

# 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

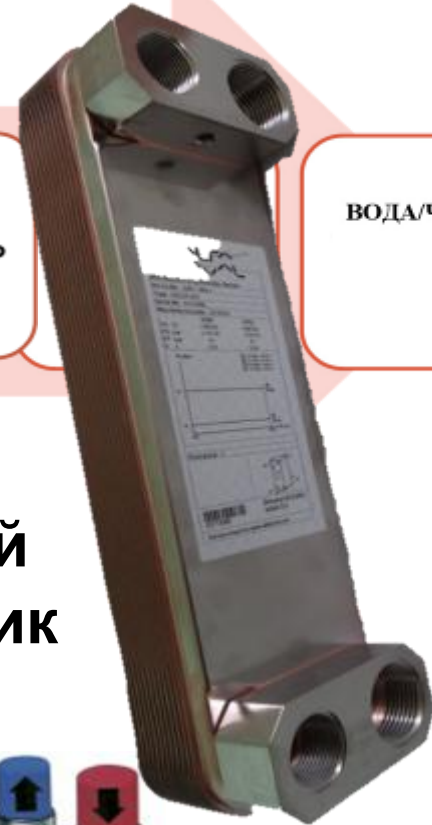
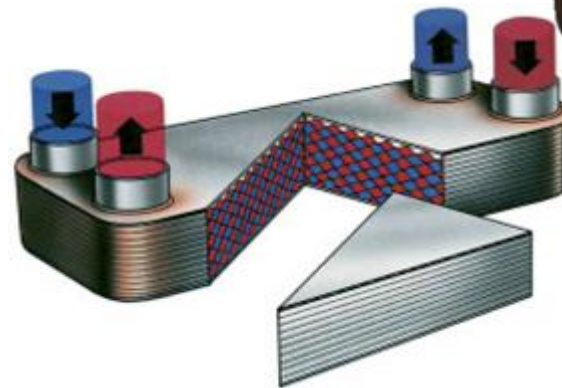
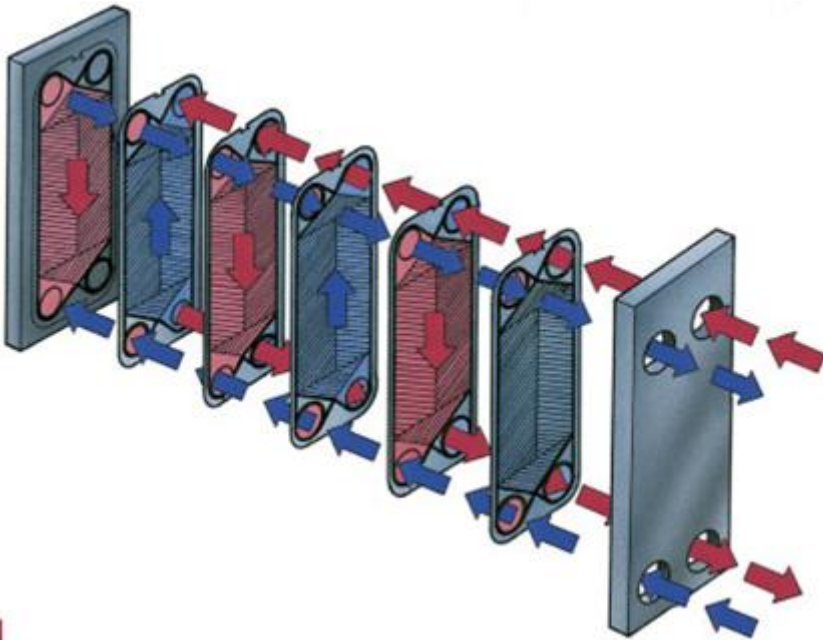
ТИ

