

Высокоэффективные жидкостные охладители

для изделий силовой электроники

В статье представлены новые изделия в области разработки высокоэффективных жидкостных охладителей для приборов и модулей силовой электроники. Приведены методы моделирования, применяемые при конструировании новых охладителей, особенности технологии изготовления и результаты исследований их характеристик.

**Рафаэль Биктиев
Дмитрий Немаев
Вячеслав Мускатиньев
Мария Кучумова
Владимир Мещеряков
Алексей Гришанин**

nicpp@elvpr.ru

Введение

Эффективные системы охлаждения являются неотъемлемой частью силовой полупроводниковой электроники. Для полноценного использования силовых полупроводниковых приборов (СПП) в преобразователях необходимо интенсивное охлаждение. Для полупроводниковых приборов таблеточной и модульной конструкций отечественной промышленностью производятся воздушные охладители, с системами прижима и контроля усилий сжатия, крепежными элементами, шинами и прочими аксессуарами [1]. Из последних разработок следует отметить охладители серии O273, O473, O193 [2], предназначенные для таблеточных СПП большой мощности, которые позволяют реализовать проекты по созданию преобразователей мощностью до нескольких десятков мегаватт. Воздушные охладители выпускаются методом экструзии с максимальной шириной до 300 мм, что часто бывает недостаточным для создания мощных преобразователей.

Для реализации высокоомощных преобразователей необходимо использование более эффективных охлаждающих систем нового поколения с большой площадью теплоотдачи для единичного и группового размещения полупроводниковых приборов или модулей в силовых схемах. К ним относятся охладители O57 и O58, которые изготавливаются по новой технологии — методом запрессовки ребер. Данная технология позволяет изготавливать охладители шириной 50–900 мм, что значительно расширяет диапазон мощностей силовых сборок. Для диодно-тиристорных и IGBT-модулей разработаны и поставляются охладители-моноплиты O55 и O56, на основе которых можно создавать различные многомодульные силовые схемы.

С ростом плотности мощности полупроводниковых изделий силовой электроники возникает проблема отвода тепловых потерь из малого объема полупроводникового кристалла, и при достижении определенных условий воздушное охлаждение не обеспечивает заданных условий работы СПП. В настоящее время максимальная мощность рас-

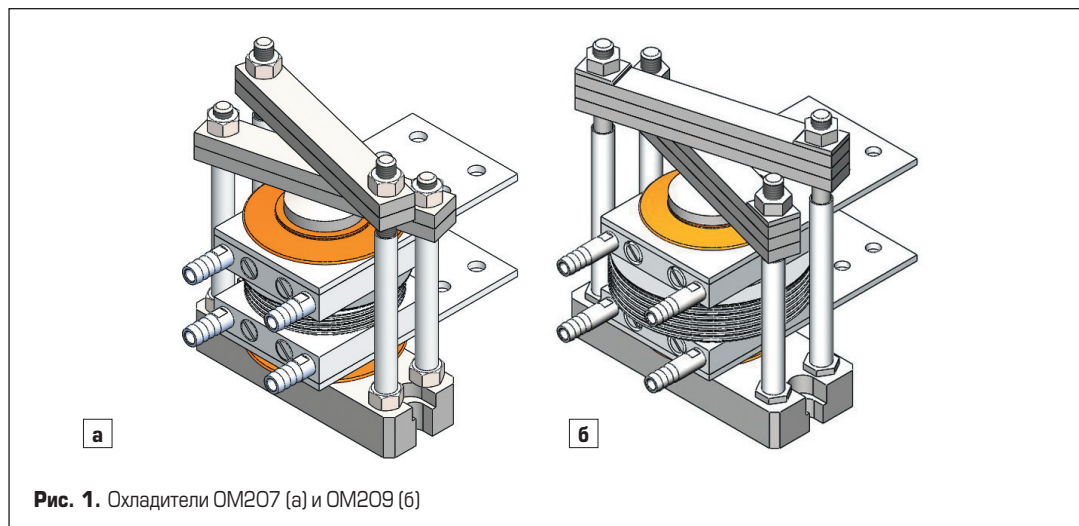


Рис. 1. Охладители OM207 (а) и OM209 (б)

