

Трубные элементы теплоотвода

В СИСТЕМАХ ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

В статье описаны некоторые особенности трубных панелей жидкостного охлаждения и возможности повышения их эффективности теплоотвода благодаря оригинальным процессам формообразования жидкостных каналов.

Святослав Муров

contact@ic-teplocom.ru

До начала 2000-х годов разработчики мощной радиоэлектронной и преобразовательной техники отдавали предпочтение простым и неприхотливым в эксплуатации системам воздушного охлаждения. К системам жидкостного охлаждения (СЖО) относились с большим предубеждением. Связано это было прежде всего с низкой надежностью и эффективностью элементов теплоотвода, не-

посредственно контактирующих с теплонагруженными электрорадиоизделиями. Опасение возможных протечек надолго задержало развитие и внедрение СЖО в данной области.

Начало широкого применения СЖО обеспечили новые материалы и процессы изготовления элементов теплоотвода. Прогресс не только затронул хорошо известные, проверенные конструктивные

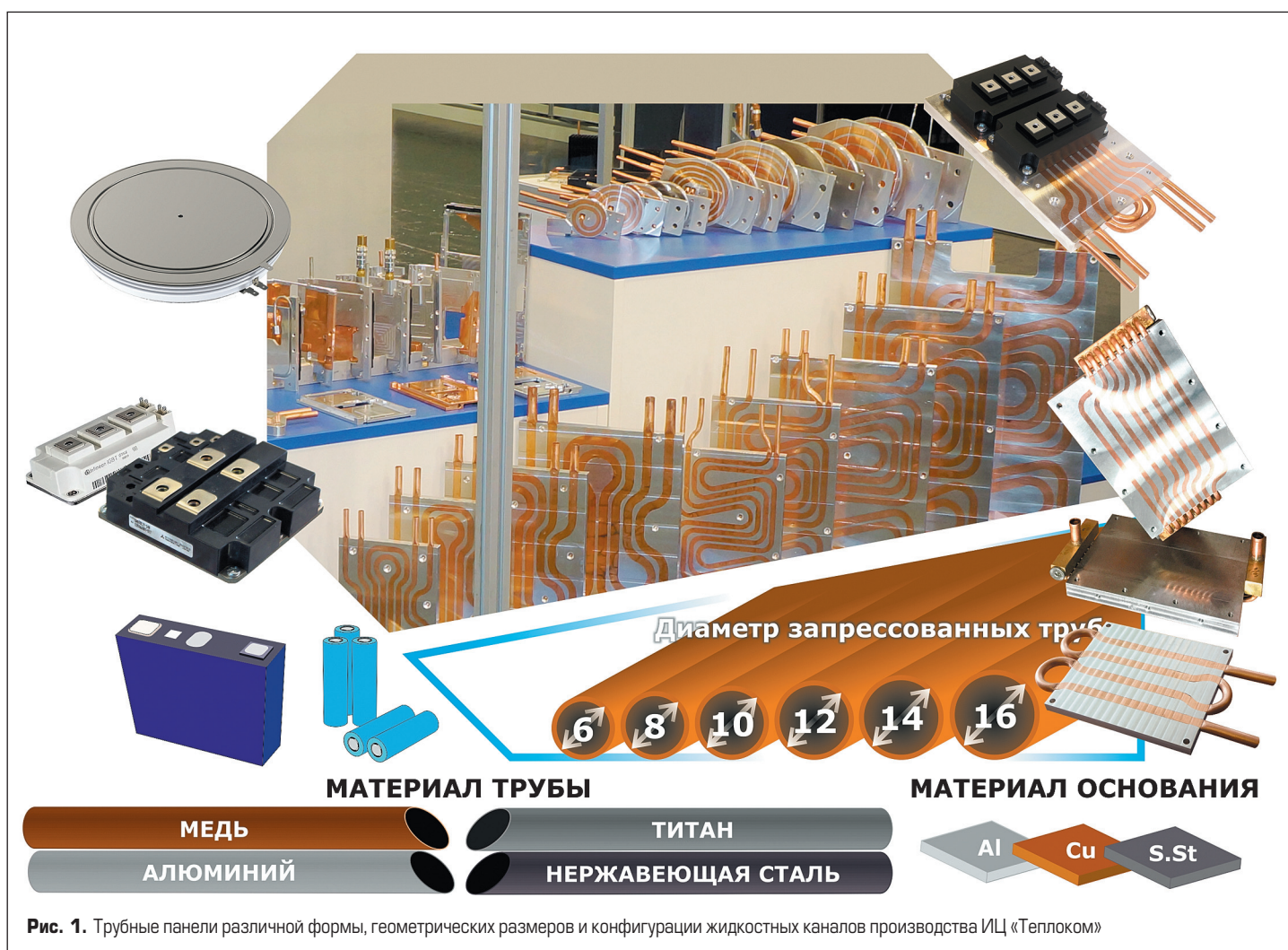


Рис. 1. Трубные панели различной формы, геометрических размеров и конфигурации жидкостных каналов производства ИЦ «Теплоком»