Радиатор

Жидкость

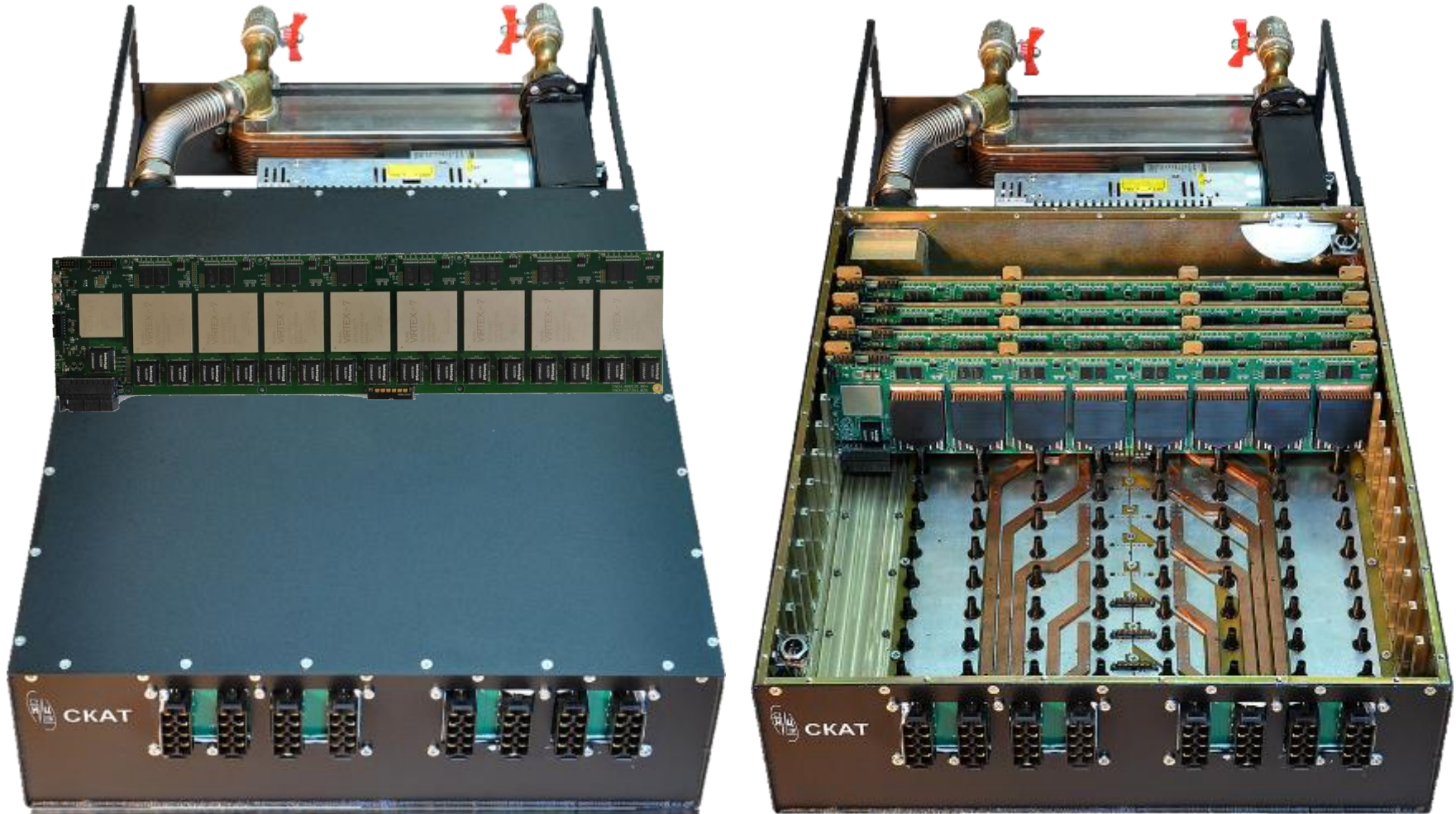
ВОДА/ЧИЛЛЕР

**Пластинчатый  
теплообменник**

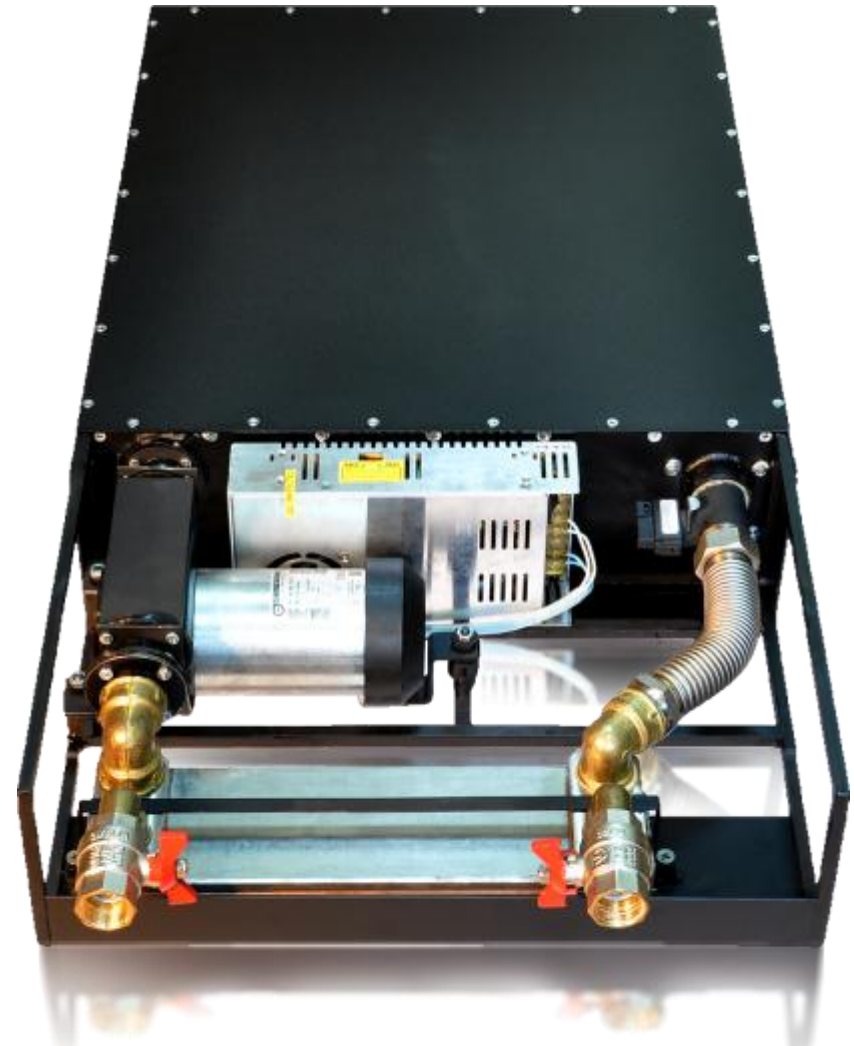


**Необходимы эффективные решения на всех стадиях**

# 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.

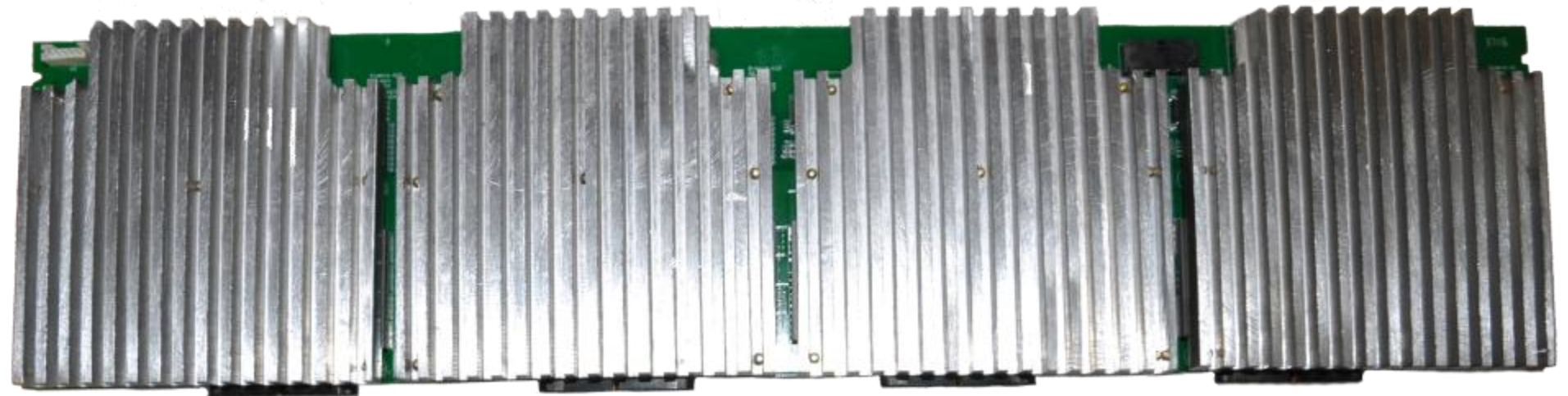
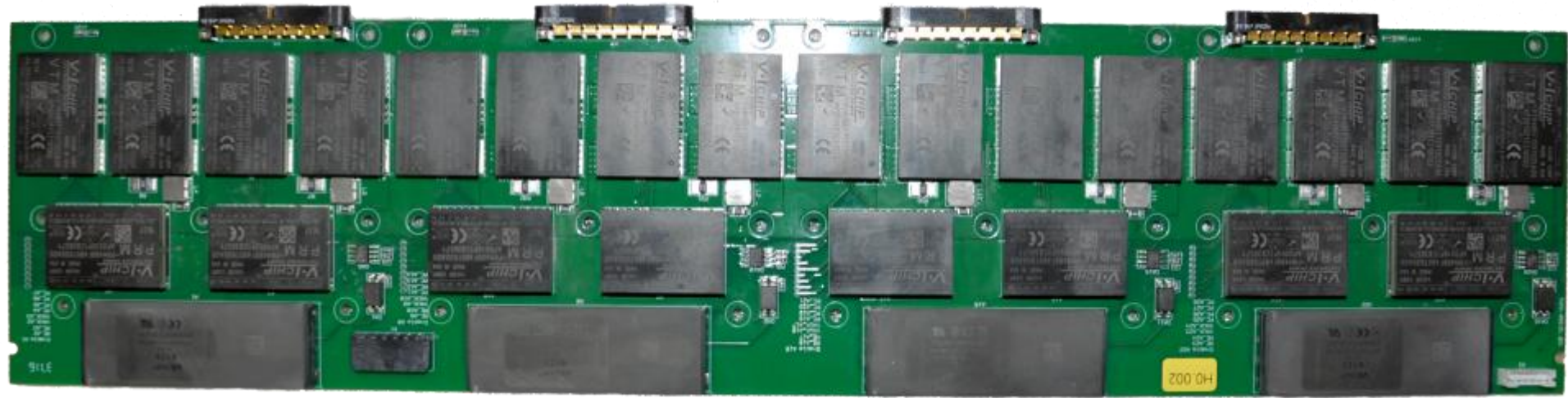
## Основные характеристики:

Плотность при 20°C	866 кг/м <sup>3</sup>
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 <sup>12</sup> Ом
Удельное объемное электрическое сопротивление при 90°C	5·10 <sup>12</sup> 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.