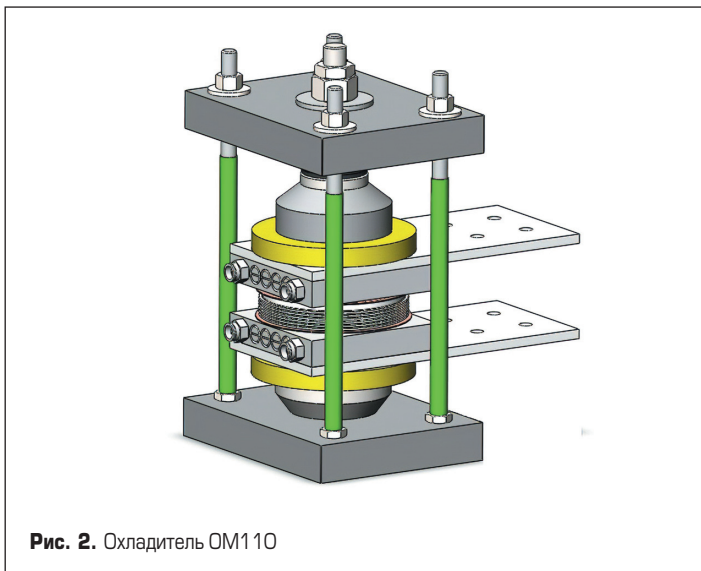


Рис. 2. Охладитель OM110

сеивания, достигнутая на охладителях воздушного охлаждения, составляет 2 кВт, а на жидкостных охладителях — 5,5 кВт. Теплоемкость жидких теплоносителей гораздо выше, чем газообразных, поэтому системы жидкостного охлаждения имеют лучшую эффективность. Одновременно при конструировании и производстве надежных жидкостных систем охлаждения приходится решать ряд технических задач, связанных с имеющимися технологическими ограничениями.

Жидкостные охладители для СПП таблеточного исполнения

Жидкостные охладители предназначены для отвода выделяемого тепла от силовых полупроводниковых приборов и модулей посредством теплообмена с циркулирующей охлаждающей жидкостью. Их главные преимущества в сравнении с воздушными охладителями — способность отводить большее количество тепла в единицу времени при меньших размерах, а также более низкий уровень шума при циркуляции теплоносителя.

Для приборов таблеточного исполнения освоен промышленный выпуск жидкостных охладителей серии OM, предназначенных для индивидуального охлаждения тиристорных и диодных. Среди последних разработок следует выделить жидкостные охладители OM207 и OM209 (рис. 1) со сниженным тепловым сопротивлением R_{thja} в сравнении с серией охладителей OM107 и OM109. Применение данных охладителей возможно для приборов с диаметром полупроводникового элемента 63–76 мм (OM207), 90–101 мм (OM209). Конструктивно охладители этих серий выполняются в виде медных теплоотводов с токовыводами и штуцерами для подвода жидкости в комплекте с изолятором и прижимным устройством. Изолятор размещается между теплоотводом и прижимным устройством, обеспечивая электрическую изоляцию

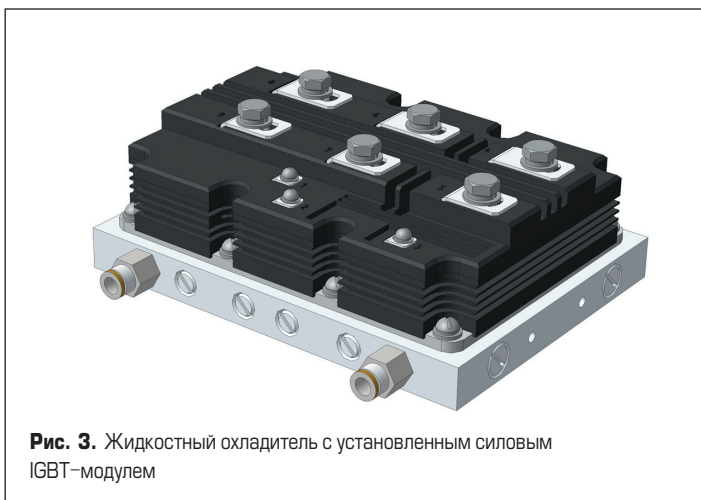


Рис. 3. Жидкостный охладитель с установленным силовым IGBT-модулем

токоведущих элементов от конструкционных деталей. Все охладители имеют коррозионно-стойкое защитное покрытие.

