

РАЗВИТИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ЖИДКОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров, г. Таганрог
Левин И.И., Дордопуло А.И., Федоров А.М., Доронченко Ю.И.



Russian Supercomputing Days
Москва, 24-25 сентября 2018 г.

Докладчик: Юрий Иванович Доронченко

КРИЗИС СИСТЕМ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Изделие	Элементная база	Максимальный перегрев ПЛИС, °С	Максимальная температура ПЛИС при 25°С,	Тактовая частота	Потребляемая мощность, Вт (из расчета на 32 ПЛИС)
Ригель-2, 2013 г.	Virtex-6 XC6VLX240T	33,1	58,1	250 МГц	1255
Тайгета, 2014 г.	Virtex-7 XC7VX485T	47,9	72,9	250-300 МГц	1661
Макет, 2016 г.	Virtex USc XCVU095	60	85	400-500 МГц	3200

Допустимая температура работы ПЛИС составляет 65...70°С.

Для ПЛИС Virtex UltraScale, даже при температуре охлаждающего воздуха в вычислительном шкафу в 15°С, рабочая температура составит 75°С.

Процесс теплопередачи

ПЛИС

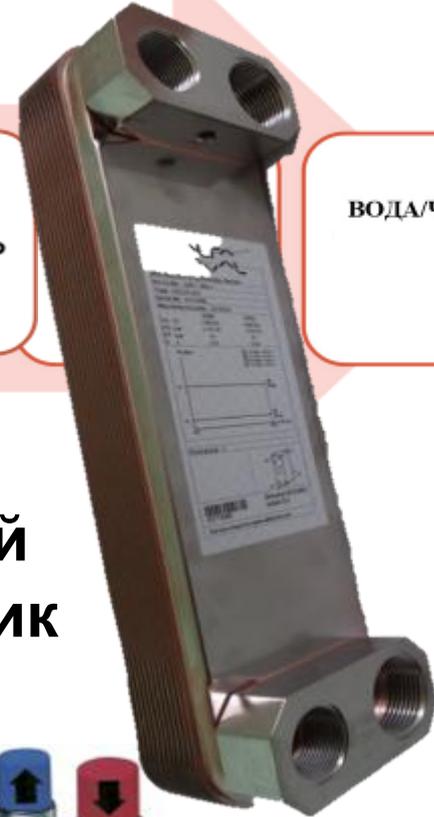
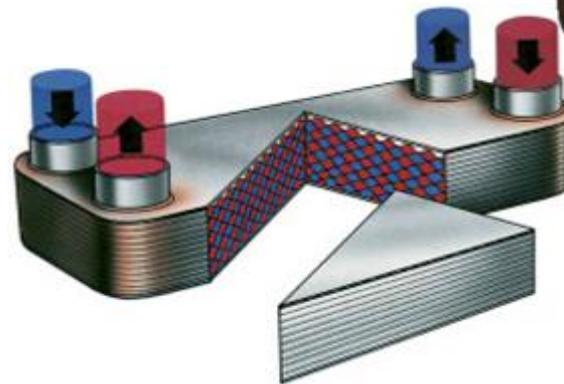
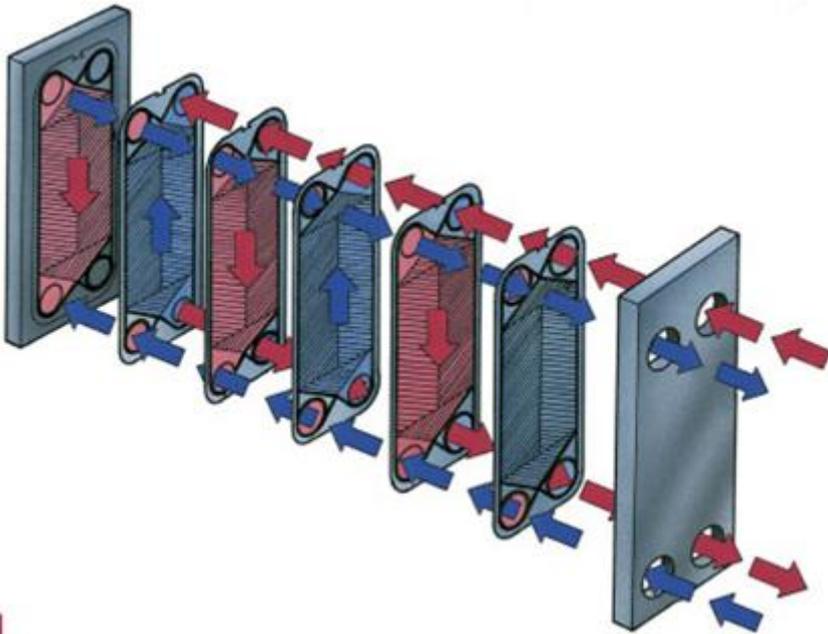
ТИ