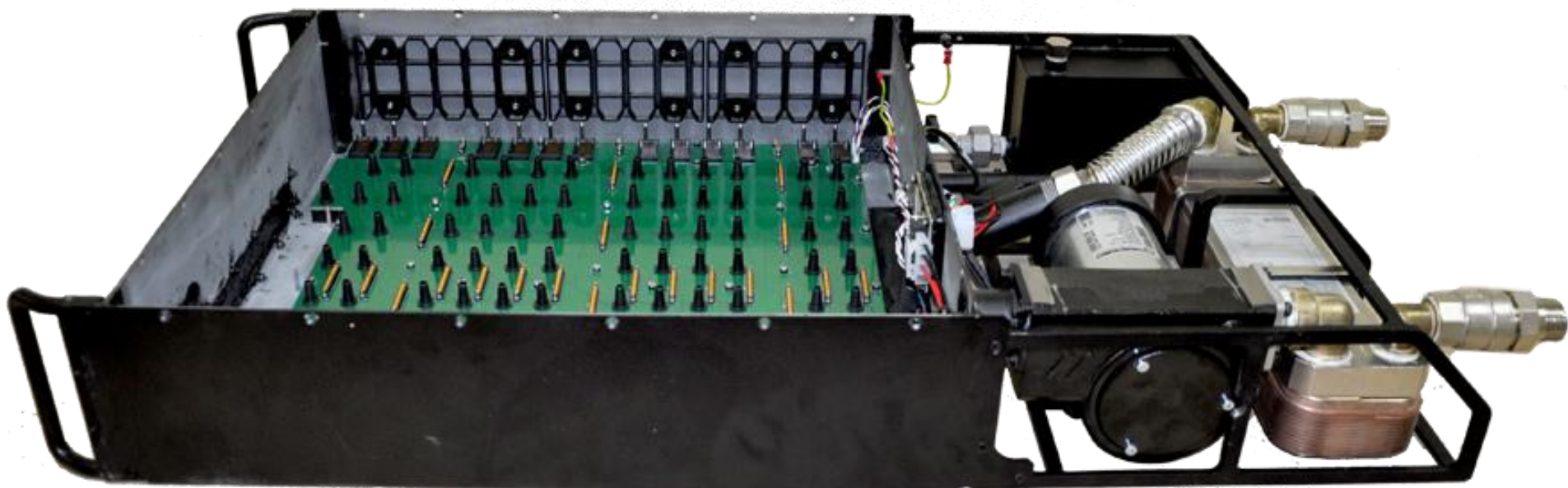


**Процессор Intel Skylake  
(Core i5-6300U).**

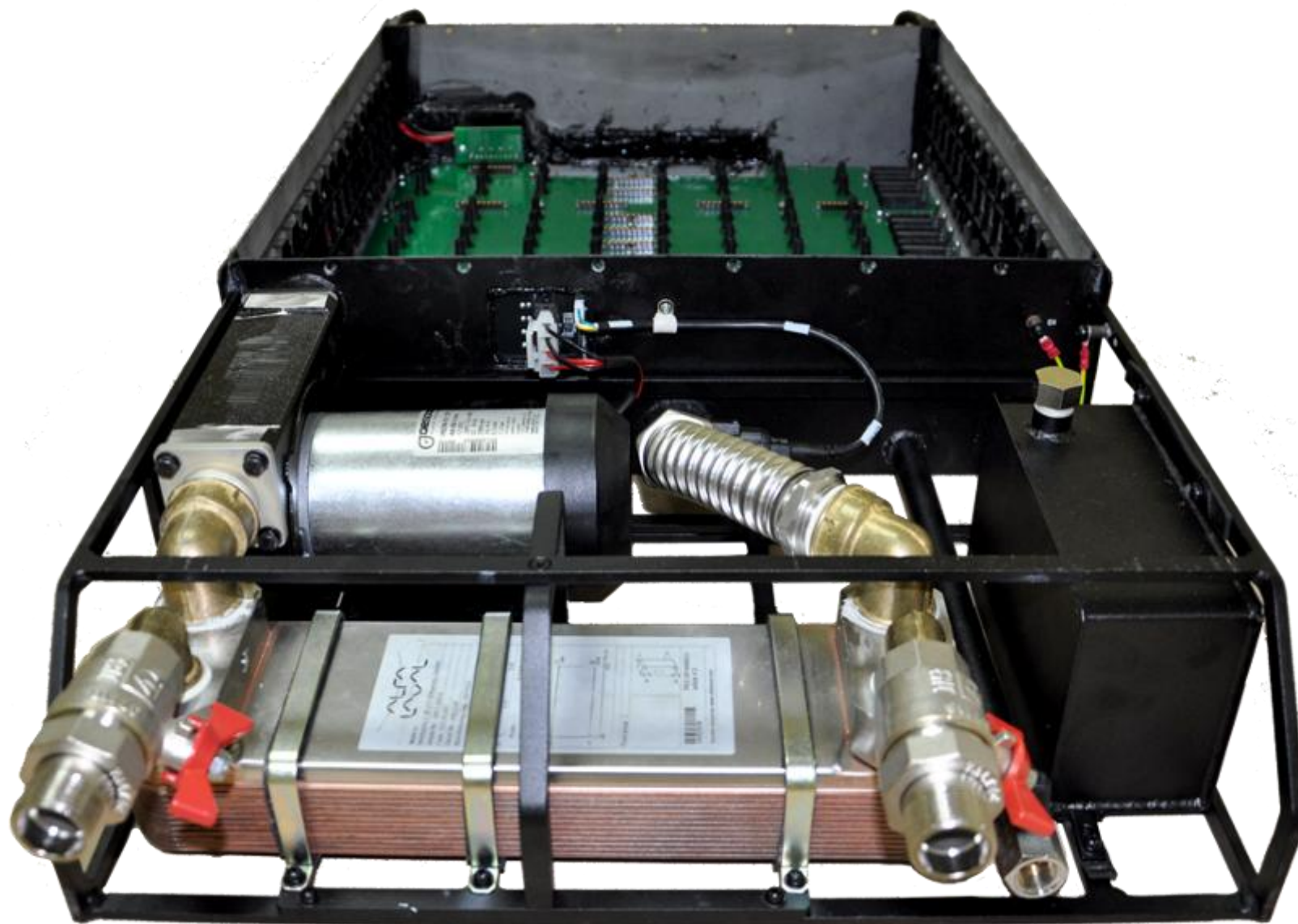
**Печатная плата 18 слоев,  
габариты 490x109,7 мм.**

