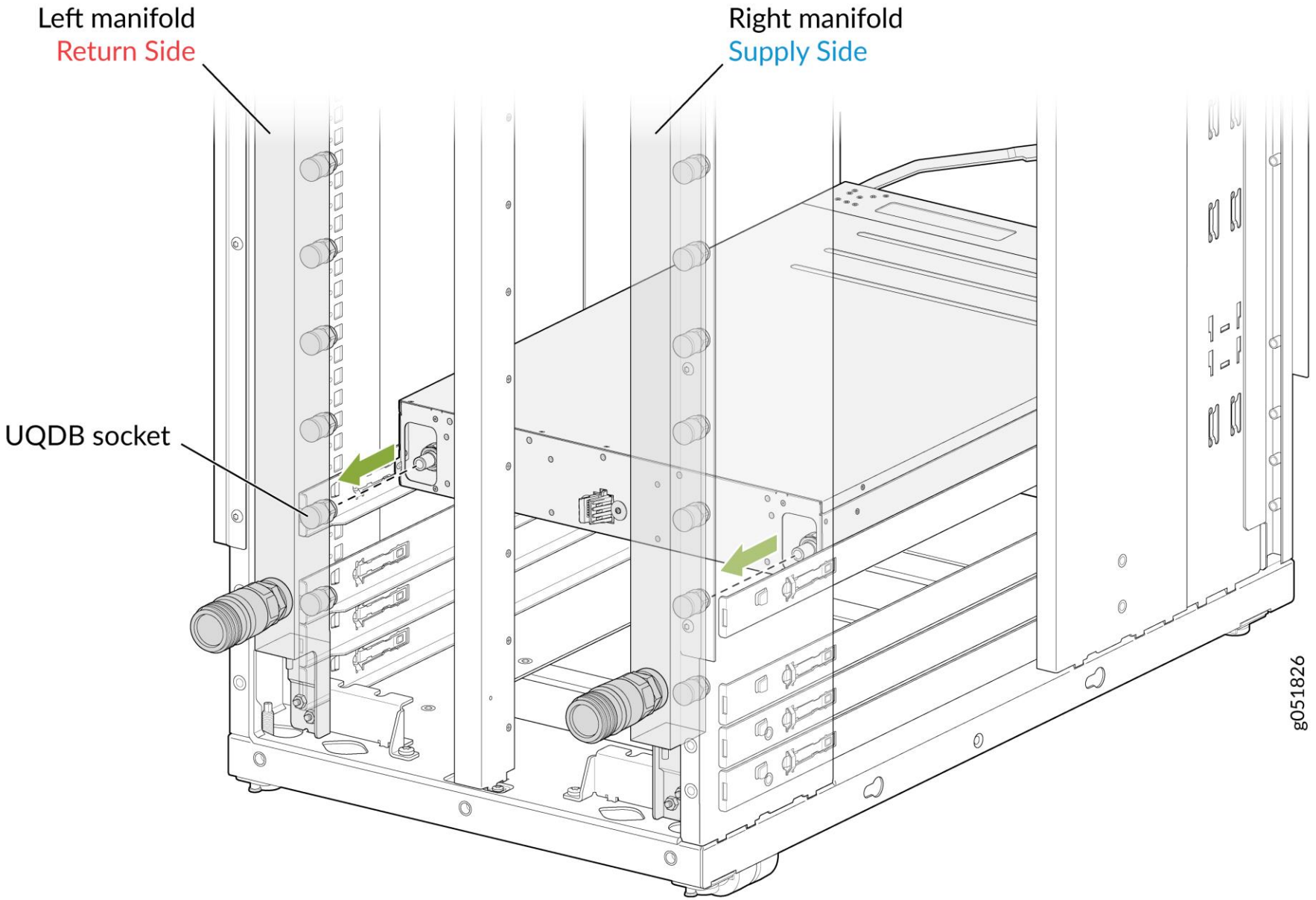
Источник: https://community.networking.hpe.com/blogs/riti-sharma/2026/06/17/industry-first-16t-liquid-cooled-sw-qfx5250-64oe-l

HPE Juniper QFX5250 Switch

ТК - СВЯЗЬ

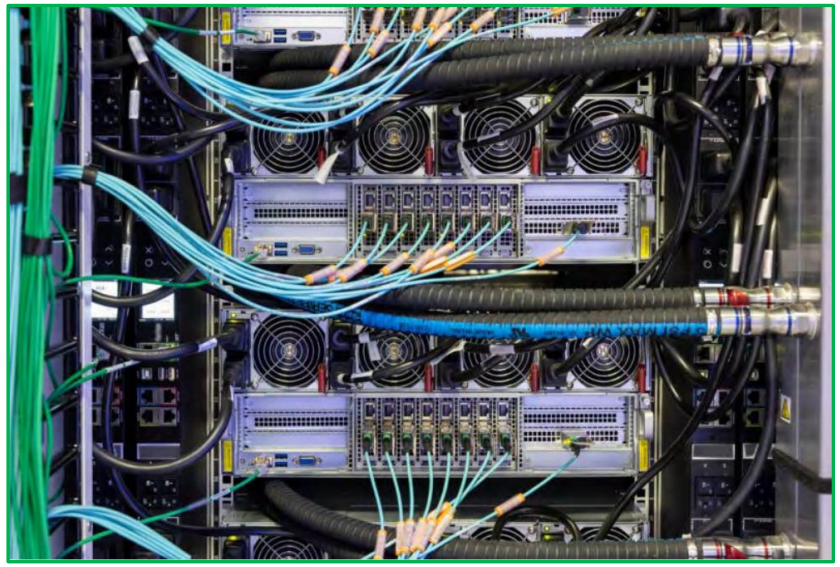
Источник: https://community.networking.hpe.com/blogs/riti-sharma/2026/06/17/industry-first-16t-liquid-cooled-sw-qfx5250-64oe-l