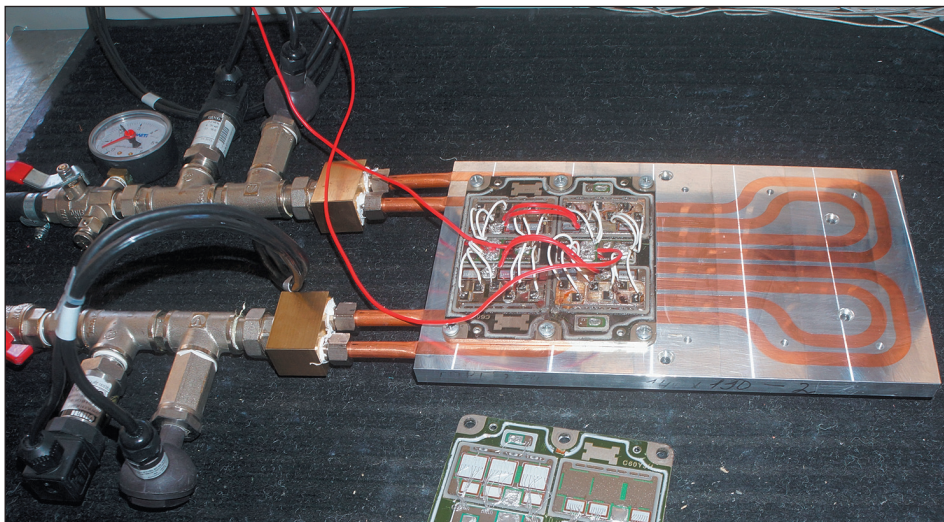


Рис. 2. Проверка тепловых и гидравлических характеристик опытных и рабочих образцов разрабатываемых (оригинальных) панелей жидкостного охлаждения, с использованием имитаторов тепловой нагрузки и испытательного водооборотного стенда с системой мониторинга и управления СЖО

решения, но и обеспечил появление теплоотводящих конструкций с новыми эксплуатационными характеристиками.

В качестве элементов теплоотвода в системах жидкостного охлаждения используются жидкостные панели, или Cold Plate (CP), различной формы, размеров и конфигурации жидкостных каналов.

В зависимости от технологии изготовления (формирования жидкостных каналов), CP условно можно объединить в три основные группы [1]:

1. Трубные CP — запрессовка прокатной металлической трубы в заранее выполненный паз в металлическом основании (плите).
2. CP глубокого, или оружейного сверления.
3. Сборные CP, в том числе с внутренней микроканальной структурой с использованием:
 - эластичных уплотнительных элементов;
 - пайки в вакууме;
 - различных видов сварки, в том числе, сварки трением с перемешиванием (FSW).

У каждого из перечисленных конструктивных исполнений жидкостной панели есть свои преимущества и недостатки. Поэтому при выборе варианта конструкции разработчику приходится искать компромисс между эффективностью теплоотвода CP, с учетом ее гидравлических характеристик (соответствующих возможностям водооборотной системы) и надежностью — стойкостью к засорению и внешним воздействующим факторам [2].

Преимущества трубных жидкостных панелей

Трубные CP, не самые эффективные по тепловым характеристикам, обладают следующими неоспоримыми преимуществами, недоступными другим типам.

Высокая надежность

Гарантированное отсутствие протечек в процессе длительной эксплуатации, в том

числе, при предельных величинах внешних механических и климатических воздействующих факторов за счет:

- минимального количества и протяженности гидравлических разрывов (разъемных и неразъемных соединений в конструкции жидкостных каналов);
- выполнения жидкостных каналов единым отрезком трубы, от входного до выходного патрубков;
- подключения к водооборотной системе за пределами рабочей поверхности CP или корпуса изделия.