**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”.**

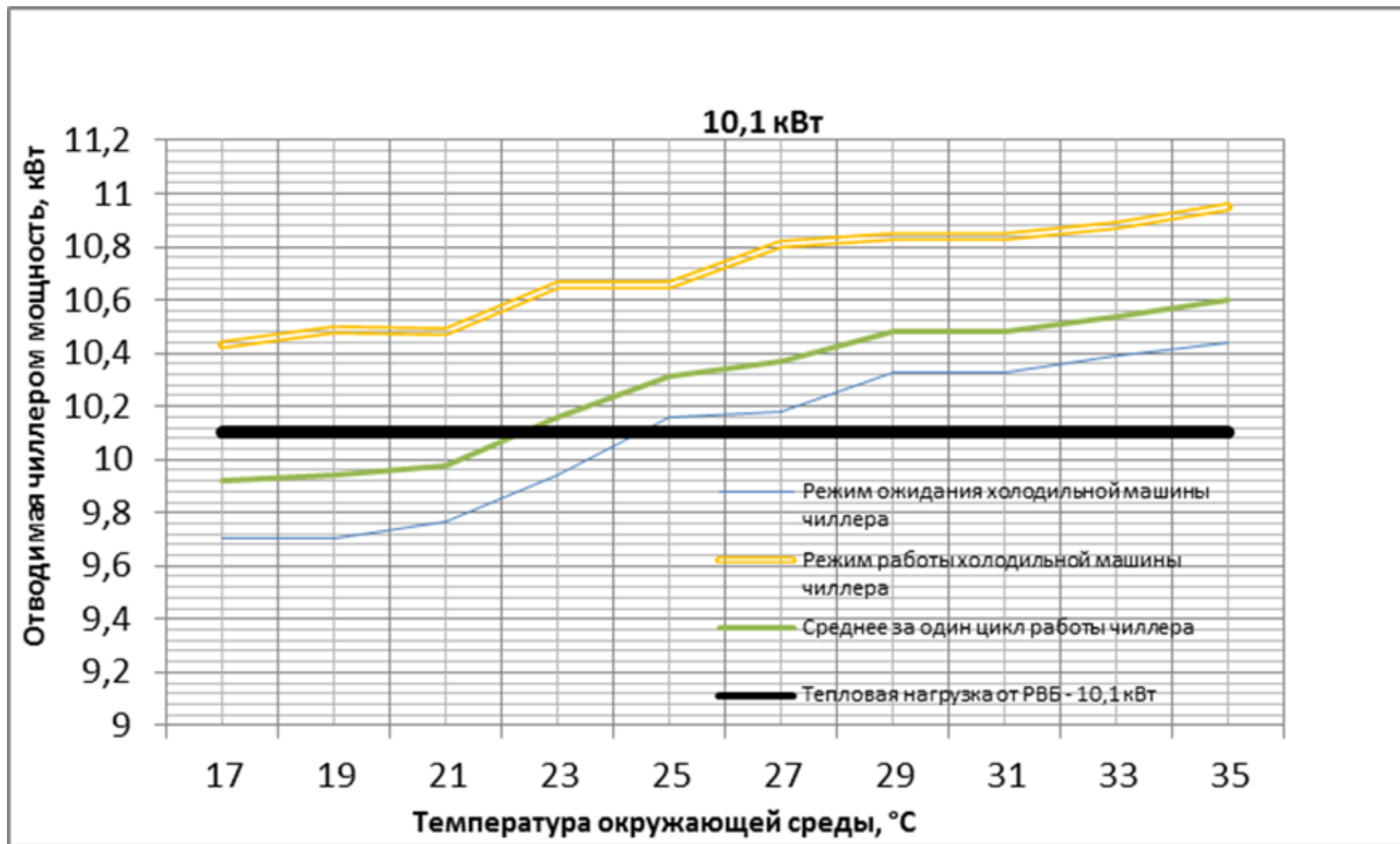
**Потребляемая мощность - 10 кВт.**

**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,  $^{\circ}\text{C}$ ;

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

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

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

$\Delta T_{\text{cp}}$  – разность между  $T_{\text{FPGAcp}}$  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.**

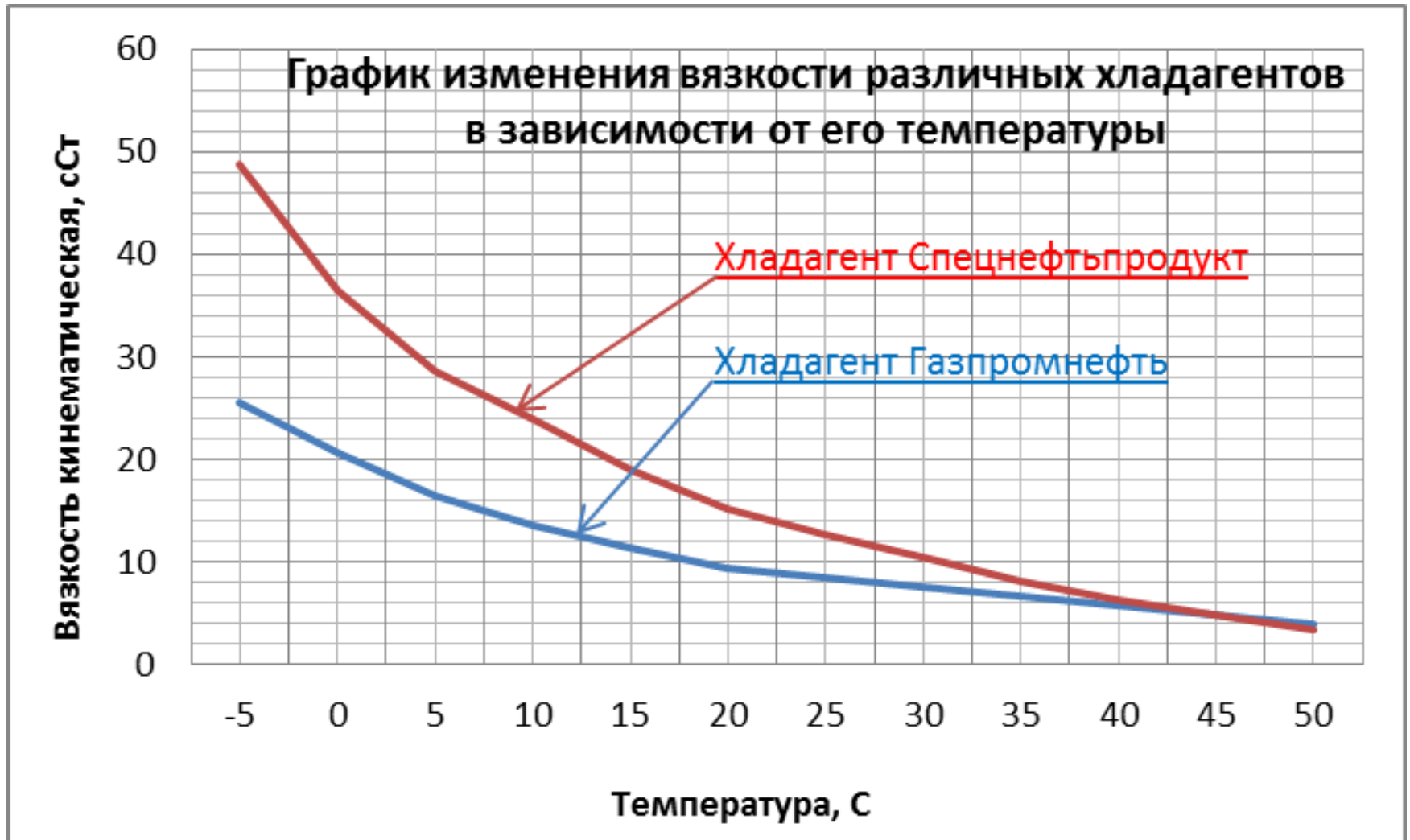
# Модернизированный хладагент

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 <sup>3</sup>
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

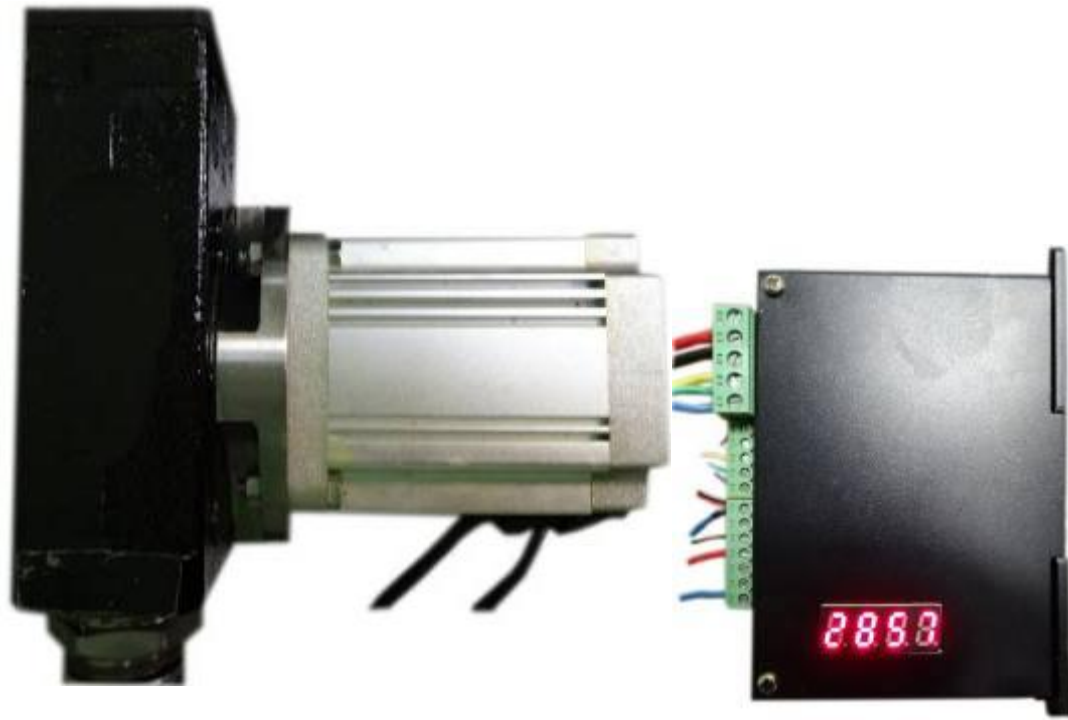
# Оснащение насоса бесколлекторным электродвигателем