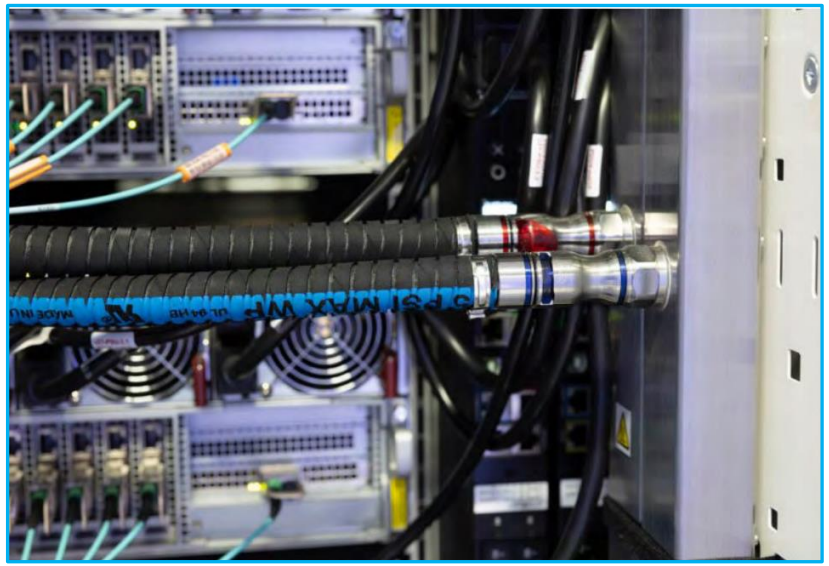
HPE Juniper QFX5250 Switch

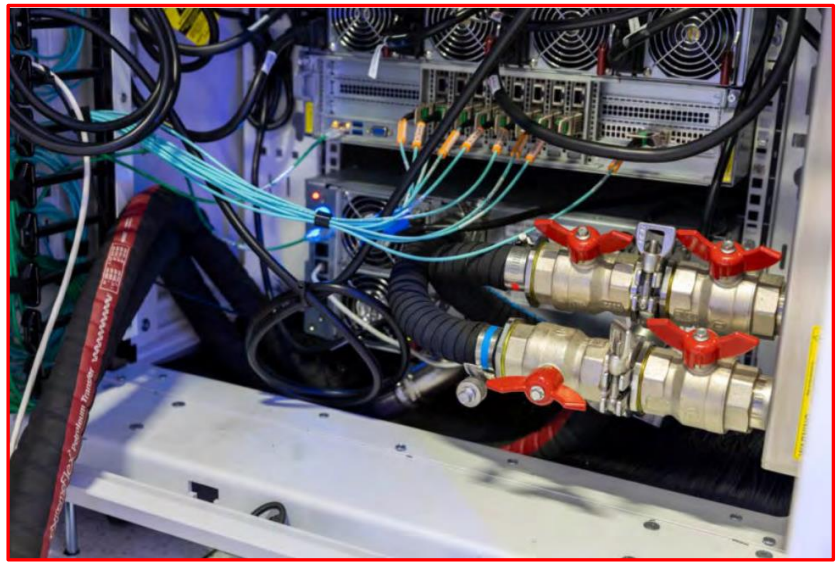


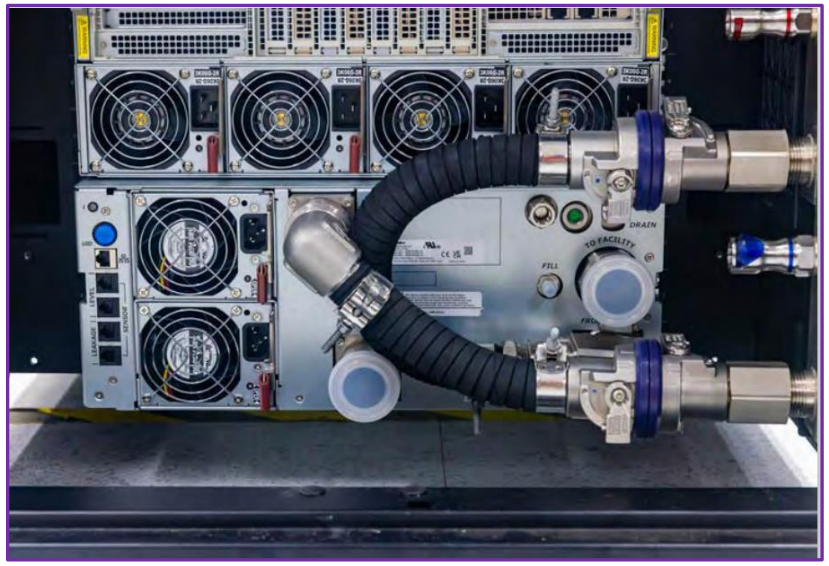
Источник: https://www.juniper.net/documentation/us/en/hardware/qfx5250/topics/topic-map/cooling-system.html