Использование в конструкции жидкостной панели комбинации различных материалов

Только в трубных CP, в зависимости от условий эксплуатации, в единой конструкции возможна реализация комбинации различных материалов несущего шасси и жидкостных каналов (труб):

- несущее основание: любые конструктивные металлы, прежде всего медь и различные алюминиевые сплавы, в том числе высокопрочные Д16Ч, В93ПЧ, В95ПЧ и др.
- жидкостные каналы (трубы): медь, различные сплавы алюминия, нержавеющей стали или титана.

Возможность использования в качестве жидкостных каналов труб из различных материалов обеспечивает совместимость (предотвращение коррозии) и оптимальную производительность CP при использовании практически любой охлаждающей жидкости: современные антифризы, деионизированная или морская вода и т. д.

Область применения трубных жидкостных панелей

Благодаря высокой надежности конструкции трубных CP и возможности обеспечить совместимость выбранного материала каналов (труб) с составом охлаждающей жидкости, трубные жидкостные панели целесообразно использовать, прежде всего, для особо ответственных применений, при жестких условиях эксплуатации, в устройствах на мало обслуживаемых и не обслуживаемых объектах.

Трубные жидкостные панели производства ИЦ «Теплоком»

ИЦ «Теплоком» производит разработку и изготовление трубных CP с учетом тепловых и гидравлических требований к проектируемому электротехническому или радиоэлектронному устройству, может подключаться к заказчику (разработчику) на любом этапе создания проектируемого устройства (рис. 2).

Оригинальные технологические процессы формообразования жидкостных каналов в трубных CP, обеспечивают продукцию ИЦ «Теплоком» дополнительные конкурентные преимущества:

- в отличие от стандартной конструкции CP, практически любая форма сечения трубного канала, от круглой до щелевой (рис. 3): адаптированность конструкции CP к изменениям требований тепловой задачи (скорость теплоносителя, разрушение граничного слоя у стенки канала, площадь теплоотдачи);
- бесщелевая запрессовка трубного канала в основание CP (рис. 4): стойкость к внешним климатическим воздействиям без использования дополнительных материалов для герметизации зазора труба-основание на рабочей поверхности;
- диаметр запрессовываемой трубы до Ø16 мм (против Ø12 мм на рынке): повышение эффективности процесса теплообмена конструкции CP за счет возможности



Рис. 3. Различная форма сечения трубных каналов на поперечных срезах. Бесщелевая запрессовка

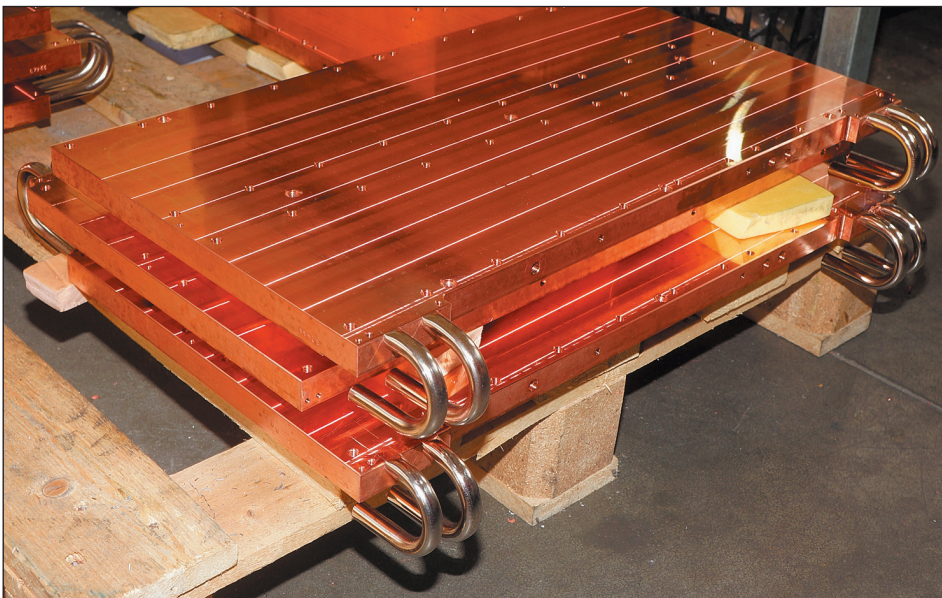


Рис. 4. Жидкостные панели с бесщелевой запрессовкой медной трубы $\varnothing 12$ мм в медное основание. На трубу предварительно нанесено защитное гальваническое покрытие Н9