Радиатор

Жидкость

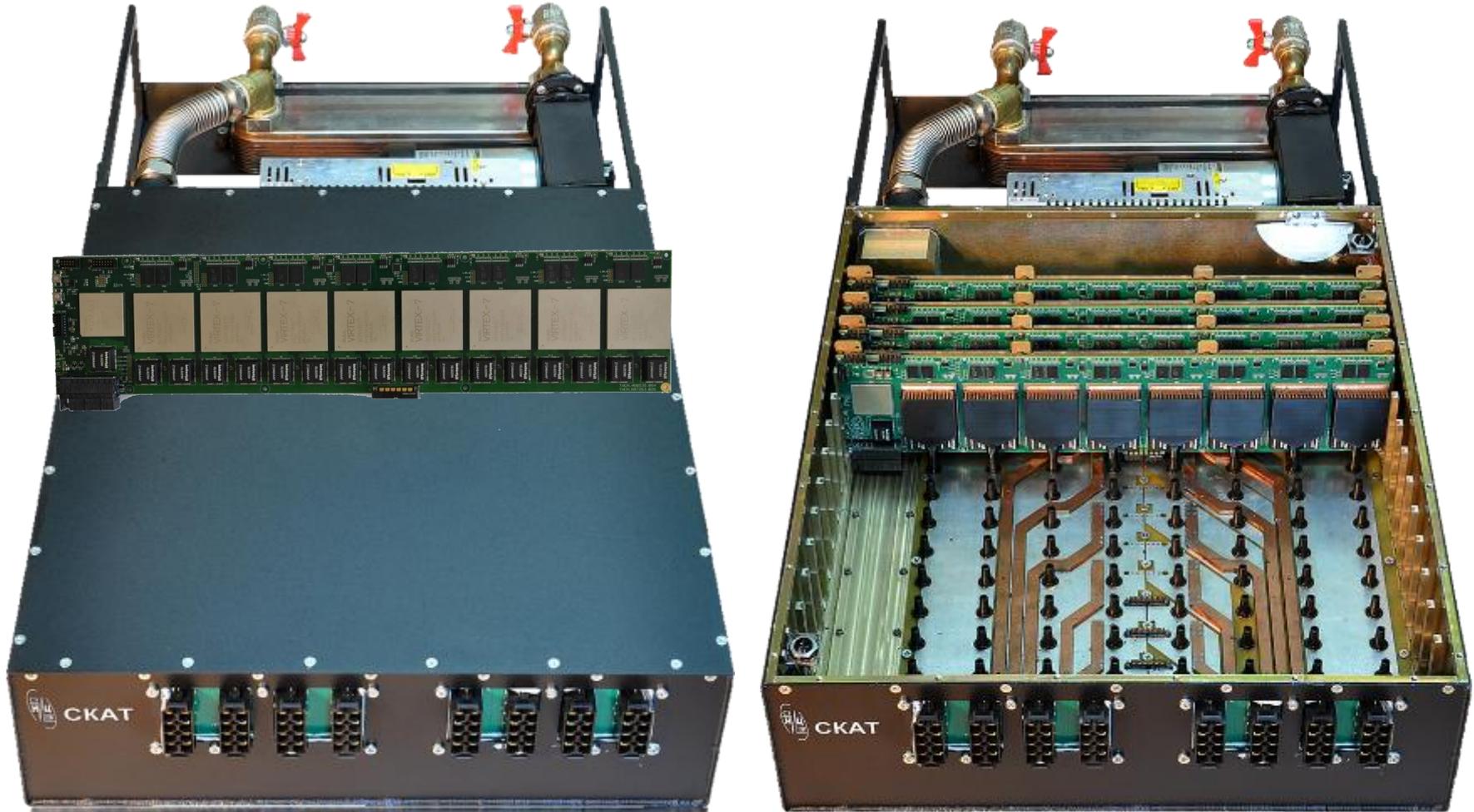
ВОДА/ЧИЛЛЕР

**Пластинчатый
теплообменник**

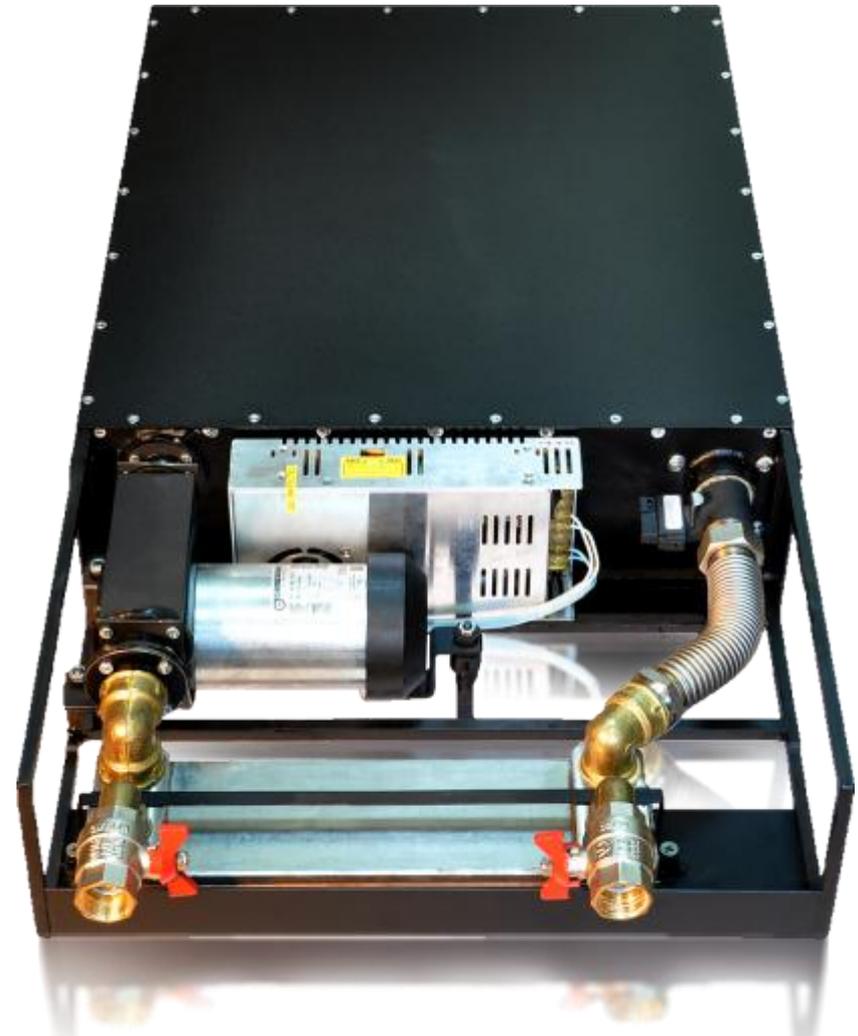


Необходимы эффективные решения на всех стадиях

Реконфигурируемый вычислительный блок «Скат» (Virtex-7), 2015 г.



Реконфигурируемый вычислительный блок «Скат» (Virtex-7), 2015 г.



Хладагент

Хладагент - масло маловязкое, диэлектрик, **МД-4,5** для охлаждения электронных компонентов ЭВМ в соответствии с техническими условиями ТУ 38.401-58-421-2015.

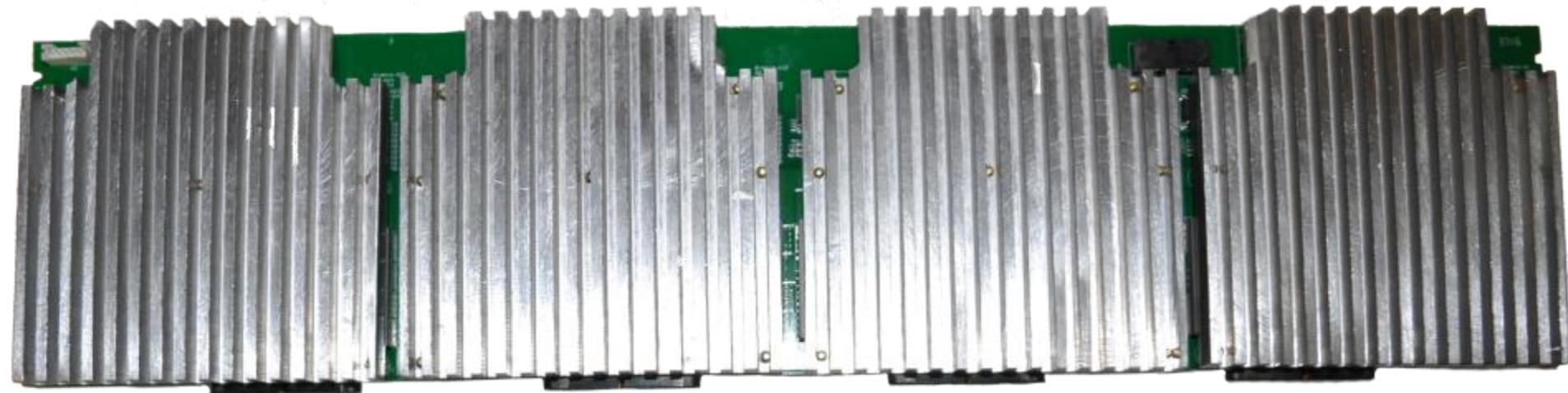
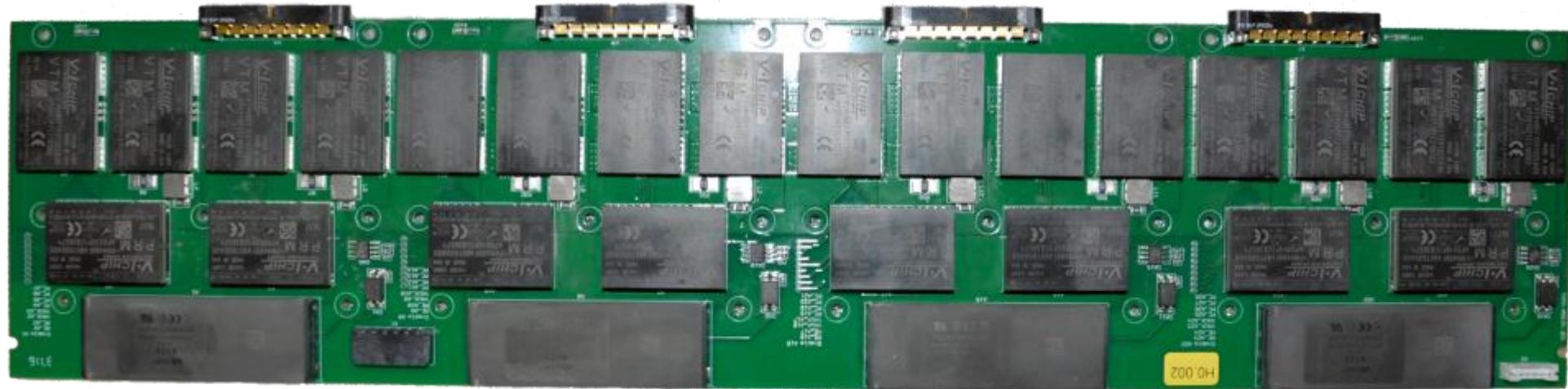
Основные характеристики:

Плотность при 20°C	866 кг/м ³
Кинематическая вязкость при 20°C	3,33 сСт
Теплопроводность при 20°C	0,111 Вт/(м·К)
Теплоемкость при 20°C	1,666кДж/(кг·К)
Коэффициент объемного расширения	0,0006 1/С°
Температура вспышки в закрытом тигле	не ниже 135°C
Электрическая прочность	не менее 280 МВ/м
Удельное электрическое сопротивление при 20°C	2,2×10 ¹² Ом
Удельное объемное электрическое сопротивление при 90°C	5·10 ¹² Ом·см
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90°C	0,0667%
Стоимость за 1 кг	770 руб.

Прорывные технологии, 2017 г.