Внутри стоек теперь так ☺





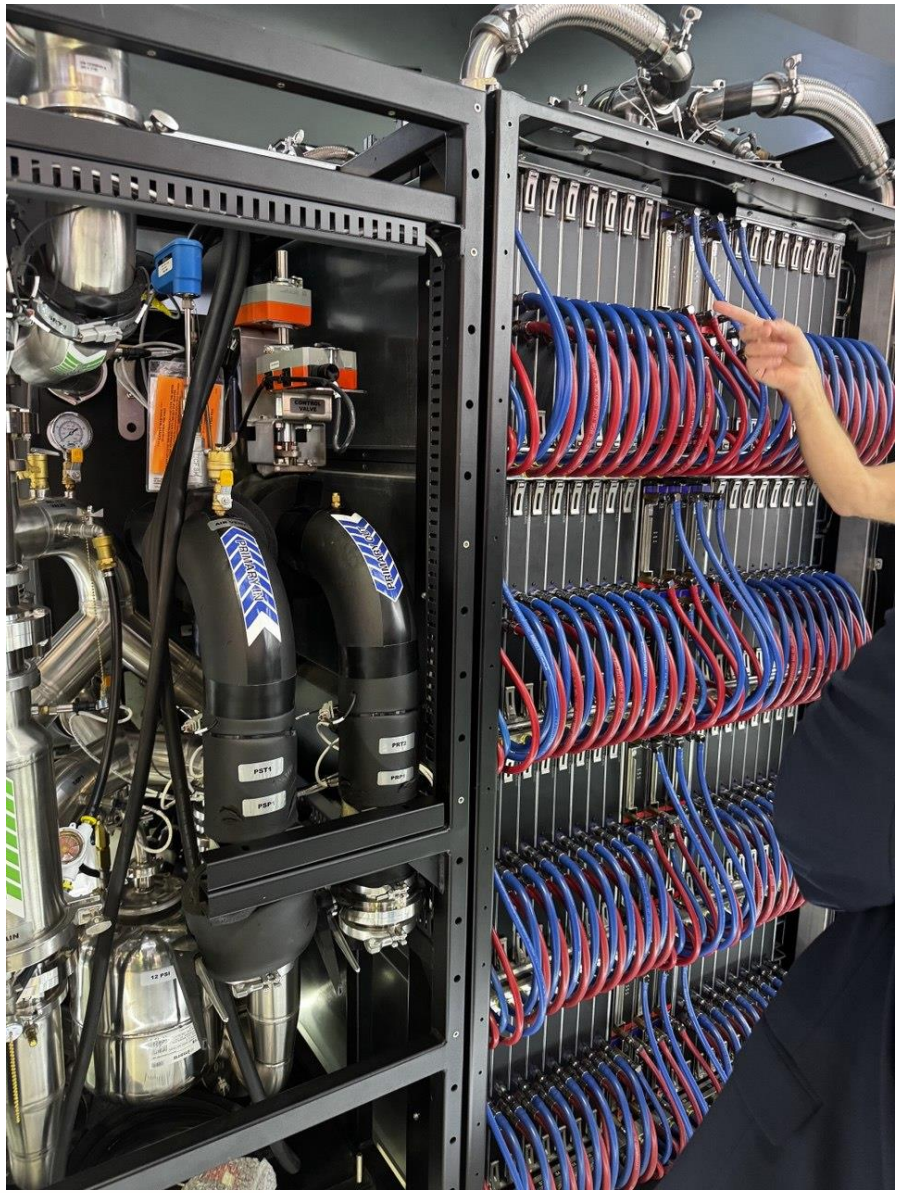


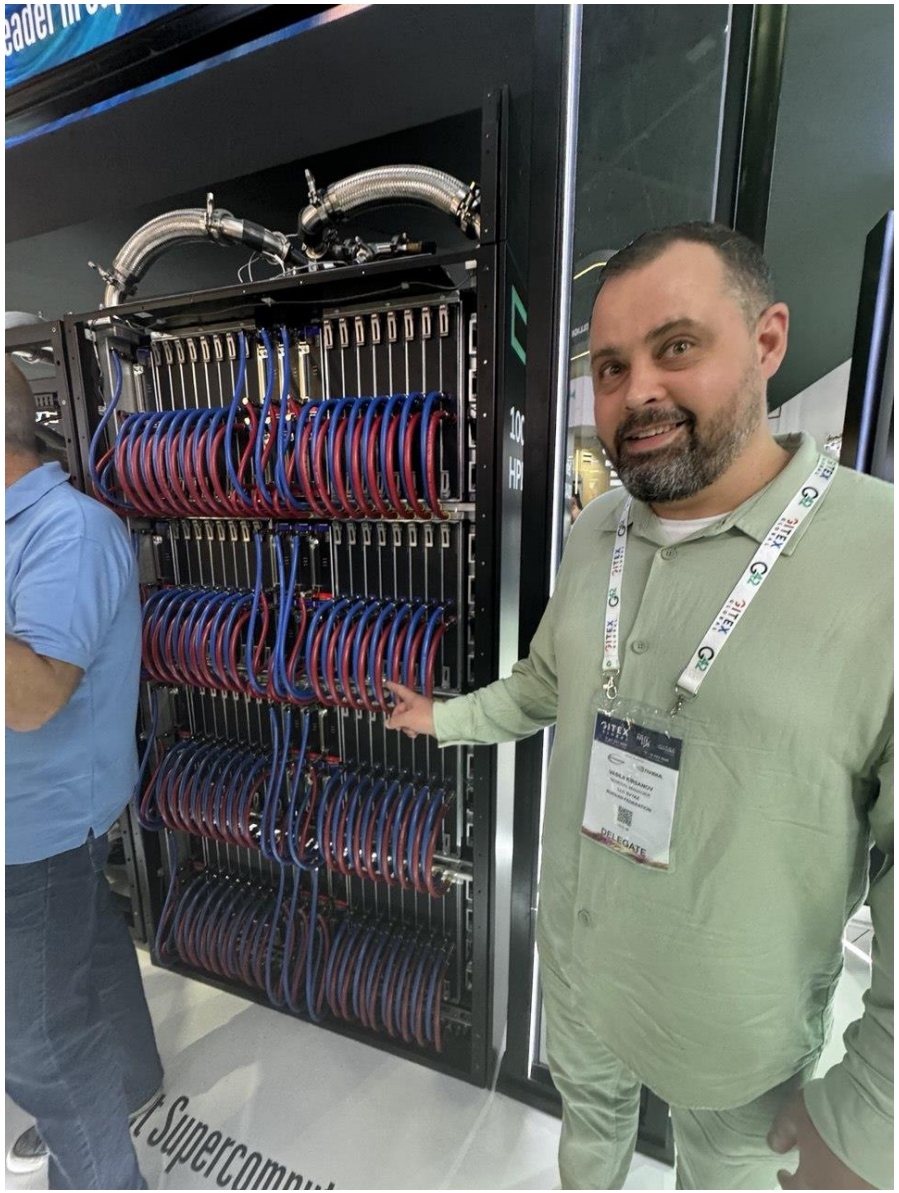


Источник: https://www.servethehome.com/supermicro-custom-liquid-cooling-rack-a-look-at-the-cooling-distribution/

Машзал с DLC / Cold Plate

Машзал с DLC / Cold Plate





Даже провод ¯_(ツ)_/¯

LIQUID COOLED BUSBAR OVERVIEW

Growing AI workloads require increasingly high levels of speed and power. TE Connectivity's (TE) liquid cooled busbar assemblies allow for high current capacities while maintaining lower temperatures and reducing the amount of energy required to cool the data center.

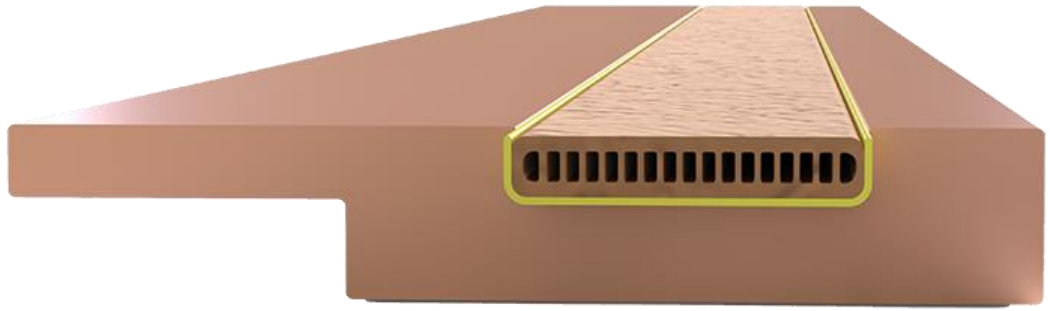
LIQUID COOLED BUSBAR FEATURES

- Up to 5x more current than traditional air cooling
  - Air-cooled busbars: limited to 140 kW max
  - Liquid cooling busbars: scaling up to 200 kW, 400 kW, and 750 kW
- Improves sustainability while reducing long-term cooling and energy costs
- Increases overall power efficiency at the rack level
- Fully compatible with Open Rack v3 (ORv3) standards
- Maximum temperature rise: 30°C
- Maximum voltage drop: 0.1 V
- Custom designs available

Liquid Cooled Busbars		
Power Capacity	Rated Current	Part Numbers
200kW	4166A	2477739-1
400kW	8333A	2495744-1
750kW	15625A	2489961-9