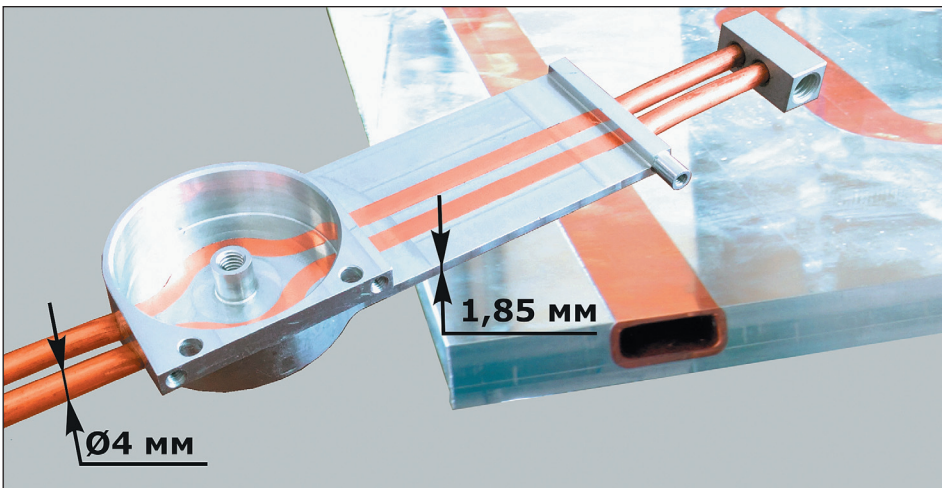


Рис. 5. Жидкостная панель минимально возможной толщины для РЭУ, работающих в условиях жестких размерных ограничений

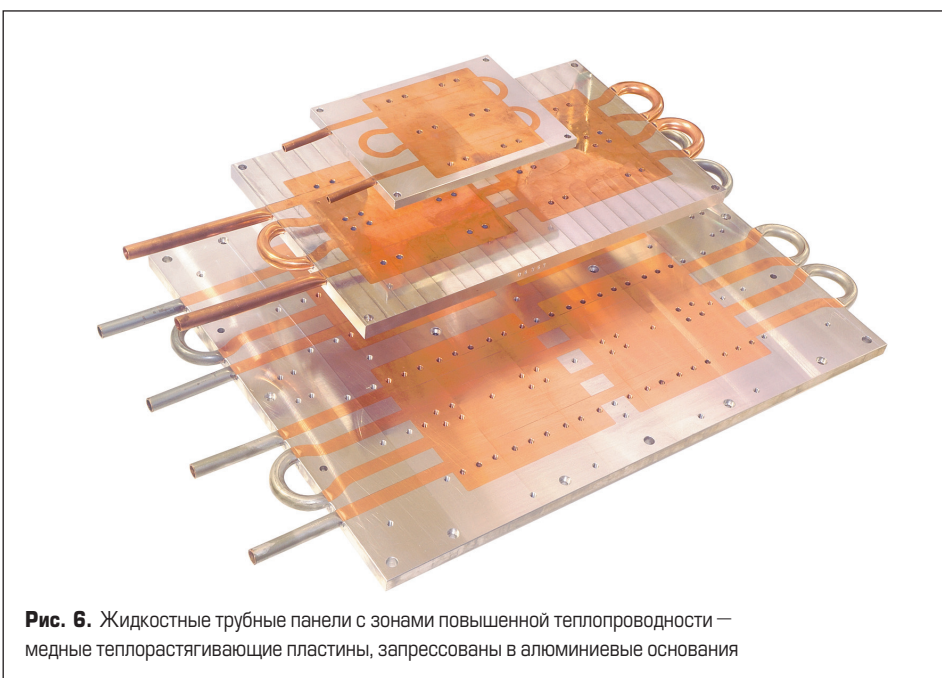


Рис. 6. Жидкостные трубные панели с зонами повышенной теплопроводности — медные теплорастягивающие пластины, запрессованы в алюминиевые основания

изменения расхода охлаждающей жидкости и величины падения гидравлического давления в широком диапазоне;

- минимально возможная толщина СР, меньше диаметра запрессованной трубы (рис. 5): симметричные панели небольшого размера, до 100–120 мм по длинной стороне, с односторонним или двухсторонним монтажом дискретных ЭРИ. Предназначены для радиоэлектронных устройств, работающих в условиях жестких размерных ограничений.

Перечисленные преимущества продукции ИЦ «Теплоком» нашли отражение в еще одном перспективном конструкторско-технологическом решении.