- Новые платы вычислительного модуля (ПВМ):
 - ✓ ПЛИС Xilinx Virtex UltraScale;
 - ✓ топологические решения, высота платы – 100 мм;
 - ✓ преобразователи DC/DC, 12/1 В, 1000 А
- Погружная подсистема питания DC/DC, 380/12 В для 4 ПВМ
- Погружная плата управления – модуль загрузки и управления (МЗУ)
- Уникальная конструкция вычислительного блока
- Передовая подсистема охлаждения:
 - ✓ новый термоинтерфейс;
 - ✓ новые радиаторы оригинальной конструкции;
 - ✓ хладагент МД-4,5 с пониженной вязкостью;
 - ✓ эффективные насос и теплообменник
- Герметизация ВБ

Модуль питания «Неккар», 2017 г.



Входное напряжение 380 В
Мощность 4 кВт, 4 канала

Модуль загрузки и управления (МЗУ) «Неккар», 2017 г.

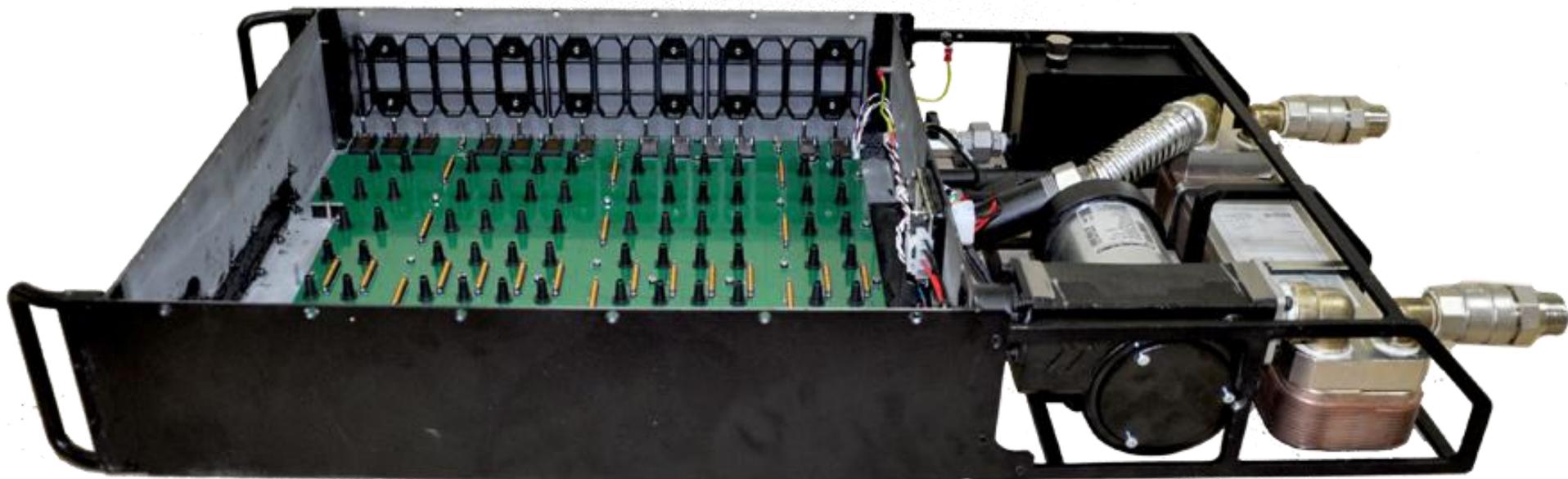


**Процессор Intel Skylake
(Core i5-6300U).**

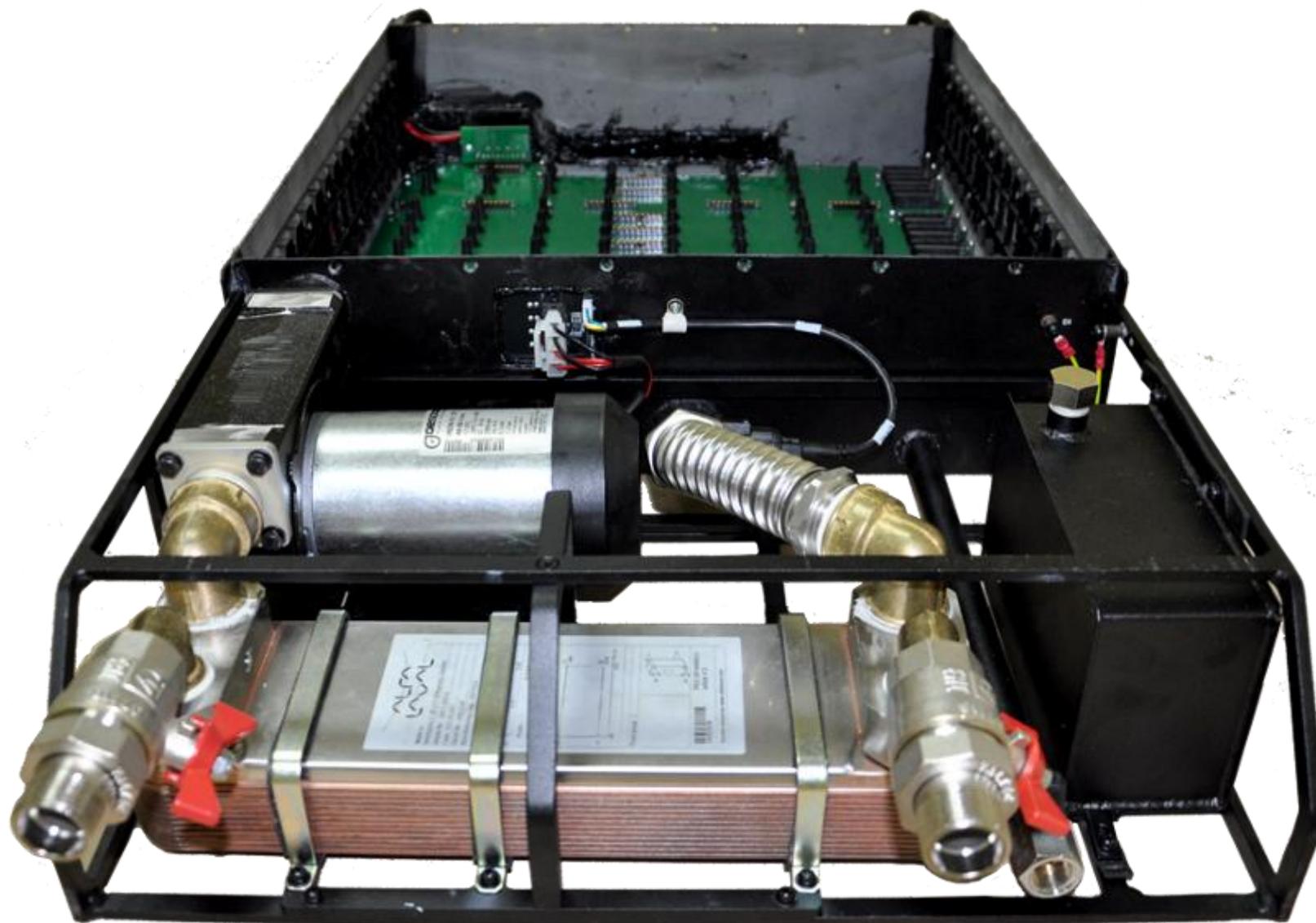
**Печатная плата 18 слоев,
габариты 490x109,7 мм.**

Оригинальный BIOS.

Реконфигурируемый вычислительный блок «Неккар», 2017 г.



Реконфигурируемый вычислительный блок «Неккар», 2017 г.



Реконфигурируемый вычислительный блок «Неккар», 2017 г.



Реконфигурируемый вычислительный блок «Неккар», 2017 г.



Реконфигурируемый вычислительный блок «Неккар», 2017 г.



96 ПЛИС Xilinx UltraScale.

Конструктив 3U, 19”.