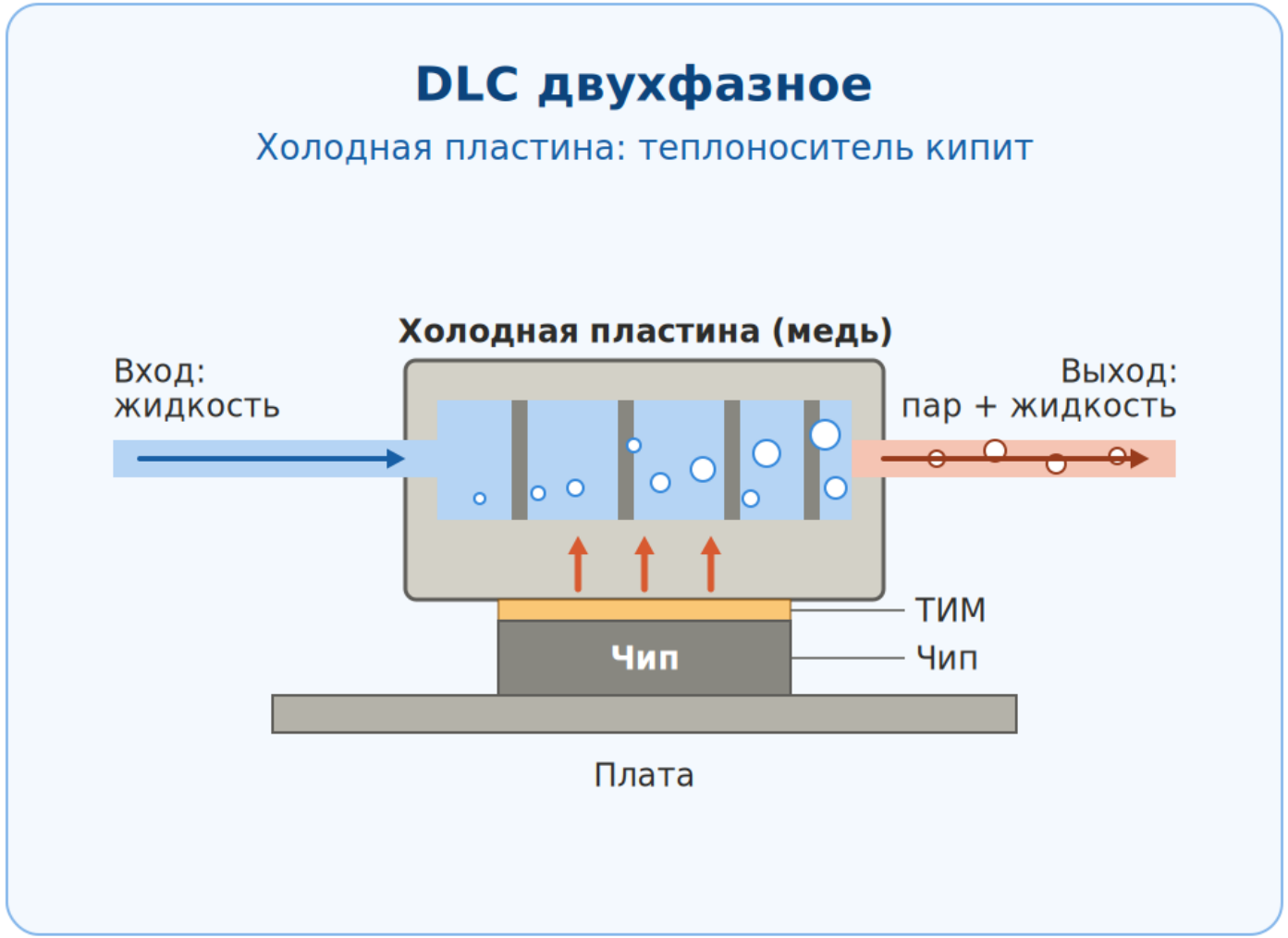
ТК - СВЯЗЬ

Точнее - шинопровод



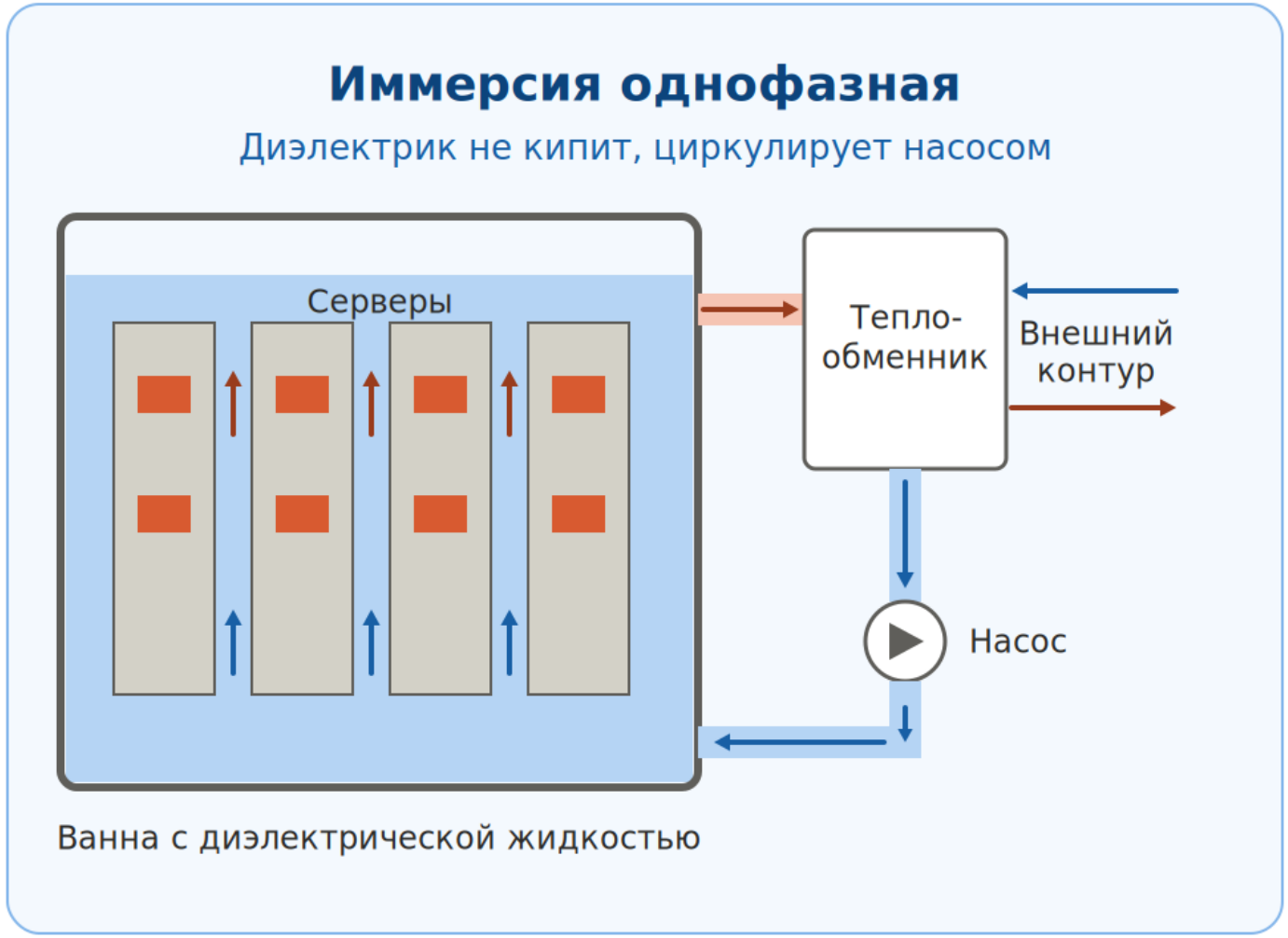
Плюсы, минусы, нюансы

DLC двухфазное

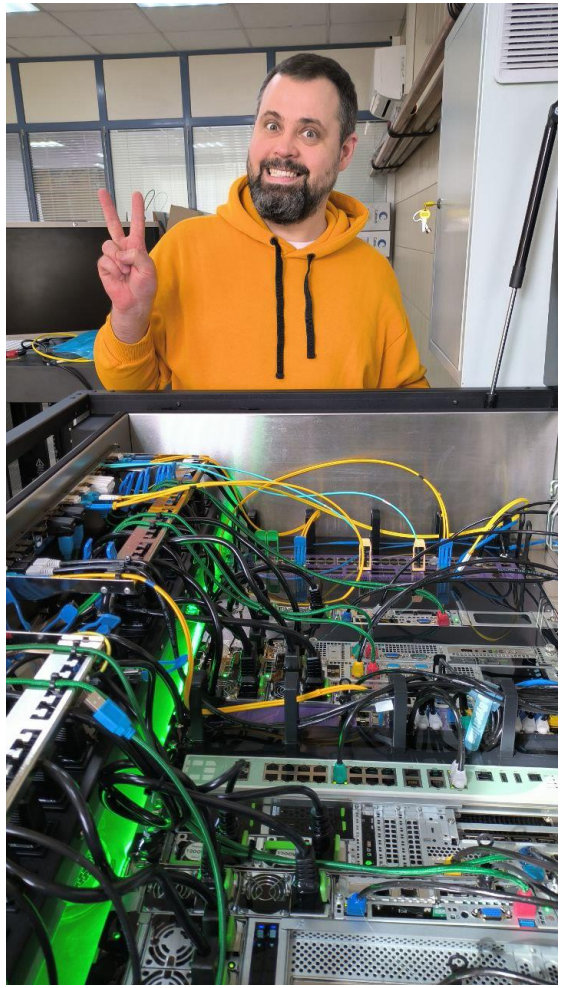