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

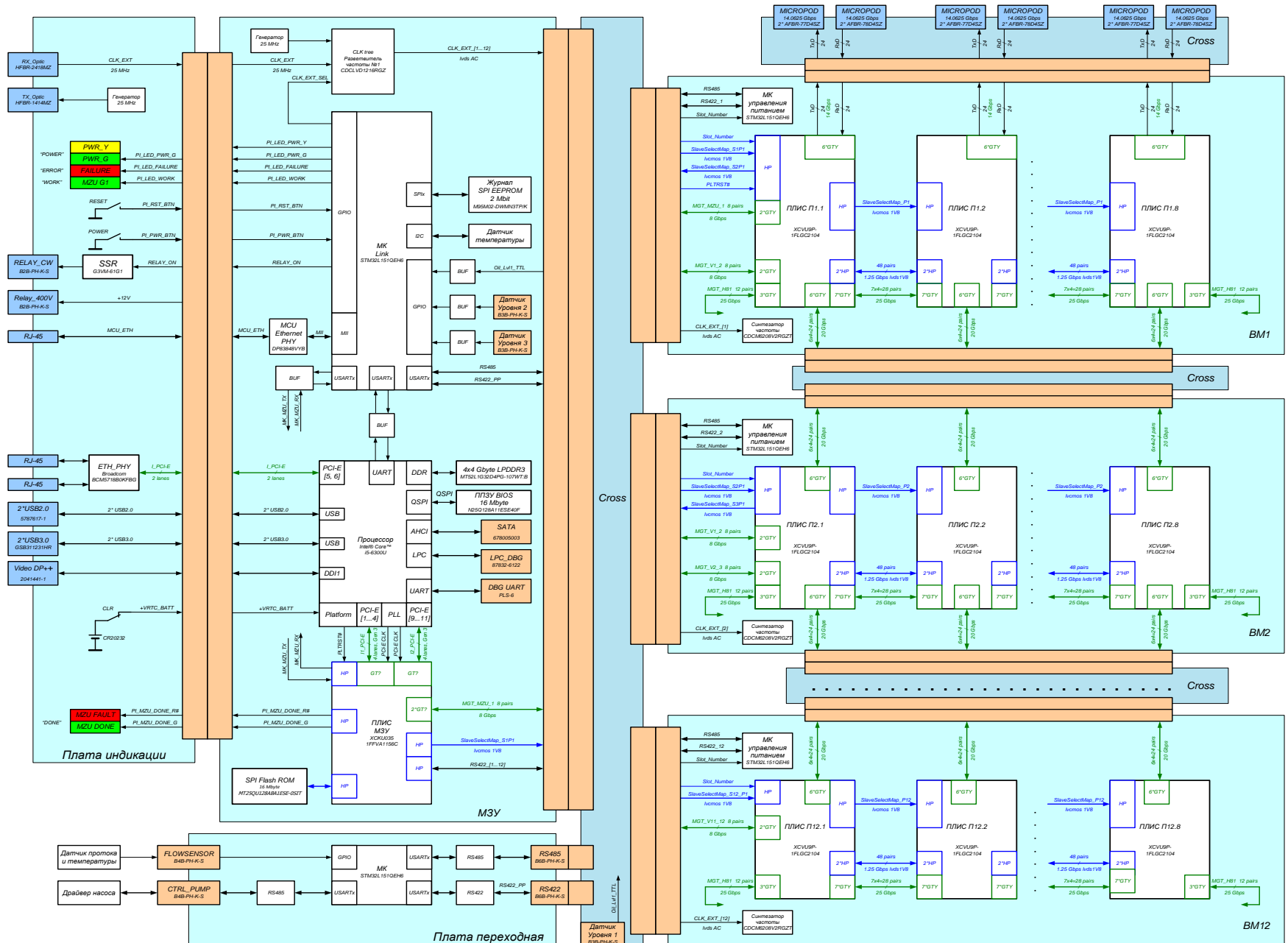
**Лучшая удельная  
производительность  
на единицу объема  
кристалла ПЛИС среди FPGA**



## Назначение ПЛИС UltraScale+:

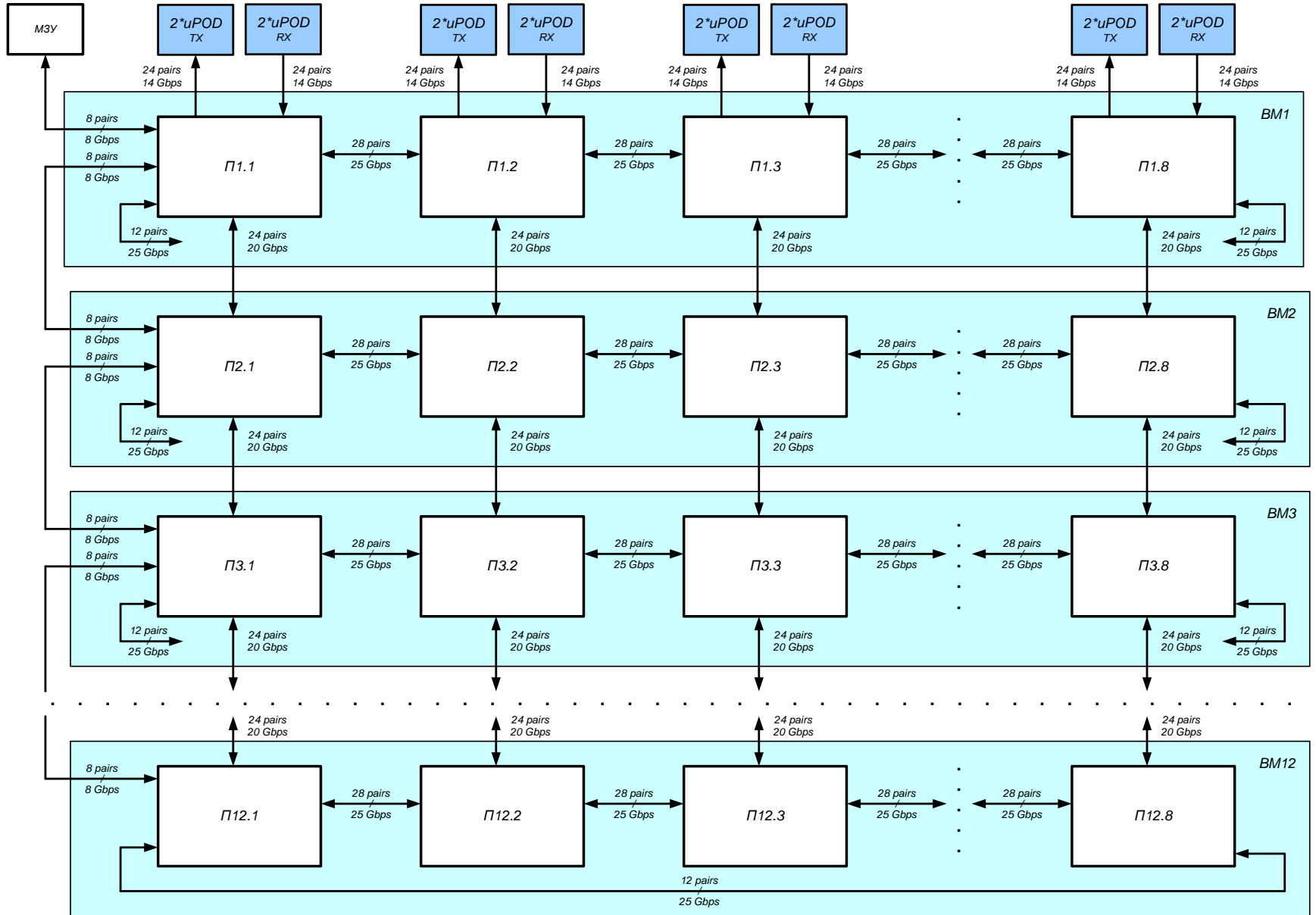
- высокопроизводительные вычисления;
- обработка больших потоков данных;
- прототипирование заказных микросхем.