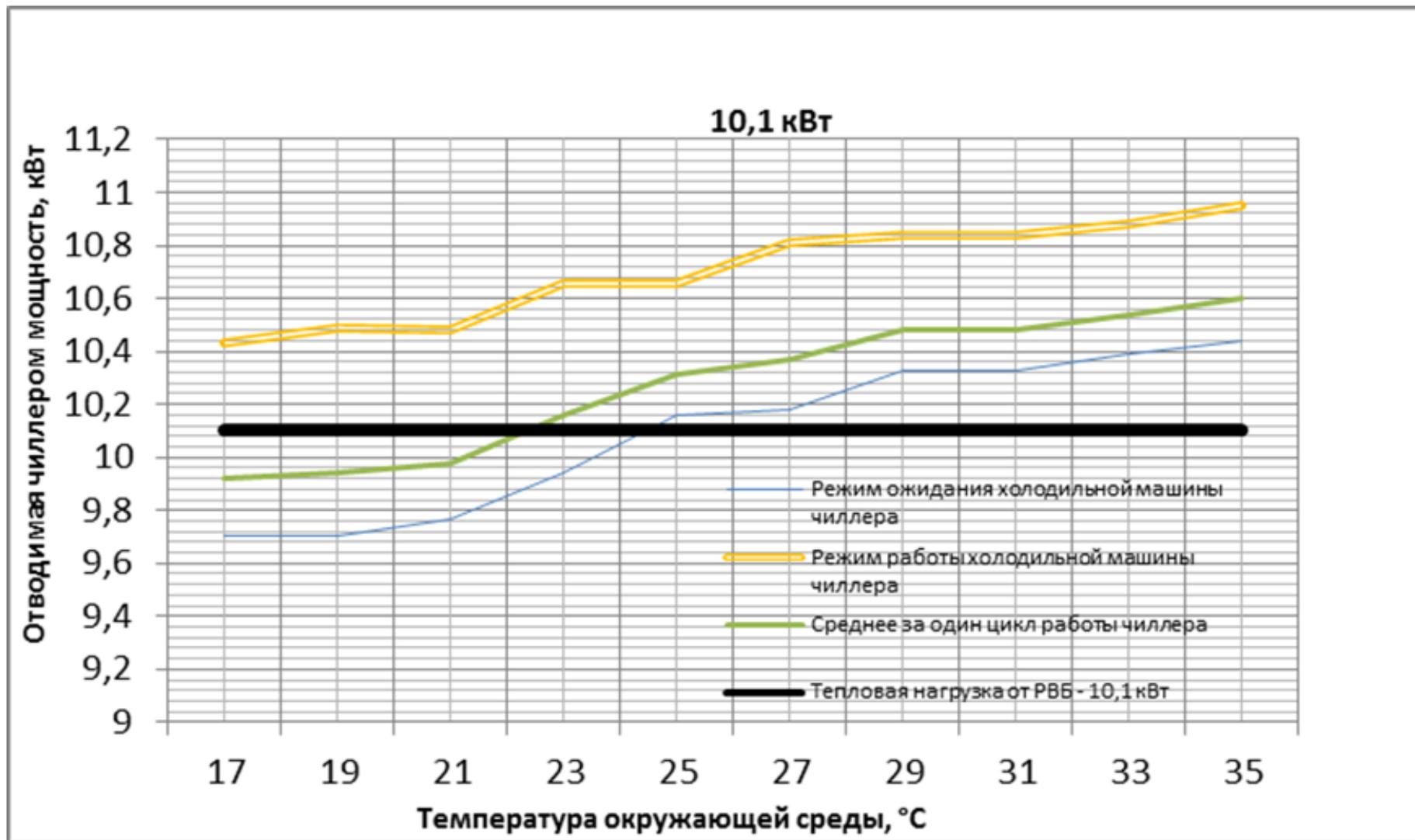
Потребляемая мощность - 10 кВт.

Производительность – 60 Tflops.

Производительность PBC на основе 16 PББ «Неккар» при решении задачи LU-разложения (тест LinPack) – 160 Tflops.

Производительность PBC на основе 16 PББ «Неккар» – 1000 Tflops.

Результаты исследований



Результаты исследований

	$T_{\text{хл}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{FPGA0}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{FPGA1}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{FPGAcp}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\text{cp}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$P, \text{ Вт}$
ПЛИС UltraScale XCU095, без нагрузки	18,6	24,9	24,5	24,7	6,1	32
ПЛИС UltraScale XCU095, с нагрузкой	20,1	55,0	54,4	54,7	34,6	177

$T_{\text{хл}}$ – температура хладагента, поступающего в радиатор, $^{\circ}\text{C}$;

T_{FPGA0} – температура кристалла ПЛИС FPGA0, $^{\circ}\text{C}$;

T_{FPGA1} – температура кристалла ПЛИС FPGA1, $^{\circ}\text{C}$;

T_{FPGAcp} – средняя температура FPGA, $^{\circ}\text{C}$;

ΔT_{cp} – разность между T_{FPGAcp} и $T_{\text{хл}}$, $^{\circ}\text{C}$;

P – тепловая мощность, выделяемая рабочей платой, Вт.

Повышение эффективности иммерсионной системы охлаждения

- **Увеличение эффективной площади поверхности теплообмена.**
- **Увеличение производительности насоса подачи хладагента.**
- **Повышение надежности системы жидкостного охлаждения посредством применения погружных насосов.**

Повышение технологичности производства

- Медных и алюминиевых радиаторов
- Корпуса и деталей
- Пластиковых деталей
- Резиновых деталей
- Герметизация

Разработаны и изготовлены оснастки, пресс-формы.

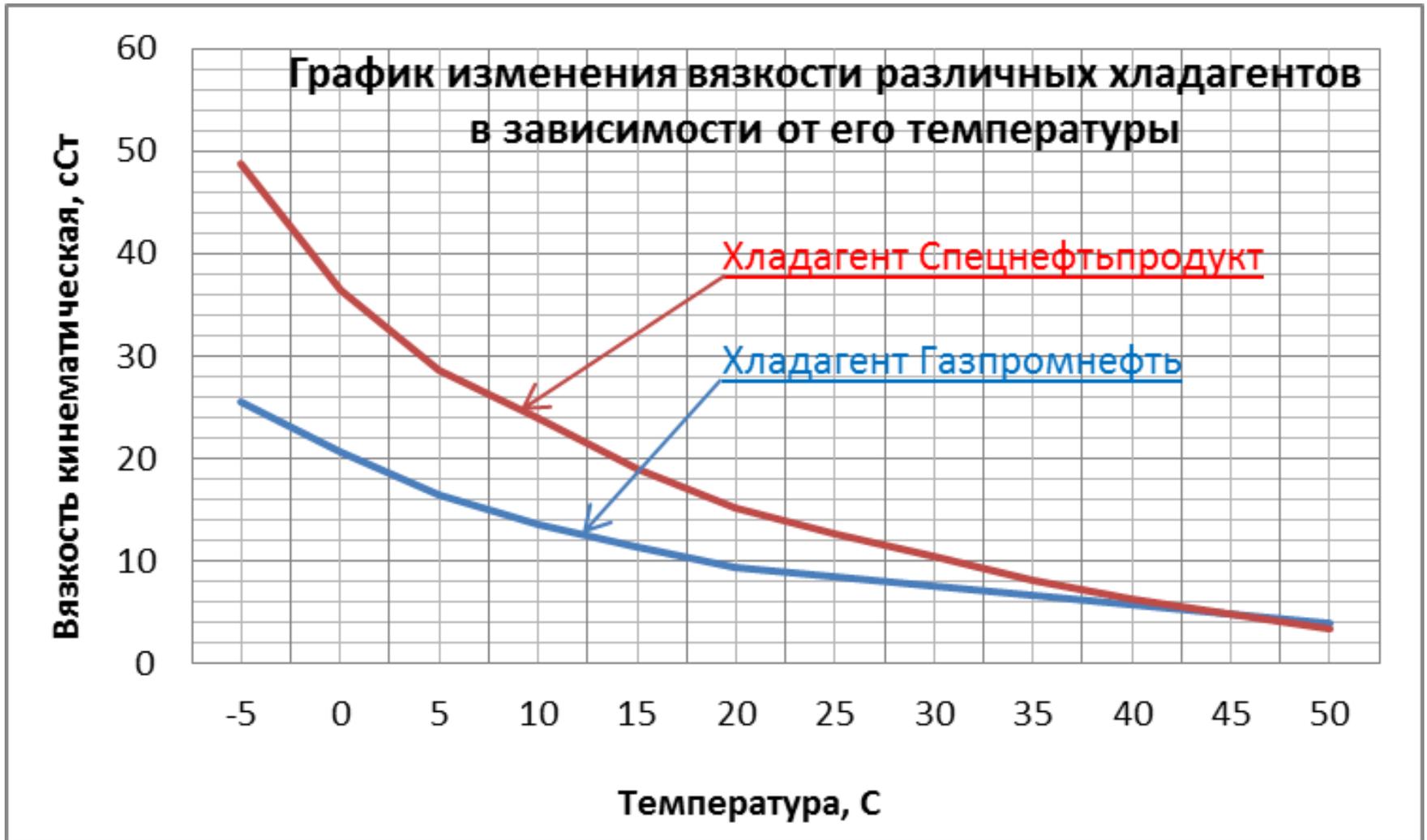
Модернизированный хладагент

Новый хладагент - масло маловязкое, диэлектрик МД-4,4 Gazpromneft для охлаждения электронных компонентов ЭВМ в соответствии с СТО 77820966-067-2018.