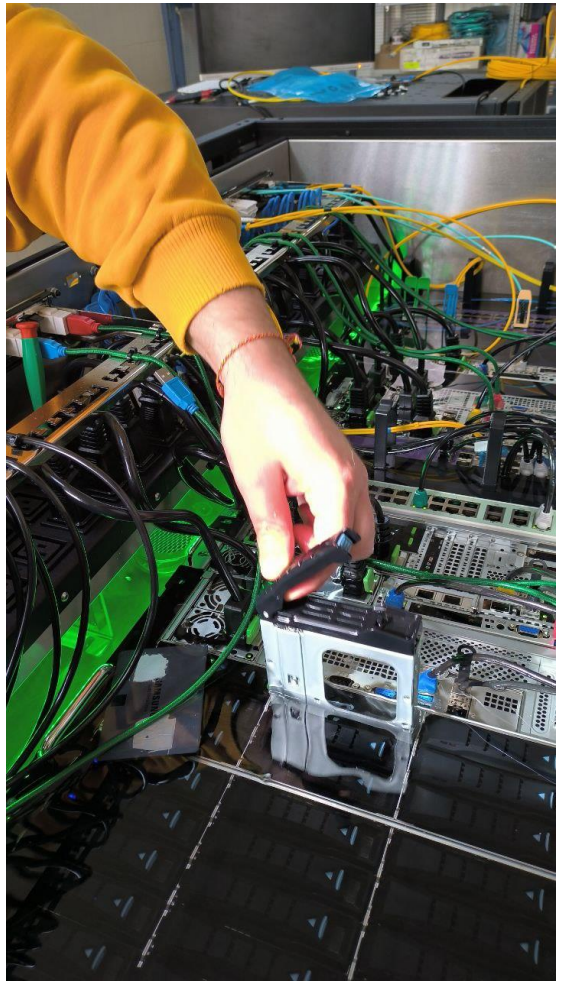
Плюсы, минусы, нюансы

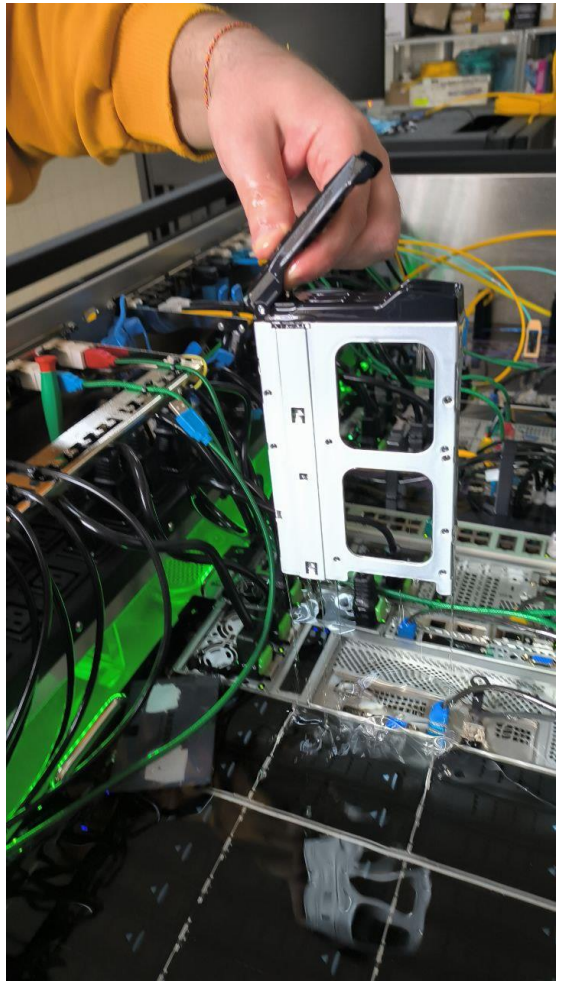
Иммерсия однофазная



Внутри иммерсионной стойки

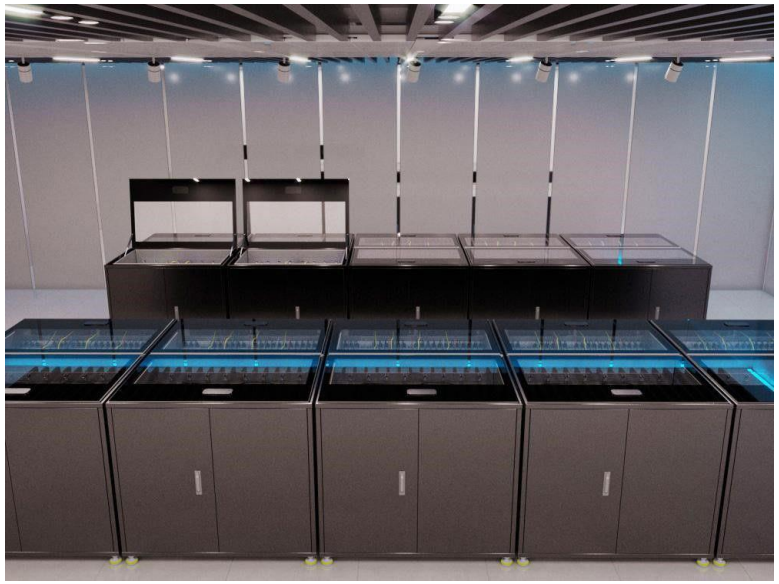






Имерсионный машзал (однофазка)