Комбинированное, медно-алюминиевое основание

Как уже отмечалось, для изготовления основания СР используются два основных материала: медь и алюминий. Поскольку медь имеет высокую стоимость и ее удельный вес намного превосходит удельный вес алюминия, в большинстве конструкций жидкостных панелей предпочтение отдается различным сплавам алюминия — в ущерб теплопроводности. Это обстоятельство существенно ограничивает применимость трубных СР.

Комбинированные основания востребованы, прежде всего, в сложных радиоэлектронных и электросиловых устройствах, у которых на едином основании размещаются полупроводниковые приборы с различной мощностью тепловыделения (плотностью теплового потока) или с различной чувствительностью к температуре перегрева (рис. 6).

Запрессовка в алюминиевое основание медных теплорастягивающих пластин в зонах, требующих повышенной теплопроводности, открыла возможности для оптимизации конкурентных характеристик СР: цена–масса–качество (эффективность теплоотвода или производительность).

Место трубных жидкостных панелей в ряду СР различного конструктивного исполнения

На рынке элементов теплоотвода систем жидкостного охлаждения трубные СР отличаются от других высокой надежностью — отсутствием возможных протечек и коррозии, но уступают им по производительности, особенно сборным, с развитой внутренней структурой.

Кроме трубных СР, высокой надежностью — стойкостью к ВВФ — обладают цельнометаллические сверленные жидкостные панели. Каналы для охлаждающей жидкости получают глубоким или оружейным сверлением, а также с помощью экструзии (прессования). Последнее возможно только для ограниченного числа алюминиевых сплавов. Коллекторы (отверстия поперек жидкостных каналов) выполняются посредством дополнительной механической обработки. Заданный жидкостной контур и герметичность панели обеспечивают резьбовые заглушки, которые в данном случае, являются элементами гидравлических раз-

рывов, но с хорошим запасом механической прочности.

Учитывая, что сверленные и трубные СР имеют схожие показатели по надежности — стойкости к внешним механическим и климатическим факторам (кроме коррозионной стойкости к охлаждающей жидкости), было крайне интересно сравнить их тепловые и гидравлические характеристики (рис. 6).

В конце 2018 года совместно с заинтересованными немецкими специалистами были проведены сравнительные испытания сверленной панели DAU KS 302 (Австрия) (рис. 7а) и трубной панели, производства ИЦТ (рис. 7б), с конфигурацией и суммарной площадью проходного сечения каналов близкими к австрийской панели.

Испытания проводились на вагоностроительном заводе компании Siemens AG (г. Крефельд, Германия) в составе тягового инвертора электропоезда «Ласточка». На рис. 7 представлены полученные результаты: при небольших расходах теплоносителя, около 5 л/мин, характеристики (тепловое сопротивление и падение давления) находятся примерно на одном уровне. С увеличением расхода теплоносителя (более 10 л/мин) наблюдается небольшое, но уверенное преимущество трубной панели по тепловому и существенное по гидравлическому сопротивлению.

Заключение

За последние годы на рынке СЖО реализовано большое количество новых конструкторско-технологических решений, на базе которых появились целые направления высокопроизводительных конструкций жидкостных панелей для различных применений [3].

Прогресс затронул все аспекты построения жидкостных панелей с целью улучшения их тепловых характеристик, снижения веса и повышения долговечности:

Материалы несущей конструкции — композиты с повышенным содержанием графена, усовершенствованная керамика, новые металлические сплавы.

Внутренняя микроканальная структура:

- непосредственно из материала несущей конструкции — с помощью фрезерования и деформирующего резания (ДР);
 - закладные элементы — перфорированные тонкостенные медные и алюминиевые профили, заготовки из пористой меди.
- Процессы формообразования:
- аддитивное производство (3D-печать) — позволяет изготавливать изделия сложной формы, которые трудно получить традиционными методами;
 - экструзия (прессование) — экономичный метод быстрого изготовления различных алюминиевых профилей (заготовок);
 - Hydroforming — гидроформовка, позволяет создавать сложные формы из листовых металлических заготовок для сборных СР;
 - охлаждающие жидкости: наножидкости и материалы с фазовым переходом, с учетом возможной совместимости с материалами СР (коррозионная стойкость).