Основные характеристики:

Плотность при 20°C	866 кг/м ³
Кинематическая вязкость при 50°C	4 сСт
Теплопроводность при 20°C	0,111 Вт/(м·К)
Теплоемкость при 20°C	1,666 кДж/(кг·К)
Коэффициент объемного расширения	0,0006 1/С°
Температура вспышки в открытом тигле	не ниже 135°C
Пробивное напряжение	не менее 30 кВ
Температура самовоспламенения	Не ниже 165°C
Стоимость за 1 кг	800 руб.

Вязкость хладагентов



Модернизация радиатора



Конструкция нового радиатора с
резьбовой насечкой в межреберном
пространстве - увеличение площади
теплосъема почти в 3 раза

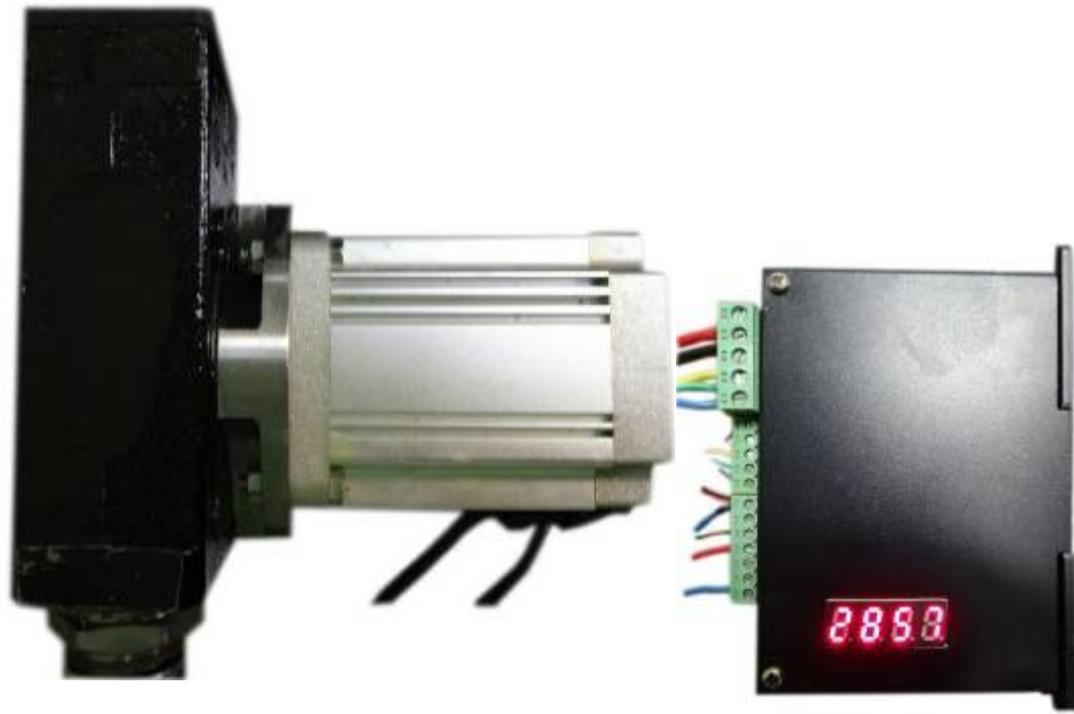
Оснащение насоса бесколлекторным электродвигателем



Напряжение питания	48В
Номинальная мощность	400Вт
Максим. частота вращения	4500 об/мин
Номин. крутящий момент	0,85 Нм

Повышение номинальной мощности с 300 до 400 Вт и частоты вращения с 3000 до 4500 об/мин позволило увеличить производительность насоса при его неизменных габаритах, тем самым увеличив поток хладагента через радиаторы.

Бесколлекторная схема электродвигателя обеспечивает ресурс работы до 20 000 часов.



Изделие «Неккар», 2018



Изделие «Неккар», 2018



Изделие «Неккар», 2018



ULTRASCALE+



Архитектура UltraScale+

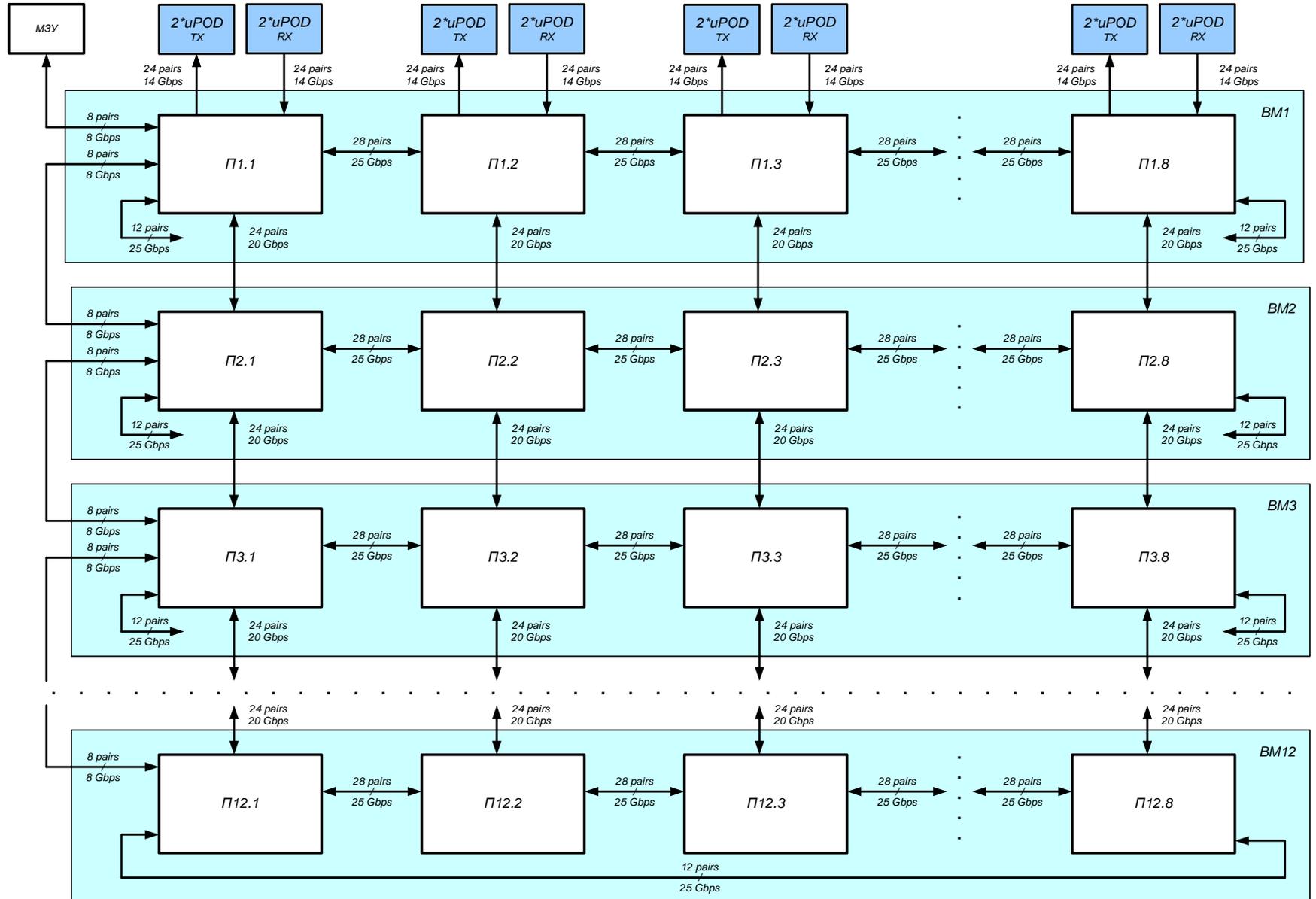
- ✓ архитектура ASIC-класса
- ✓ 16-нм техпроцесс
- ✓ до 3780K Logic Cells
- ✓ до 5376 блоков BRAM 18кбит
- ✓ до 1280 блоков UltraRAM 4K*72кбит
- ✓ до 12288 блоков DSP
- ✓ контроллеры PCIe, Ethernet
- ✓ GTY-трансиверы до 32,75 Гбит/с
- ✓ низкое энергопотребление