1,2 МВт
24 ванны
50кВт/ванну
Россия
2024, 2025

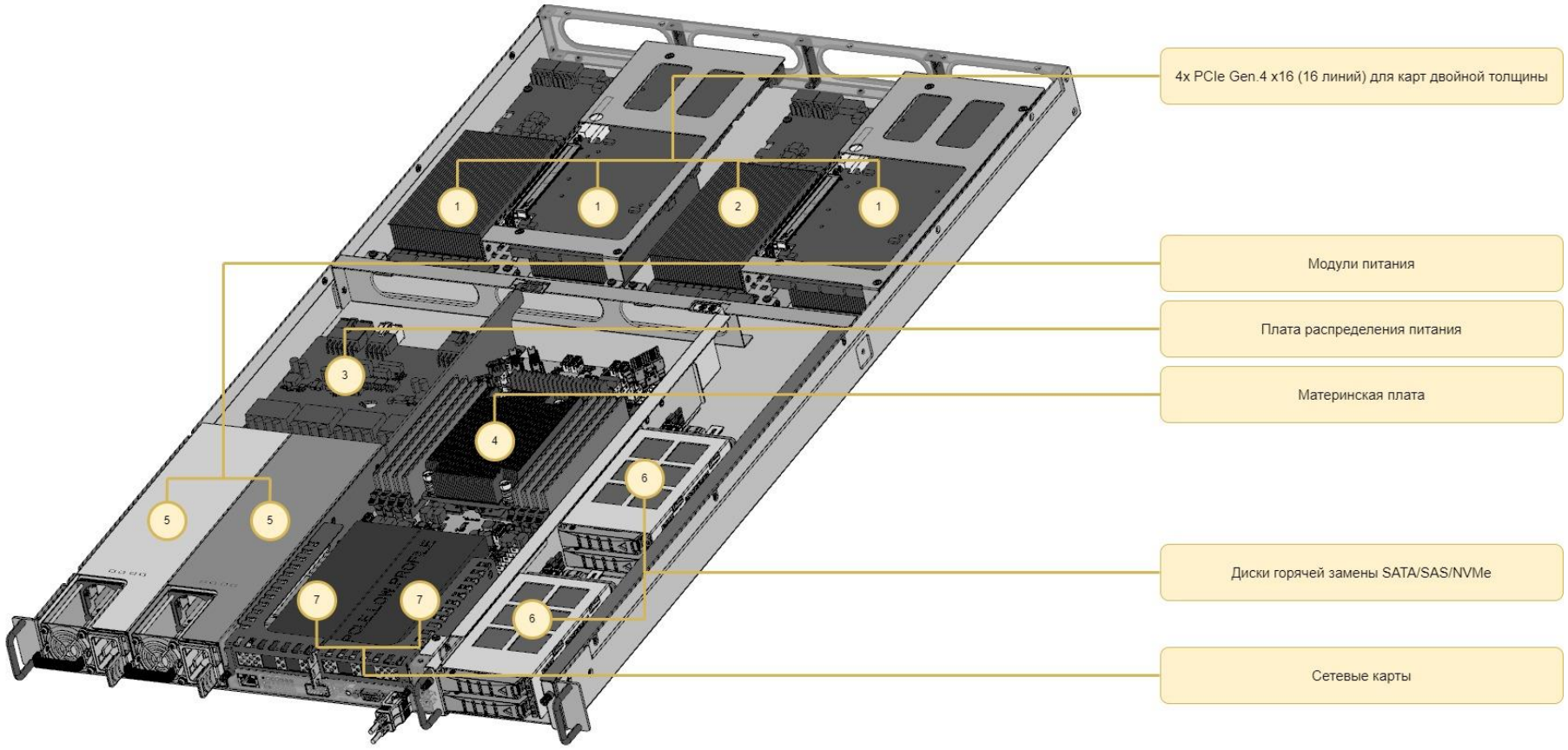


15 МВт
722 ванны
~15-20кВт/ванну
США, Хьюстон
2019

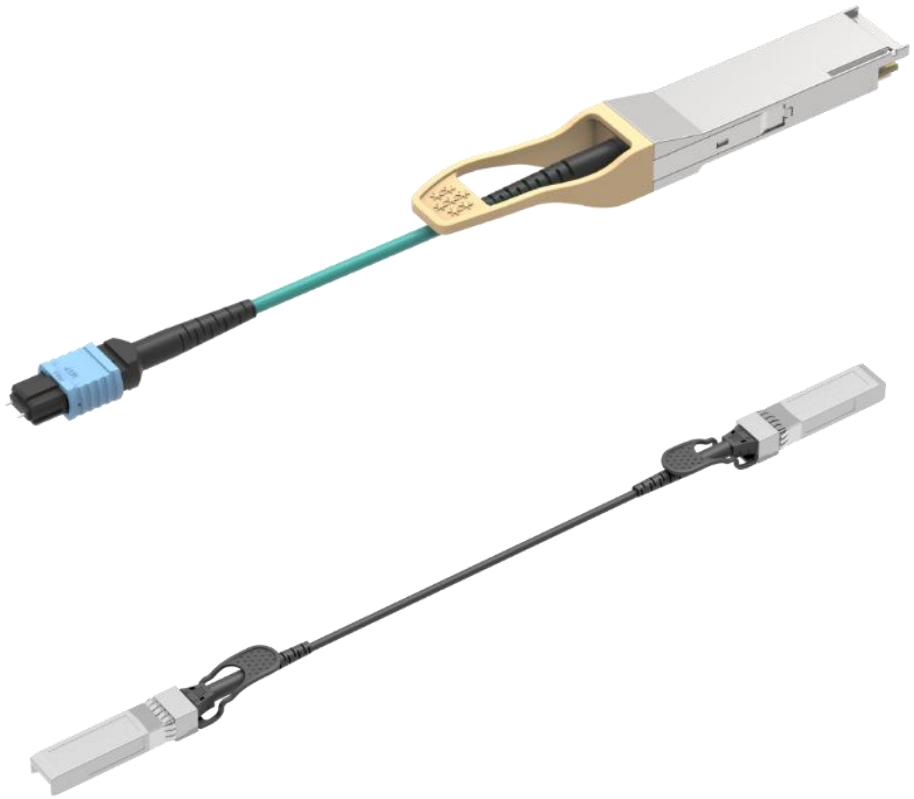
2,5 МВт
США, Техас
2025

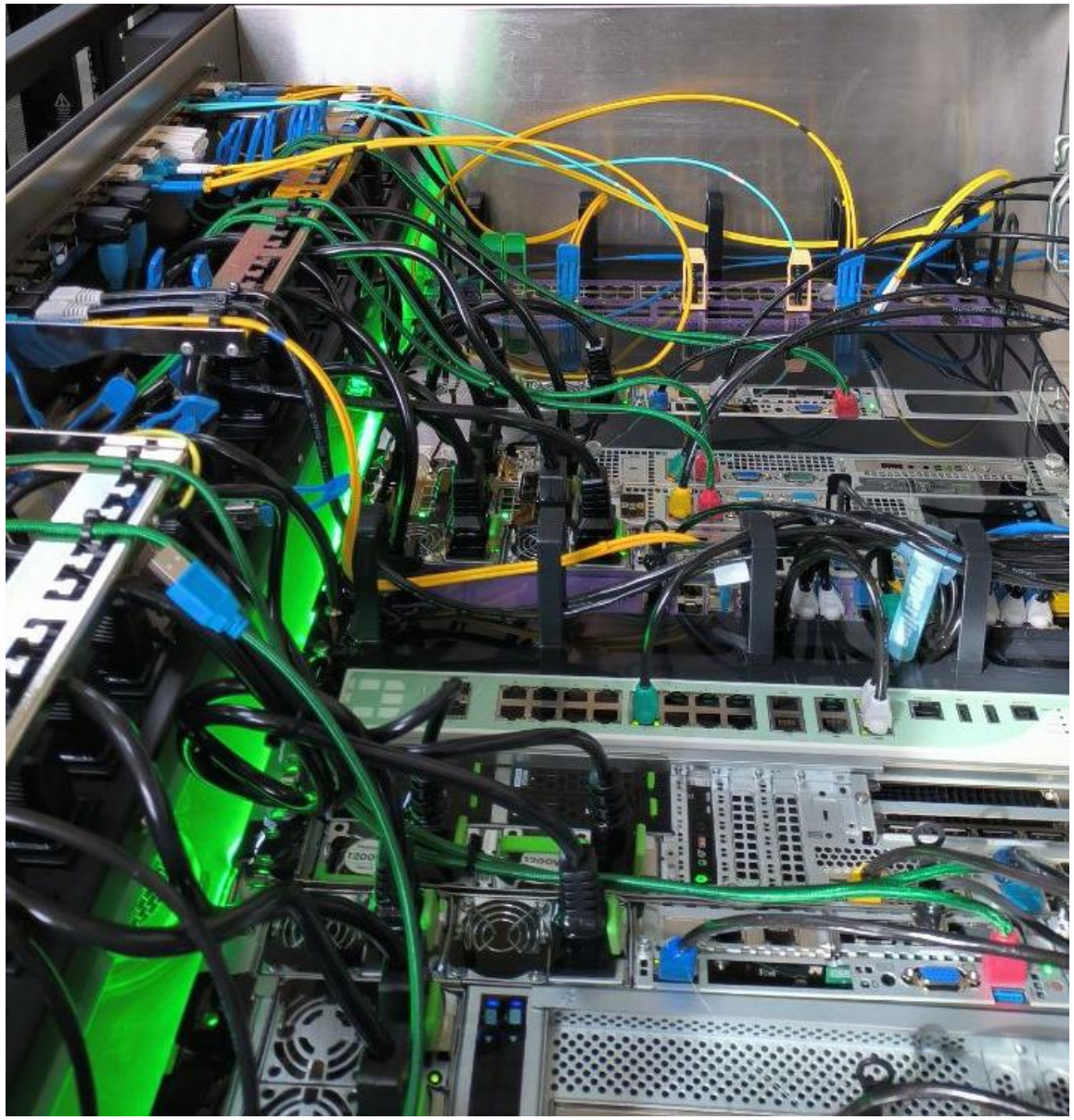
1,4 МВт
~85-100 кВт/ванну
Канада, Онтарио
2025