# Структурная схема РВБ нового поколения «Арктур»



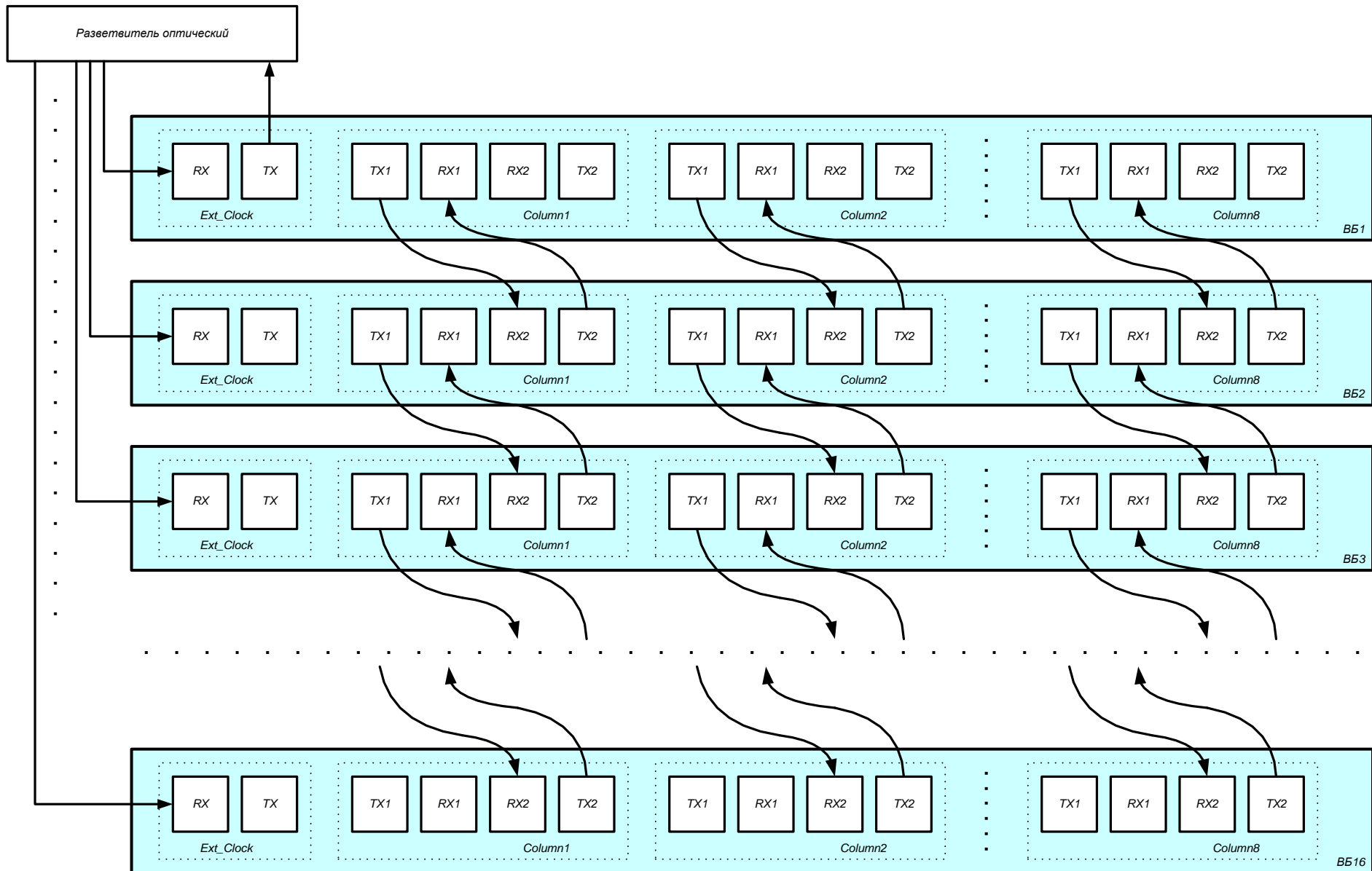
Скорость информационных обменов ПВМ - 10,4 Тбит/с

# 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.

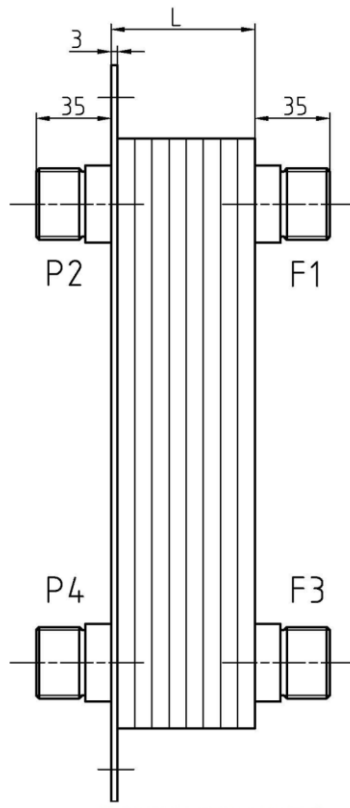
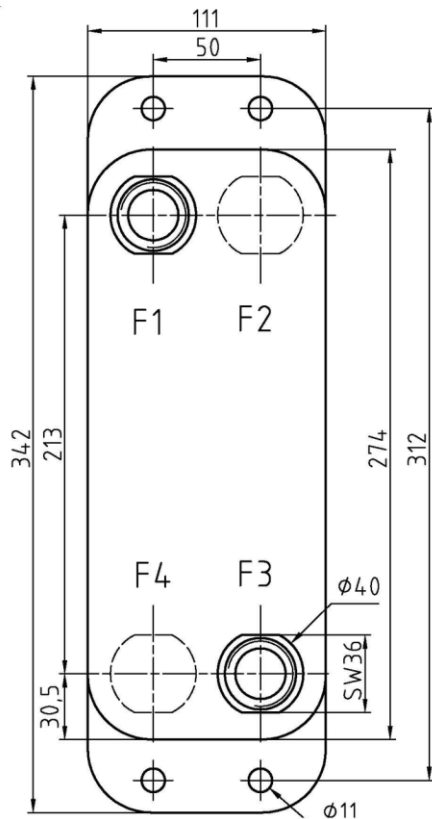
Специальные встроенные турбулизаторы. Эффективные диагональные направляющие. Повышенные требования к технологии пайки, исключающие возможность перемешивания двух сред.