**Лучшая удельная
производительность
на единицу объема
кристалла ПЛИС среди FPGA**

Назначение ПЛИС UltraScale+:

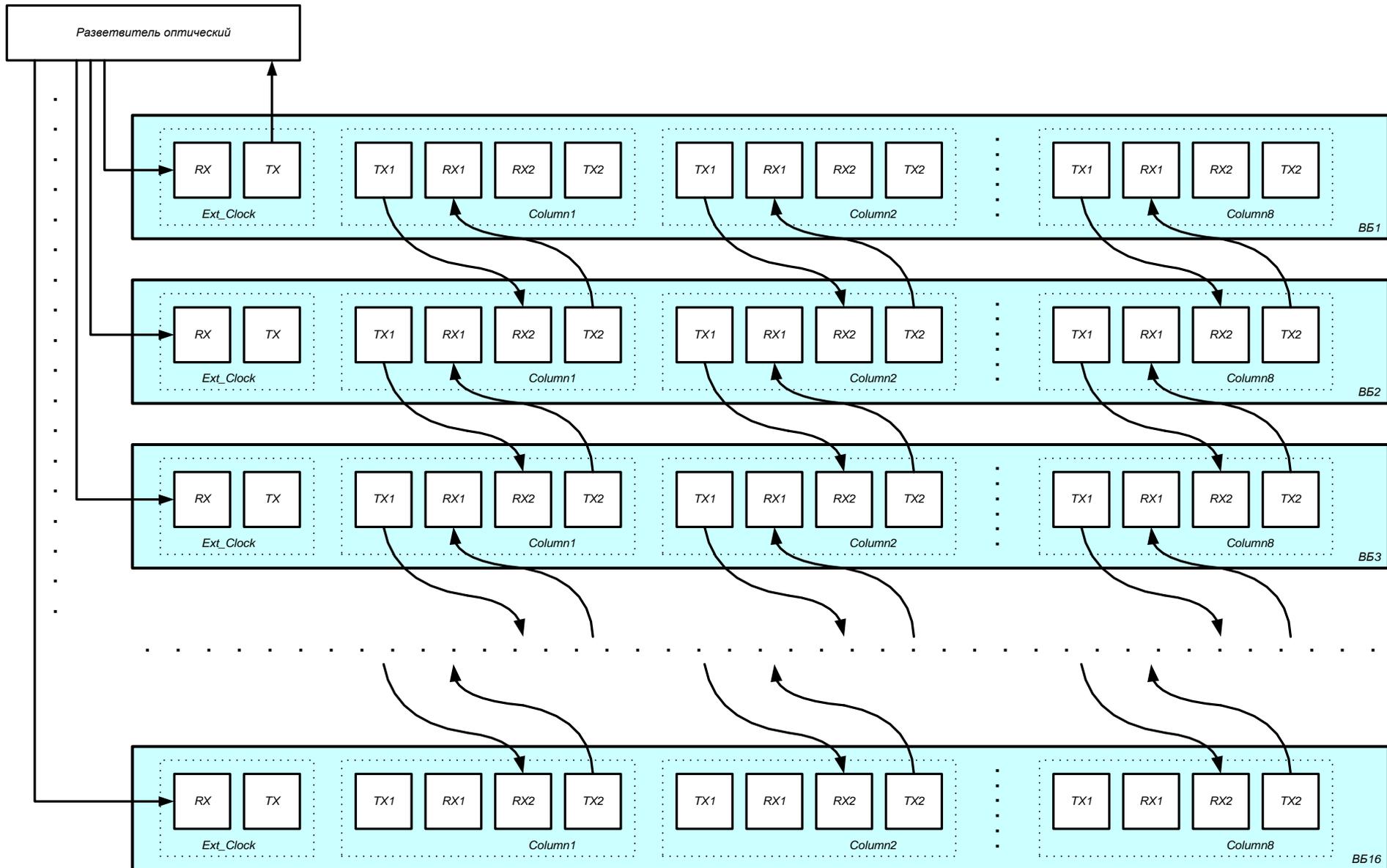
- высокопроизводительные вычисления;
- обработка больших потоков данных;
- прототипирование заказных микросхем.

Схема связей РВБ «Арктур»



Скорость информационных обменов РВБ - 209 Тбит/с

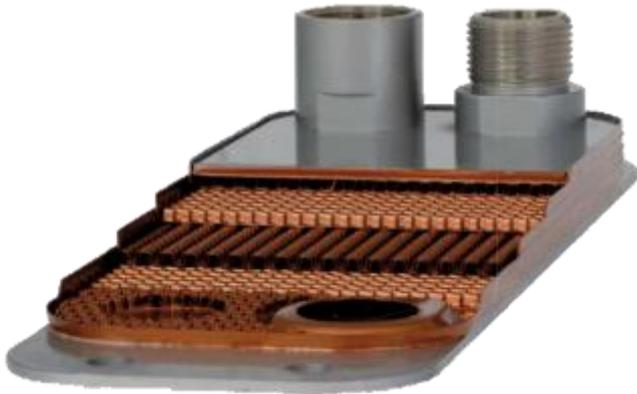
Схема связей между РВБ «Арктур»



Скорость информационных обменов вычислительной стойки - 3428 Тбит/с

Теплообменник

Производитель – «FUNKE» (Германия)



Серия TPL - для охлаждения гидравлических и моторных масел водой.

Ширина канала до 80% больше, чем у классических паяных водо-водяных теплообменников.

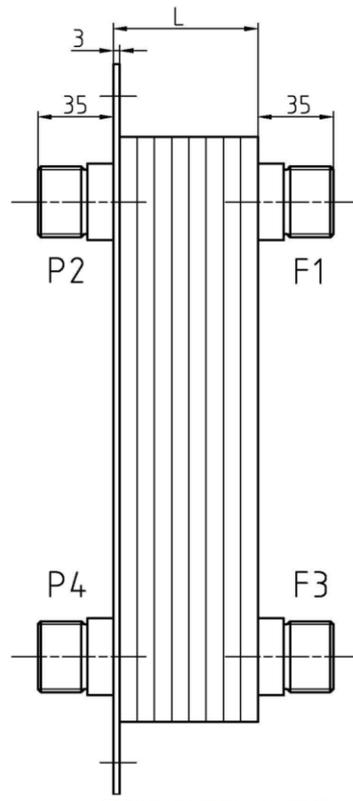
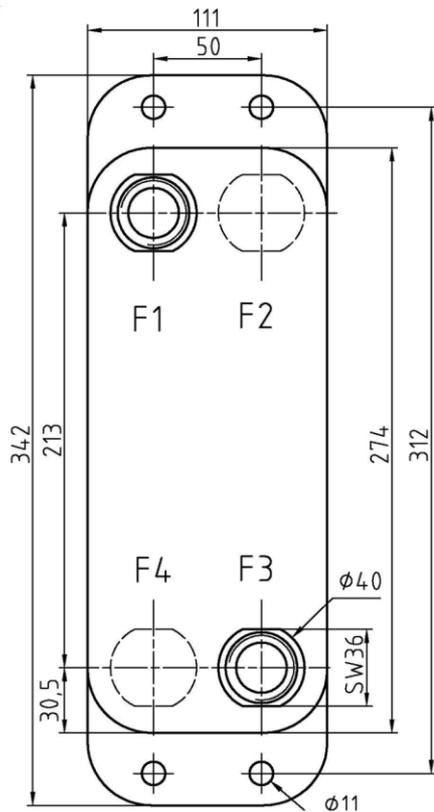
Специальные встроенные турбулизаторы. Эффективные диагональные направляющие. Повышенные требования к технологии пайки, исключающие возможность перемешивания двух сред.



Увеличилось количество пластин с 24 до 36 – рост мощности в 1,5 раза (18 кВт), но и рост габаритов.

Доработаны пластины, изменено расположение штуцеров.