Для высокоомощных полупроводниковых тиристорных таблеточной конструкции с диаметром полупроводникового элемента 120 мм разработан охладитель OM110 (рис. 2). Для обеспечения надежного прижимного контакта разработано прижимное устройство, обеспечивающее усилие сжатия 130 кН. Диаметр контактной поверхности теплоотвода OM110 равен 155 мм.

Представленные выше устройства предназначены в основном для охлаждения единичных приборов таблеточного исполнения, при этом возможно охлаждение нескольких СПП, собранных в столб, при обеспечении соответствующих мер по электрической изоляции каждого прибора. В любом случае хладагент подводится с помощью шлангов, что увеличивает не только общие габариты изделия, но и количество соединений, которые в свою очередь повышают вероятность протечки жидкости. Индивидуальный тип охлаждения очень эффективен, в особенности если необходимо отвести несколько киловатт тепловой мощности с малой скоростью потока (порядка 6 л/мин). При этом перепад давления для каждого элемента вполне допустим для прокачки жидкости, но для всей системы дополнительно понадобятся гидронасос и теплообменник — общие на все охладители или индивидуальные. В ряде применений построение систем на базе охладителей серии OM неудобно для потребителя. Современное развитие преобразователей с использованием приборов модульного исполнения дает множество преимуществ в построении силовых схем, где для повышения их мощности востребованы жидкостные охладители для группового размещения приборов.

Жидкостные охладители для силовых модулей

Одна из современных тенденций в области конструкции полупроводниковых приборов силовой электроники — развитие IGBT, SFRD, MOSFET, диодов и тиристорных модульного исполнения. Конструктивно применение модулей имеет ряд неоспоримых преимуществ: изолированное основание модулей от потенциальных контактов; упрощенный монтаж и ошиновка силовых схем, что позволяет снижать их стоимость по сравнению с приборами таблеточного исполнения. Несмотря на то, что конструкция мощных силовых диодно-тиристорных, IGBT- и MOSFET-модулей с изолированным основанием предполагает только одностороннее охлаждение, построение схем с их применением становится все более популярным. При этом одним из важных этапов в их проектировании становится выбор эффективного охладителя.

Моделирование

Первым этапом разработки и проектирования охлаждающего устройства является математическое моделирование, учитывающее электрофизические процессы в охладителях, происходящие в реальных режимах эксплуатации. Для проведения расчетов задаются расход охлаждающей воды и суммарная мощность потерь, выделяемая источником тепла. Рассчитываются основные характеристики охлаждаю-