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	
-------	------	----------------	--

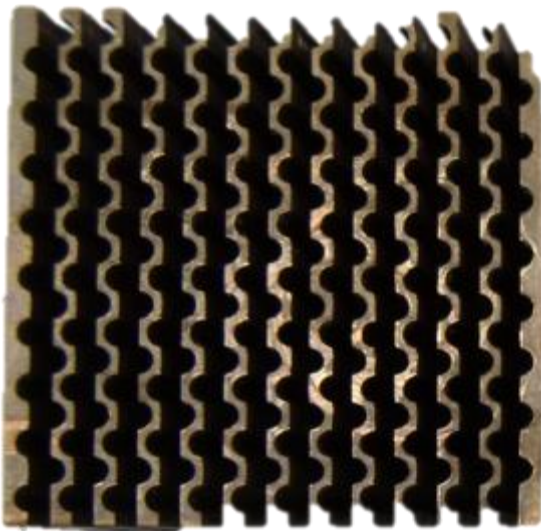
Technical data per HX	hot		cold	
	Oil by QL		Water	
Mass flow	[kg/s]	0.4513	[kg/s]	0.5357
Volume flow	[m <sup>3</sup> /h]	1.9000	[m <sup>3</sup> /h]	1.9289
Inlet temperature	[°C]	41.89	[°C]	7.00
Outlet temperature	[°C]	18.00	[°C]	15.00

Physical properties		Inlet		Outlet	
		Dyn. viscosity	[cP]	4.500	4.500
Density	[kg/m <sup>3</sup> ]	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

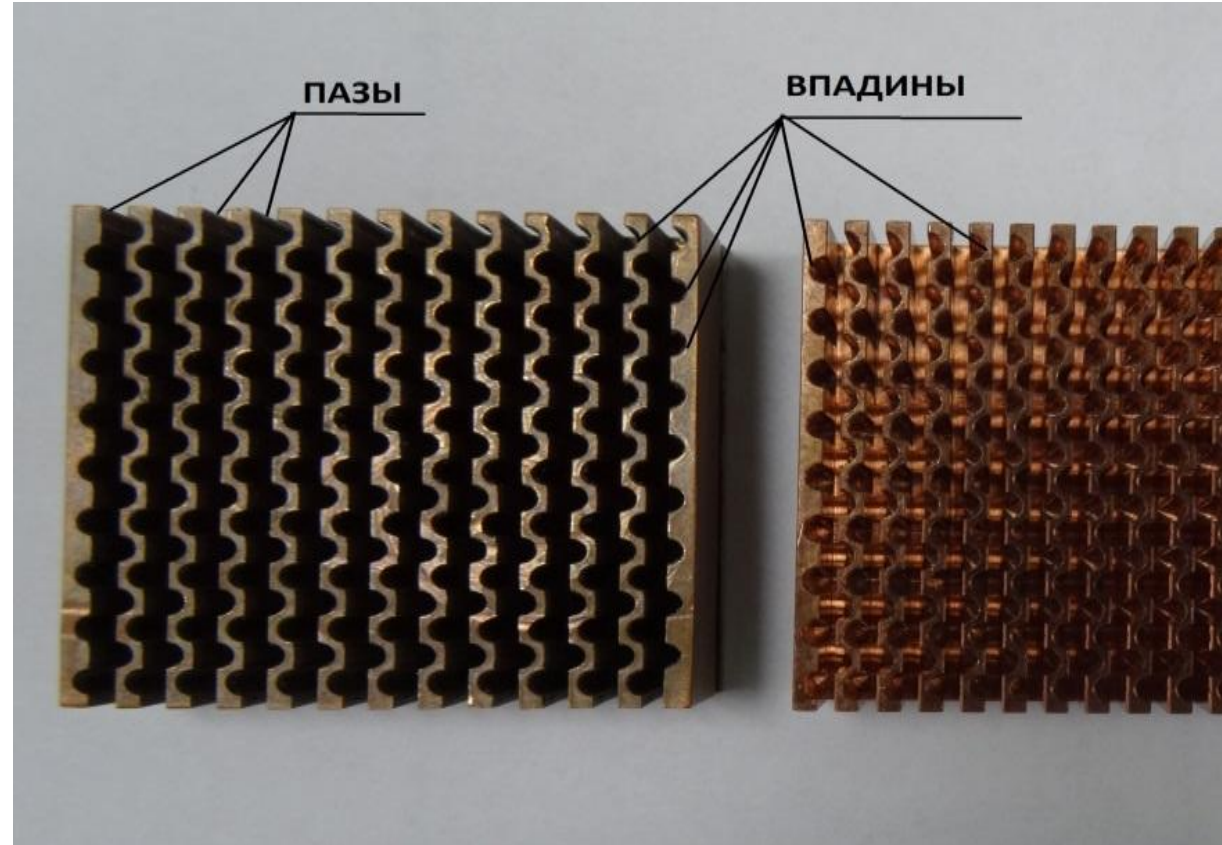
PHE characteristic values				
Heat duty	[kW]		18.00	
Transfer area	[m <sup>2</sup> ]		1.86	
Log./Effective temperature difference	[K]		17.78 / 17.78	
Heat transfer coeff. req./act.	[W/m <sup>2</sup> K]		546 / 584	
Fouling factor total	[m <sup>2</sup> K/W]		0.00011996	
Overdesign	[%]		7.01	
Pressure loss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

Construction			
Weight dry/wet	[kg]		ca. 13.1/18.0
Volume	[dm <sup>3</sup> ]	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



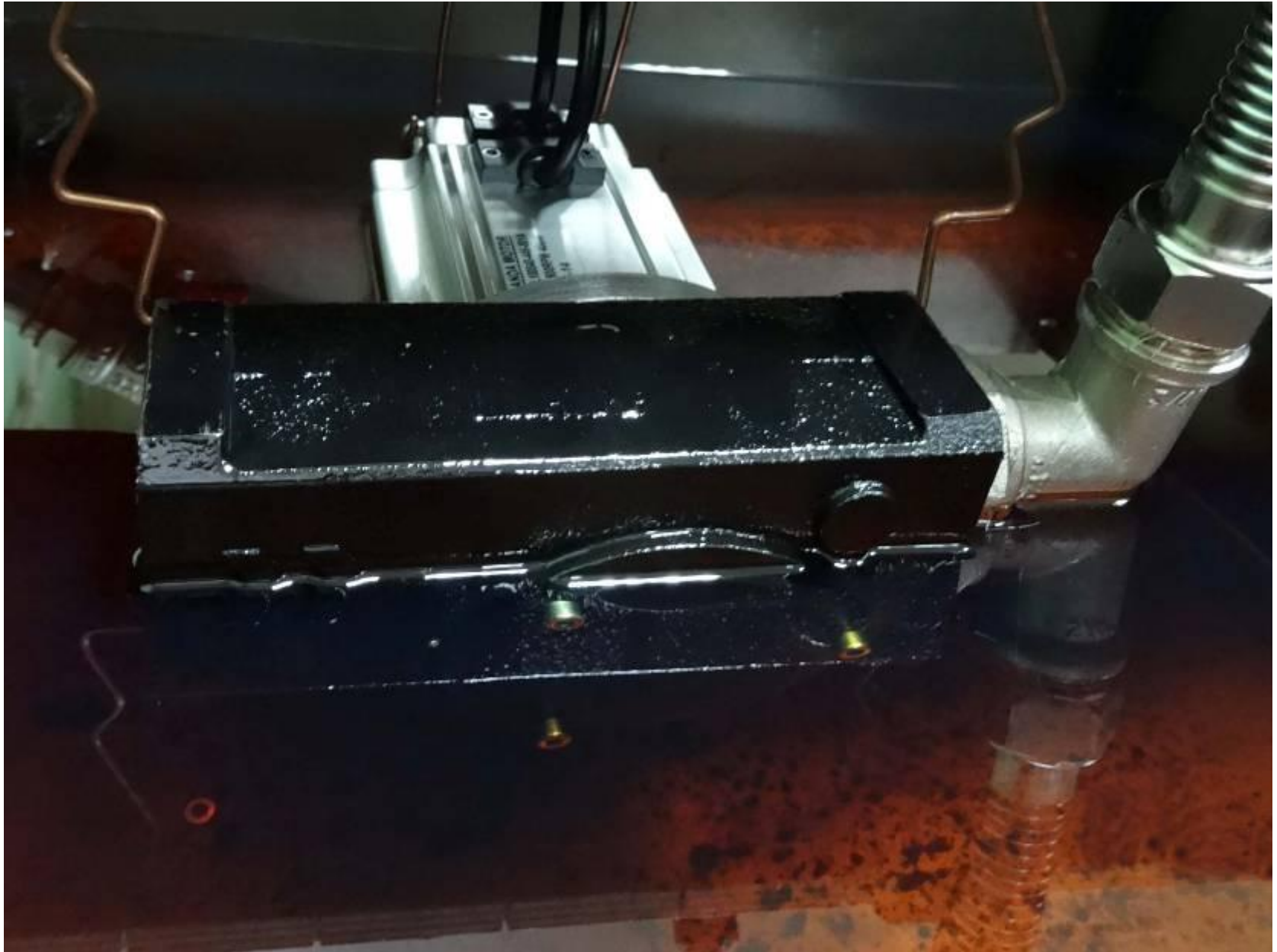
Увеличение площади теплосъема за счет  
уменьшения толщины ребер и  
увеличения числа пазов и впадин.