Специальные серверные платформы

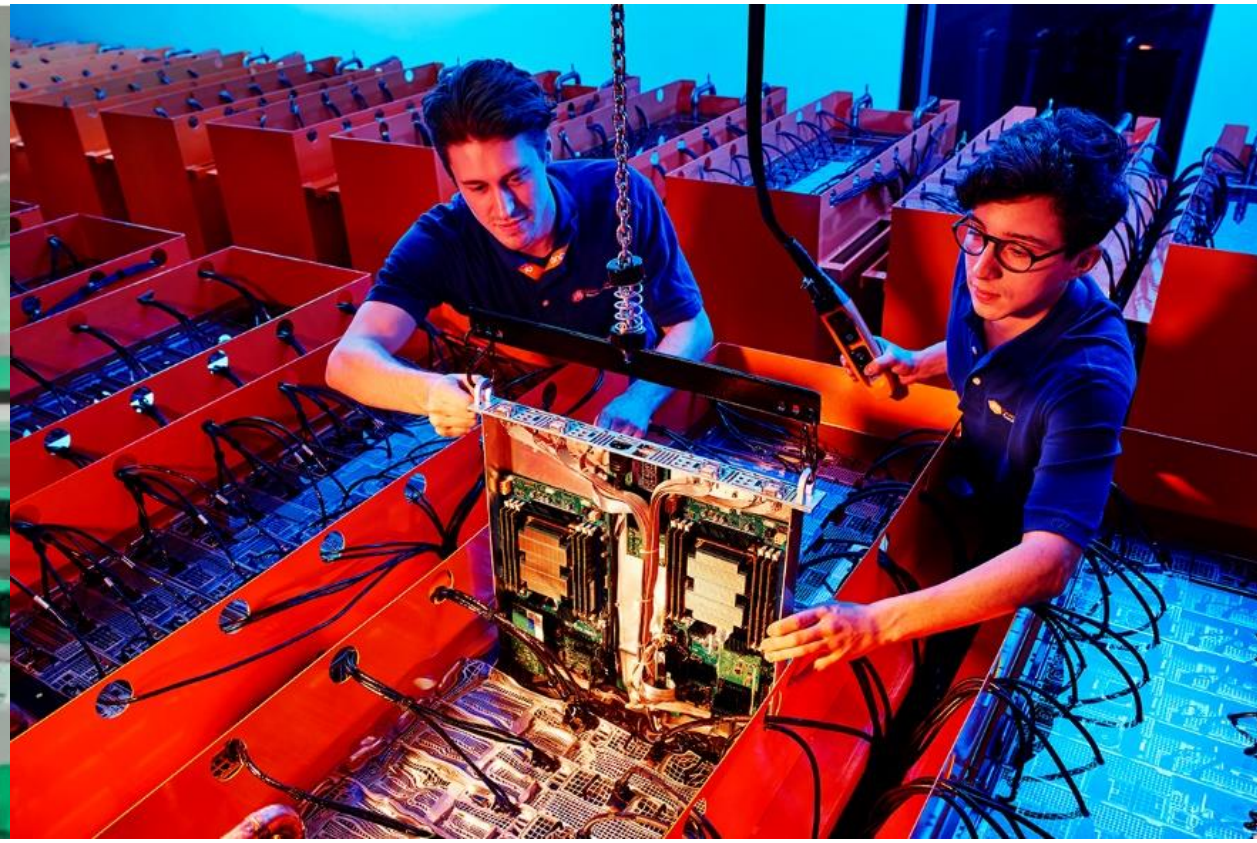


Подключение высокоскоростных интерфейсов

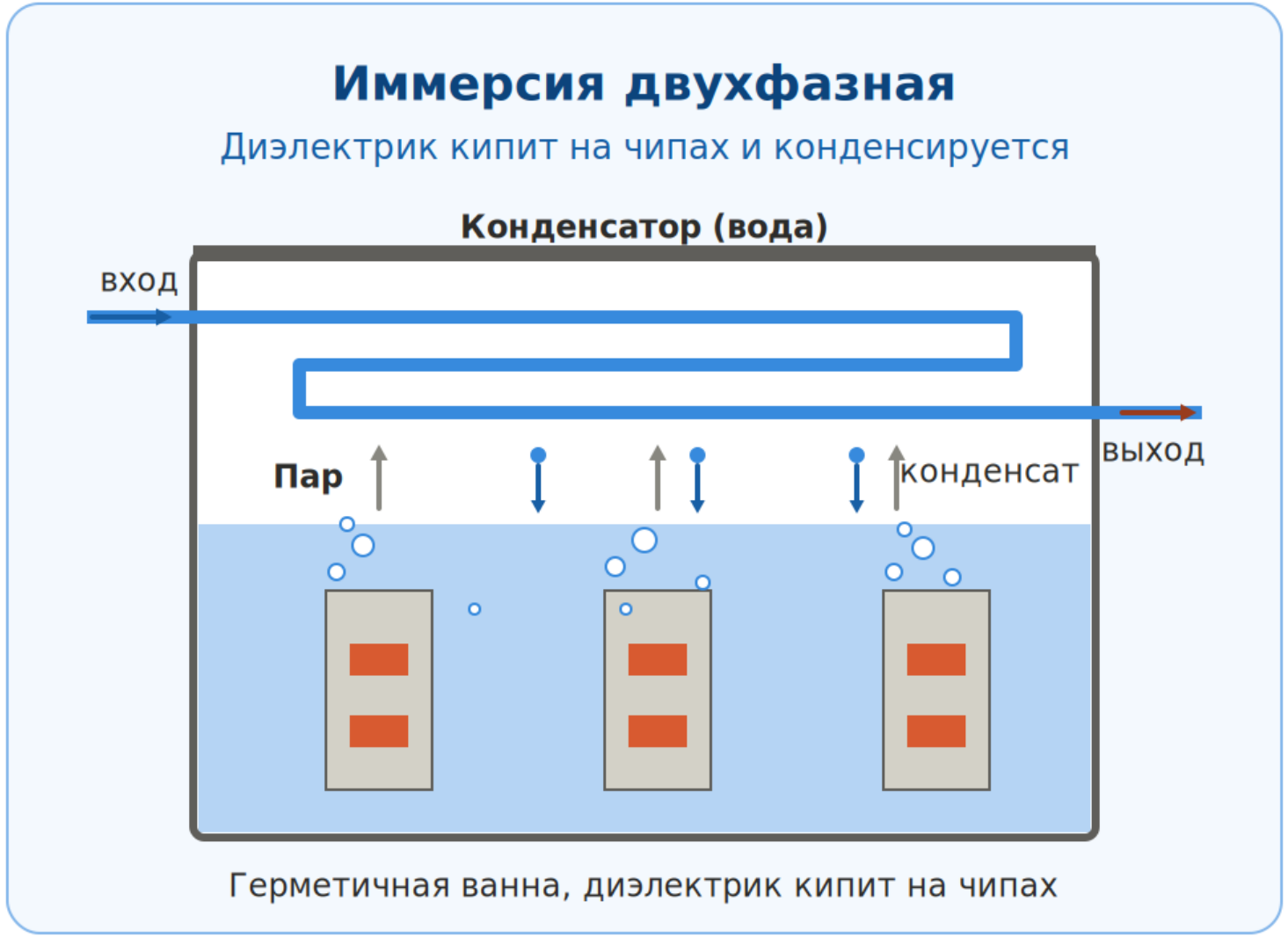




Плюсы, минусы, нюансы



Иммерсия двухфазная



Прям натурально кипит…но при низкой температуре

Фторированные жидкости от 3M

3M™ Novec™ Engineered Fluids

Properties	3M™ Novec™ 7000 Engineered Fluid	3M™ Novec™ 7100 Engineered Fluid	3M™ Novec™ 7200 Engineered Fluid	3M™ Novec™ 7500 Engineered Fluid
Formulation	Methoxyheptafluoro-propane	Methoxynonafluoro-butane	Ethoxynonafluoro-butane	2-trifluoromethyl-3-ethoxydodecofluorohexane
Average Molecular Weight	200	250	264	414
Boiling Point, °C	34	61	76	128
Liquid Density, g/ml @ 25°C	1.40	1.52	1.43	1.61
Global Warming Potential[1]	370	320	55	210
Typical Applications	Low temperature thermal management, freeze dryers, process solvent	Vapor degreasing, spray contact cleaner, lubricant carrier, thermal management	Vapor degreasing, movie film cleaning, lubricant carrier, thermal management	Thermal management, reliability testing, temperature calibration