Теплообменник



Specification sheet

FUNKE
BPHE-Designer V.1.03.1.1

Project: T-6816

Date: 05.04.2017

Contact: Igor Vasilyev

Phone: +7 499 706-80-71 *306

E-Mail: vasiliev@funke-rus.ru

Plate Heat Exchanger, brazed

Item:	Unit	TPL 00-K-54-22	
-------	------	----------------	--

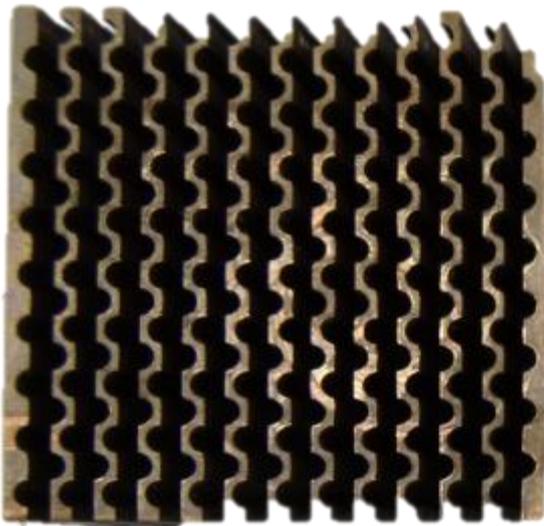
Technical data per HX	hot		cold	
	Oil by QL		Water	
Mass flow	[kg/s]	0.4513	[kg/s]	0.5357
Volume flow	[m ³ /h]	1.9000	[m ³ /h]	1.9289
Inlet temperature	[°C]	41.89	[°C]	7.00
Outlet temperature	[°C]	18.00	[°C]	15.00

Physical properties		Inlet		Outlet	
		Dyn. viscosity	[cP]	4.500	4.500
Density	[kg/m ³]	855.0	855.0	1000.9	998.8
Specific heat capacity	[kJ/kgK]	1.670	1.670	4.204	4.196
Therm. conductivity	[W/mK]	0.111	0.111	0.616	0.621

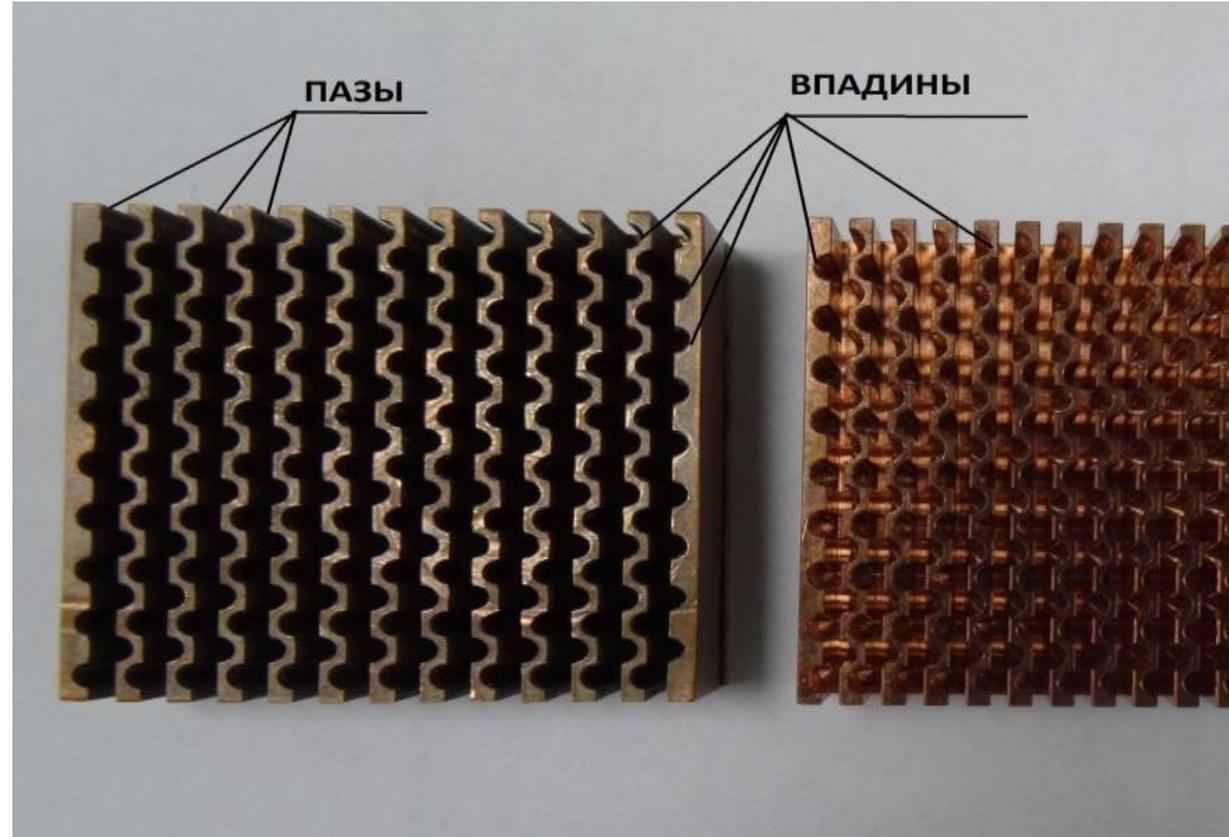
PHE characteristic values				
Heat duty	[kW]	18.00		
Transfer area	[m ²]	1.86		
Log./Effective temperature difference	[K]	17.78 / 17.78		
Heat transfer coeff. req./act.	[W/m ² K]	546 / 584		
Fouling factor total	[m ² K/W]	0.00011996		
Overdesign	[%]	7.01		
Pressure loss	[mWs]	0.32	[mWs]	0.22
Number of plates		54		

Construction			
Weight dry/wet	[kg]	ca. 13.1/18.0	
Volume	[dm ³]	2.65	2.65
max. Pressure	[bar]	30	
max. Temperature	[°C]	200	
Material	Solder	99.9% Cu	
	Plate material	1.4404 / AISI 316L	
Fastening	Extended end plate		
Connections	2 x front, 2 x back		
	F1 => F3, Threaded pipe, female, G 1"		
	P4 => P2, Threaded pipe, female, G 1"		