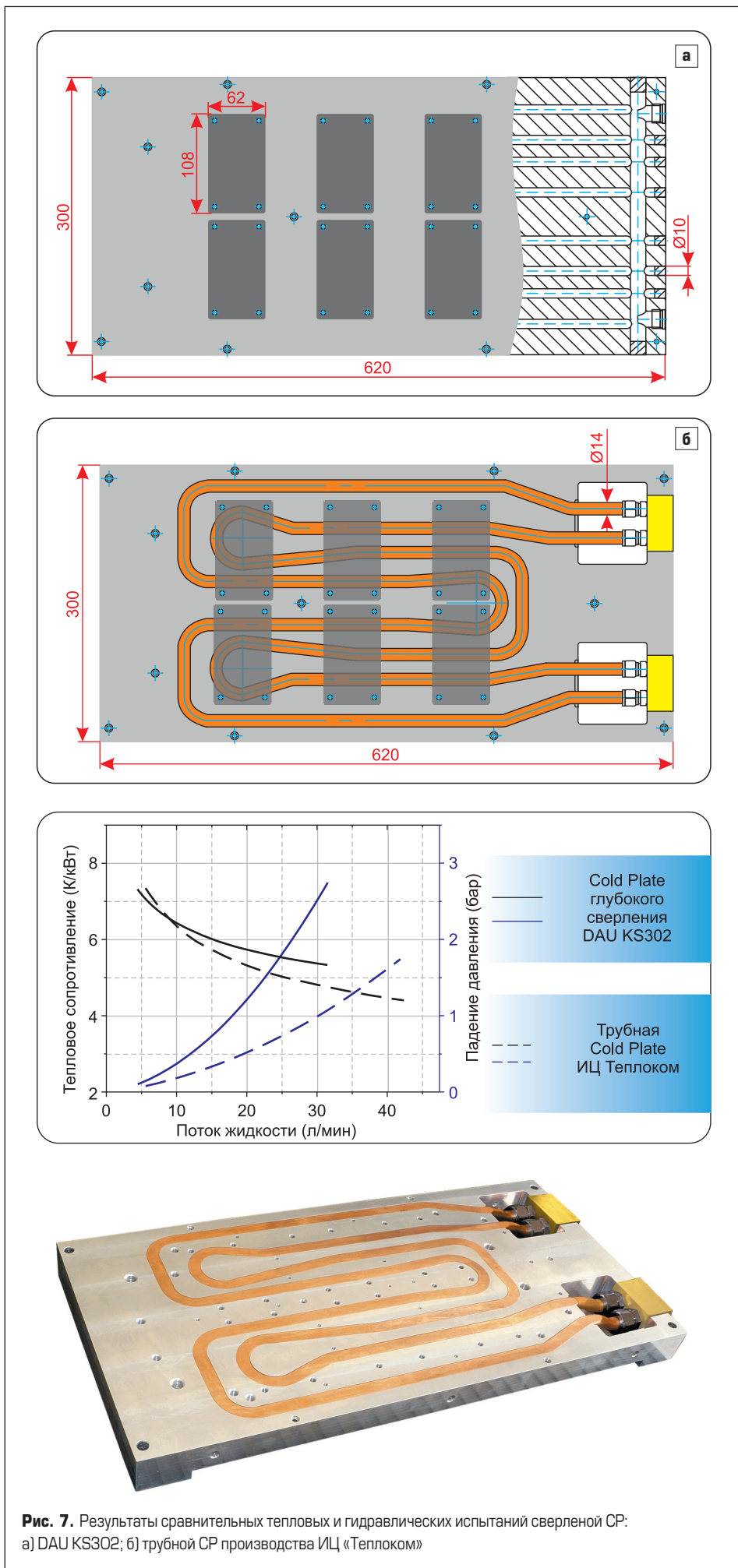


Рис. 7. Результаты сравнительных тепловых и гидравлических испытаний сверленной СР: а) DAU KS302; б) трубной СР производства ИЦТ «Теплоком»

Несмотря на все многообразие новых продвинутых материалов и высокотехнологичных процессов формообразования жидкостных каналов и сборки жидкостных панелей, трубные Cold Plate уверенно занимают нишу высоконадежных CP за счет гарантированного отсутствия протечек в рабочей зоне установки теплонагруженных компонентов (или внутри корпуса охлаждаемого устройства), а также по-

вышенной коррозионной стойкости каналов (труб) благодаря их адаптированности к составу конкретной охлаждающей жидкости. ■

Литература

1. www.pioneerthermal.com/the-ultimate-guide-to-custom-liquid-cold-plates-what-you-need-to-know/
2. www.columbia-staver.co.uk/thermal-management/liquid-cold-plates/tube-and-plate-serpentine/
3. Bahman, Amir Sajjad; Blaabjerg, Frede, "Optimization Tool for Direct Water Cooling System of High Power IGBT Modules", Proceedings of the 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE-Europe), 2016.