# 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 <sup>2</sup>	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

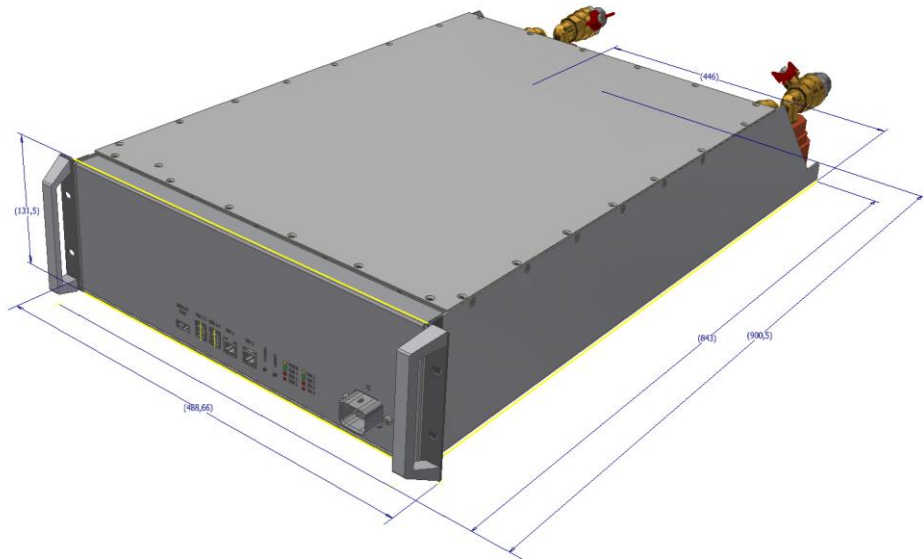
# Погружной насос



# Стенд для исследования погружного насоса



# РВБ «Арктур»



**96 ПЛИС Xilinx UltraScale+.**

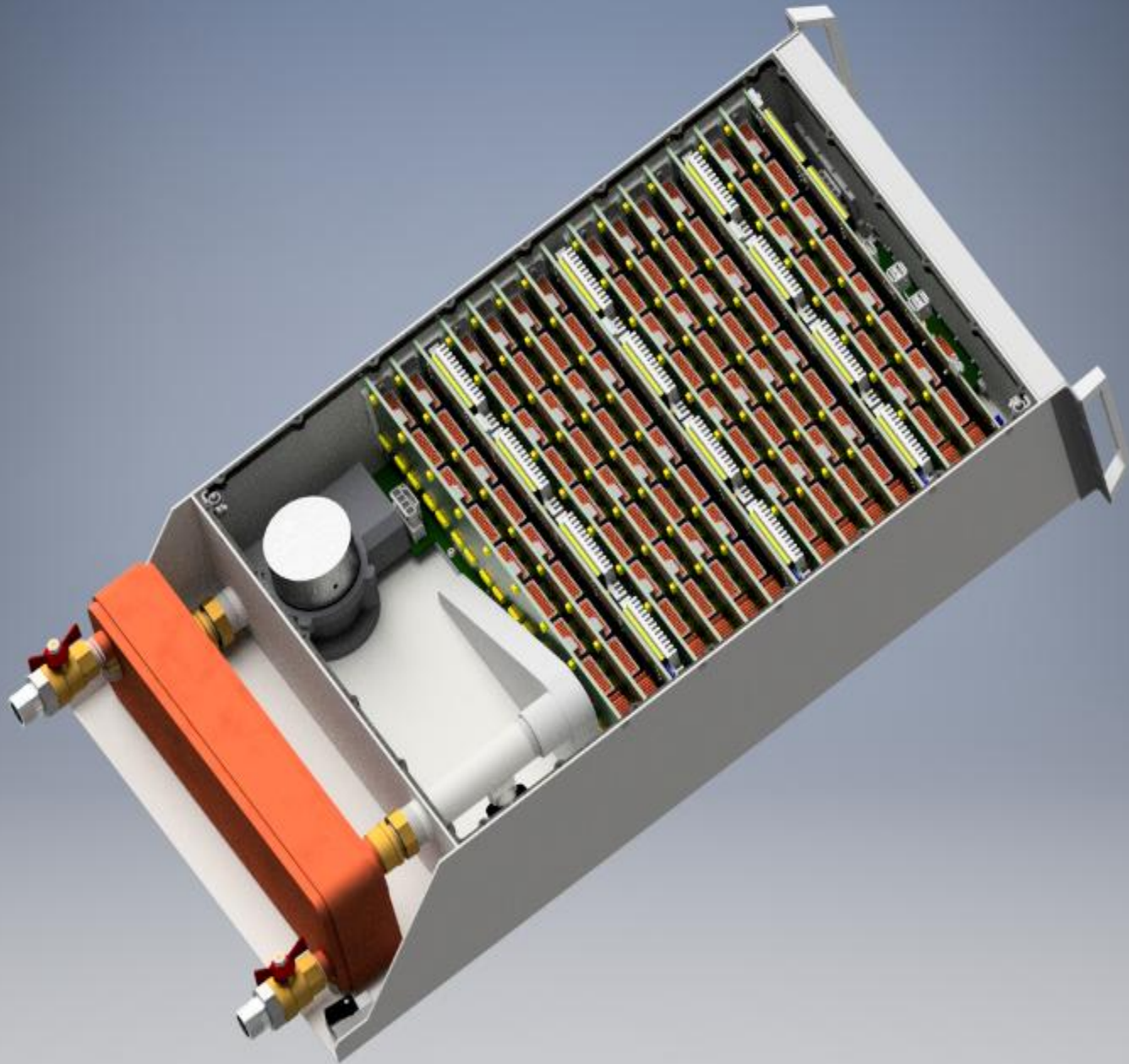
**Конструктив 3U, 19”.**

**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 6U, 2007 г.	8	4	6	192
Алькор 6U, 2009 г.	16	4	6	384
Ригель 2U, 2011 г.	8	4	16	512
Тайгета 2U, 2013 г.	8	4	16	512
Неккар 3U, 2016 г.	8	12	12-16	1152-1536
Арктур 3U, 2019 г.	8	12	16	1536

**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!**