Радиатор



Радиатор серийный
с резьбовой насечкой

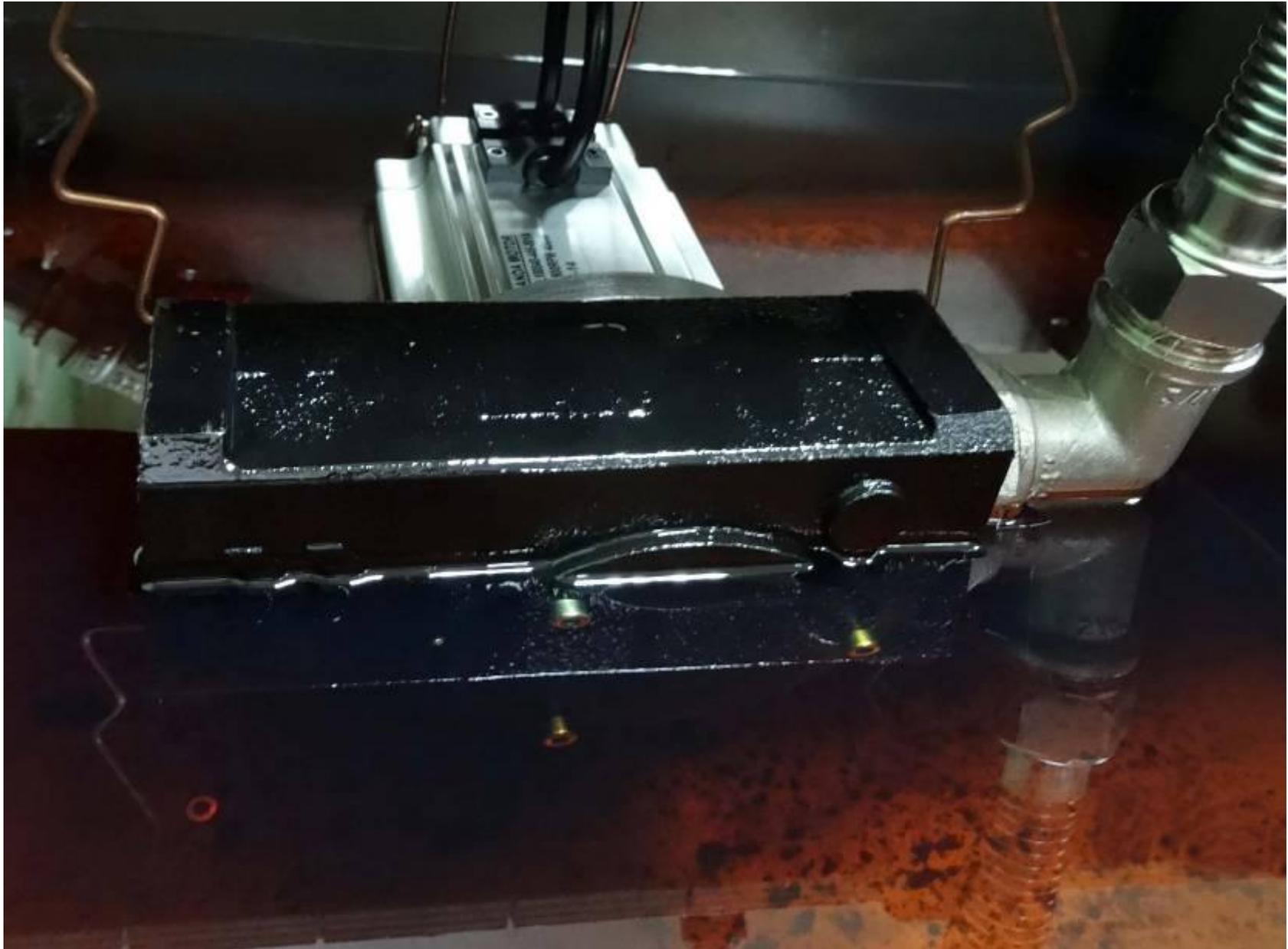


Увеличение площади теплосъема за счет
уменьшения толщины ребер и
увеличения числа пазов и впадин.

Сравнительный анализ радиаторов

Параметры	Серийный	Экспериментальный А	Экспериментальный Б	Экспериментальный В
Конструктив радиатора	12 пазов / 252 впадины	14 пазов / 252 впадины	16 пазов / 416 впадин	22 паза / 792 впадины
Площадь теплосъема, мм ²	1158	1351	1654	2991
Изменение площади теплосъема, %	100	117	143	258
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К)	20,70	21,79	23,09	25,44
Габаритные размеры, мм	12 × 38 × 38			12 × 52 × 52

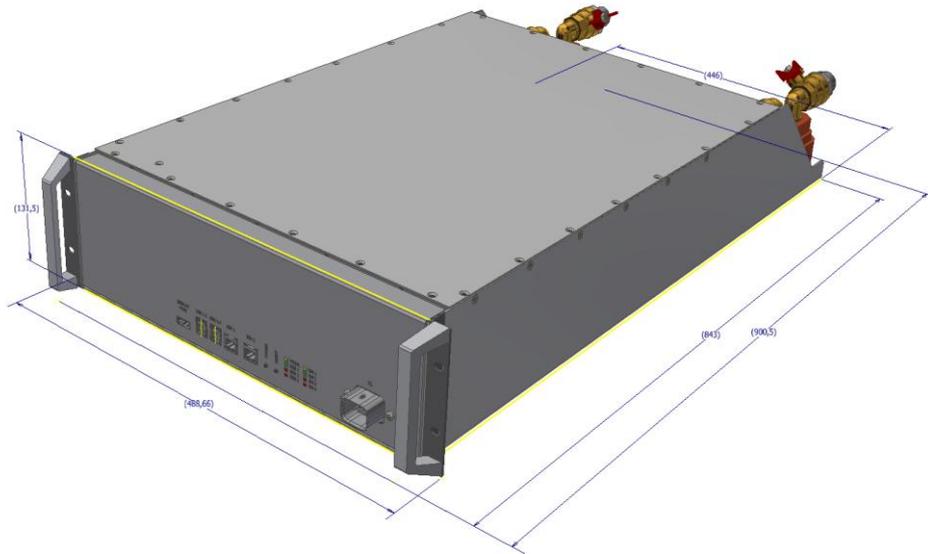
Погружной насос



Стенд для исследования погружного насоса



РВБ «Арктур»



96 ПЛИС Xilinx UltraScale+.

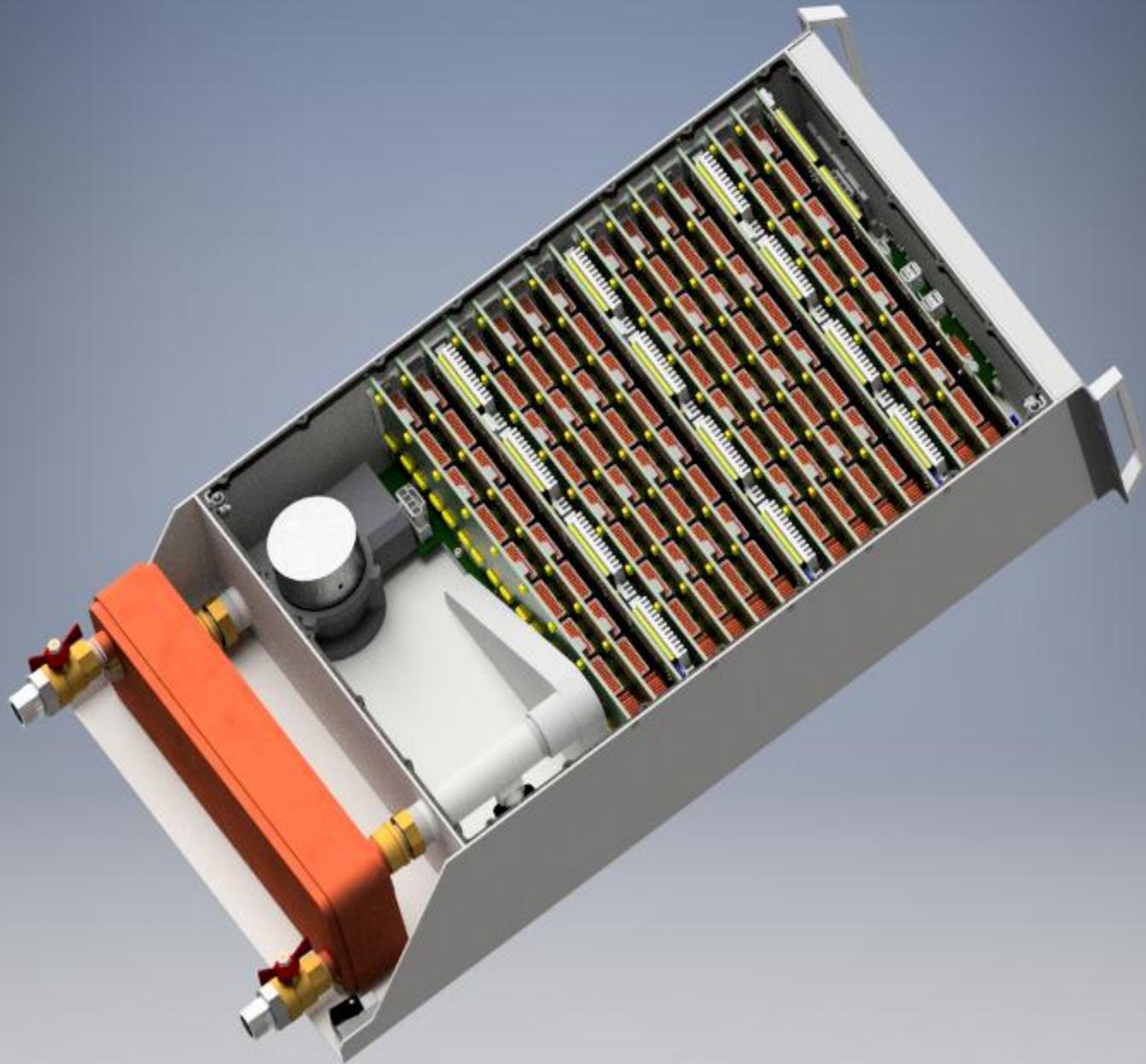
Конструктив 3U, 19”.

Производительность – 240 Tflops.

Производительность РВС на основе 16 РВБ «Арктур» при решении задачи LU-разложения (тест LinPack) – 500 Tflops.

Пиковая производительность РВС на основе 16 РВБ «Арктур» – 3,8 Pflops.

РВБ «Арктур»



Плотность компоновки РВС разных поколений

Изделие	ПЛИС на плате	Плат в блоке	Блоков в стойке	Всего ПЛИС
Процион 6У, 2007 г.	8	4	6	192
Алькор 6У, 2009 г.	16	4	6	384
Ригель 2У, 2011 г.	8	4	16	512
Тайгета 2У, 2013 г.	8	4	16	512
Неккар 3У, 2016 г.	8	12	12-16	1152-1536
Арктур 3У, 2019 г.	8	12	16	1536

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!