[1] GWP–100 year ITH, $CO_2 = 1.0$

ТК - СВЯЗЬ

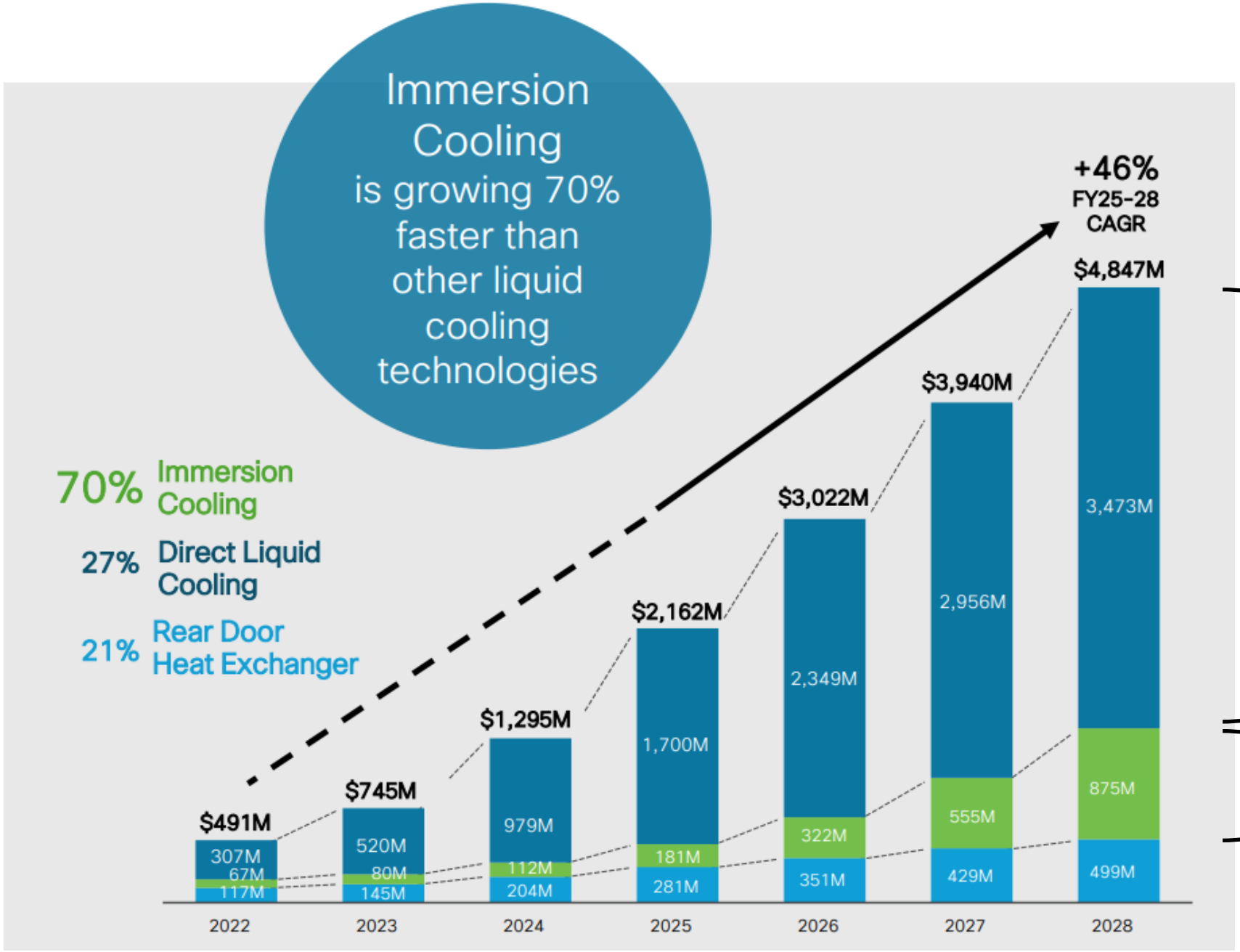
Имерсионный машзал (двухфазка)

ТК - СВЯЗЬ

Источник: https://liquidstack.com/about/legacy#timeline-y2018

Плюсы, минусы, нюансы

PFAS



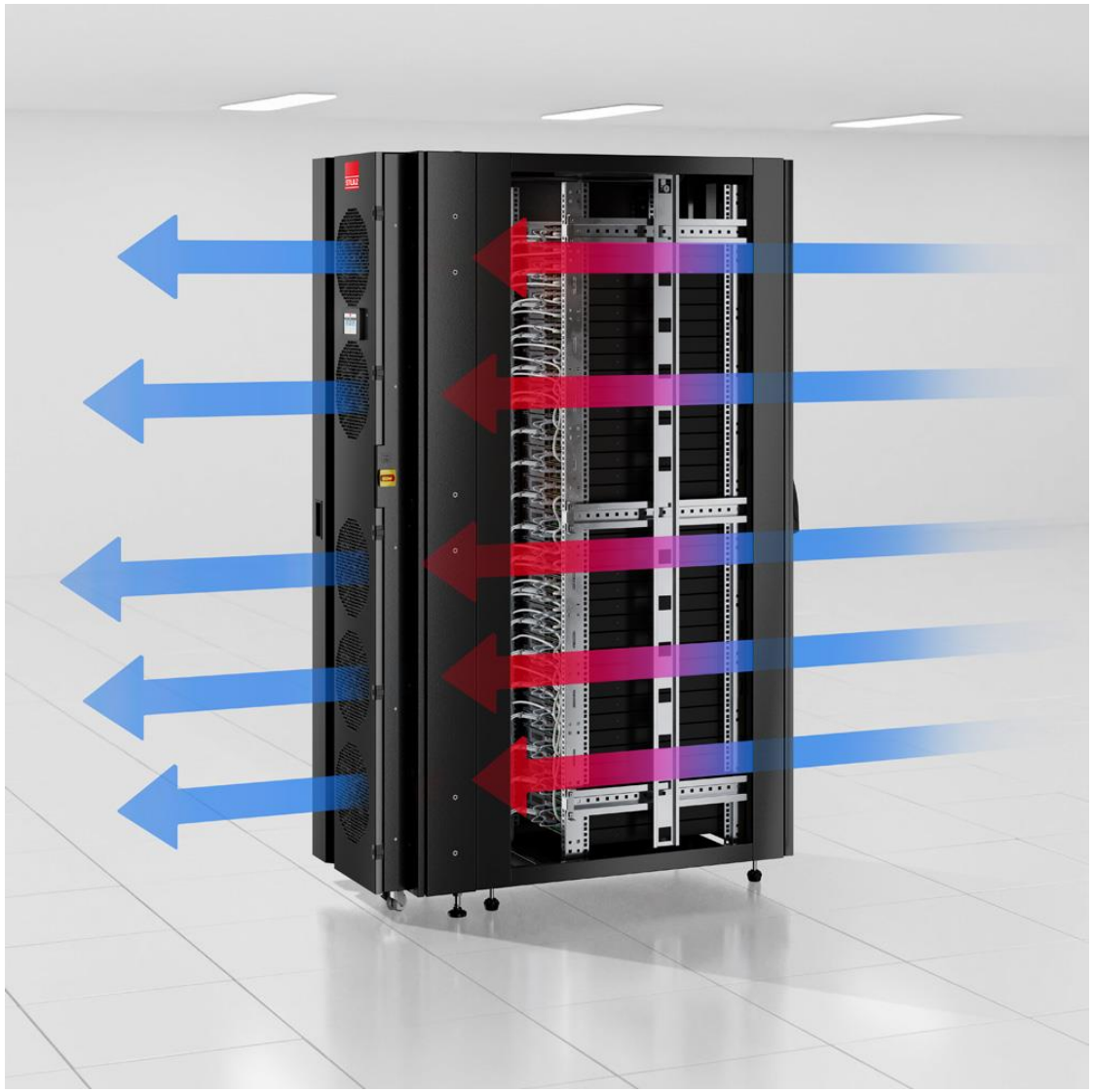
DLC (или Cold Plate) самое распространённое

Immersion самое быстрорастущее

x7,3 x5,3 x4,0

ТК - СВЯЗЬ

RDHx (rear door heat exchanger)



In-rack / In-row DX (фреоновое охлаждение)

Микрофлюидная система охлаждения

Выводы

CPU / GPU
5-10 кВт

Nvidia Hopper
20-50 кВт

Nvidia Blackwell
Vera Rubin
100-250 кВт

мы где-то тут

Rubin Ultra
600+ кВт

ТК - СВЯЗЬ

Спасибо за внимание!

Вопросики?