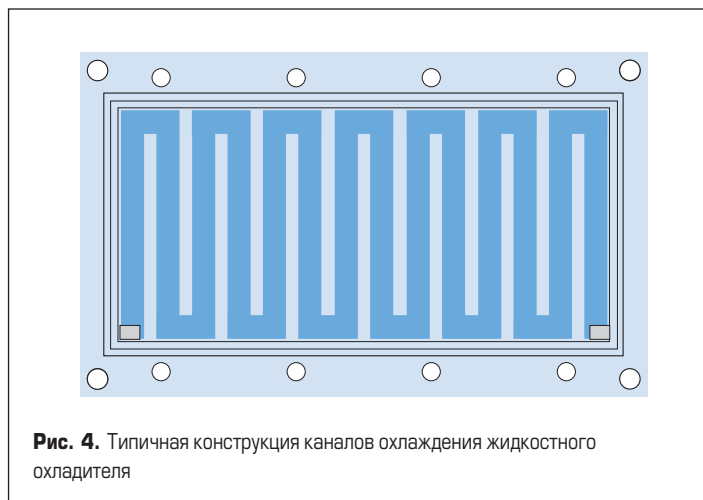


Рис. 4. Типичная конструкция каналов охлаждения жидкостного охладителя

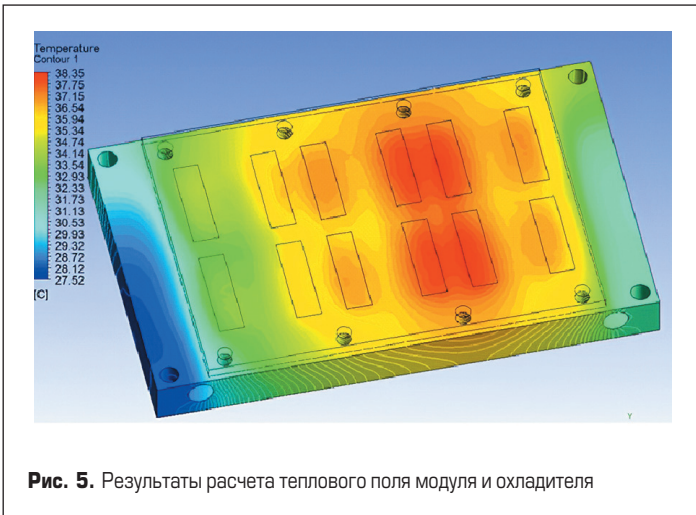


Рис. 5. Результаты расчета теплового поля модуля и охладителя

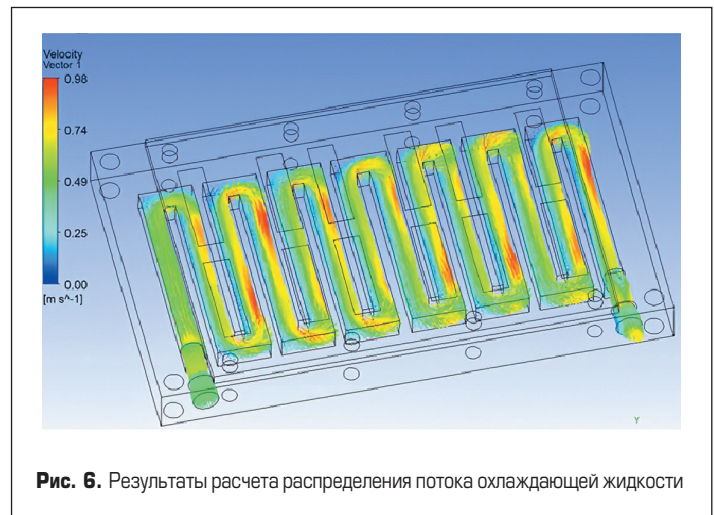


Рис. 6. Результаты расчета распределения потока охлаждающей жидкости

щего устройства: тепловое сопротивление и перепад давления потока охлаждающей жидкости.

Рассмотрим ход проведения расчета на примере фрезерованного охладителя размерами 240×145×21 мм, предназначенного для охлаждения одного IGBT-модуля, в корпусе M18 с размерами основания 190×140 мм (рис. 3). Схематичное изображение конструкции охладителя с представлением каналов показано на рис. 4. Для более эффективного отвода тепла от модулей расположение каналов задается в зависимости от размещения полупроводниковых кристаллов в модуле.

На рис. 5, 6 приведены окончательные результаты расчетов теплового сопротивления и скорости потока охлаждающей воды. На рис. 5 показано распределение температурного поля системы «модуль – охладитель». Расчет температурного поля позволяет выявить наиболее критичные температурные области, для которых

в ряде случаев требуется дополнительная оптимизация конструкции охладителя. На рис. 6 представлены результаты гидродинамического расчета, который позволяет выявить, в числе прочего, области застоя охлаждающей жидкости, которые существенно снижают эффективность теплосъема.

Конструкция и технология жидкостных охладителей

Каналы для охлаждающей жидкости могут быть изготовлены различными способами: фрезерованием, сверлением, запрессовкой трубок в несущую плиту и т. д. Организация различных параллельных и последовательных потоков охлаждающей жидкости осуществляется с помощью соединительных трубок или фитингов, резьбовых стержней, а также с применением коллекторного подвода охлаждающей жидкости.

В настоящее время предприятие изготавливает медные и алюминиевые жидкостные охладители, в которых каналы формируются сверлением. ПАО «Электровыпрямитель» имеет большой опыт изготовления общих охлаждающих плит по техническим требованиям заказчика. На сегодня самым большим по размерам является изготовление медной моноплиты 285×285 мм, на которой располагались шесть модулей: четыре модуля в корпусе 101×133 мм и два модуля в корпусе 94×34 мм. При проектировании охладителя учитываются требования потребителя по расположению модулей на моноплите. В зависимости от пожеланий заказчика возможны другие варианты реализации систем охлаждения. Например, по заказу потребителя разработан охладитель 145×360 мм для размещения двух IGBT-модулей в корпусе M17 (130×140 мм). В этом разделе для создания жидкостных каналов использован метод двухстороннего сверления.

Применение экструдированных алюминиевых плит с готовыми отверстиями и современных методов сварки, в том числе сварка трением с перемешиванием [3], позволяет изготовить широкий ряд алюминиевых охлаждающих моноплит для группового размещения модулей. Пример конструкции и теплового расчета одного из реализованных вариантов приведен на рис. 7 и 8.

В ПАО «Электровыпрямитель» ведется не только разработка новых охлаждающих систем, но и модернизация ранее разработанных конструкций с применением новых технических решений. Испытания жидкостного охладителя OB48 с устройством распре-

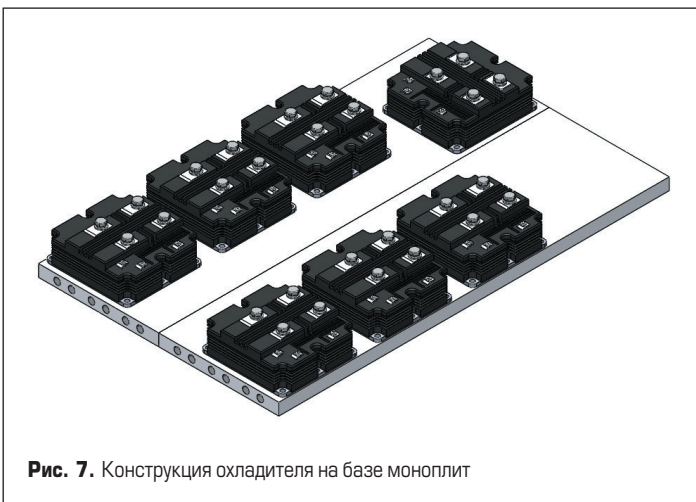


Рис. 7. Конструкция охладителя на базе моноплит

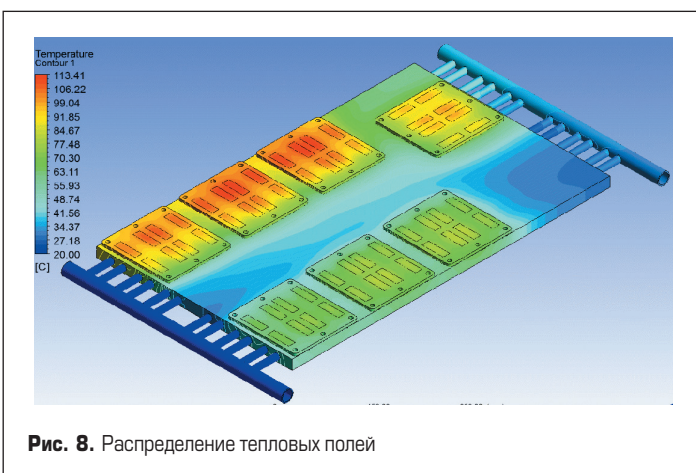


Рис. 8. Распределение тепловых полей

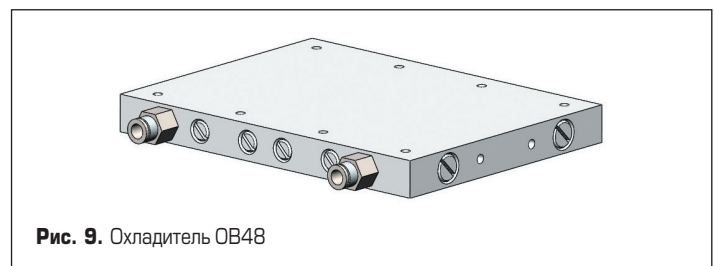


Рис. 9. Охладитель OB48

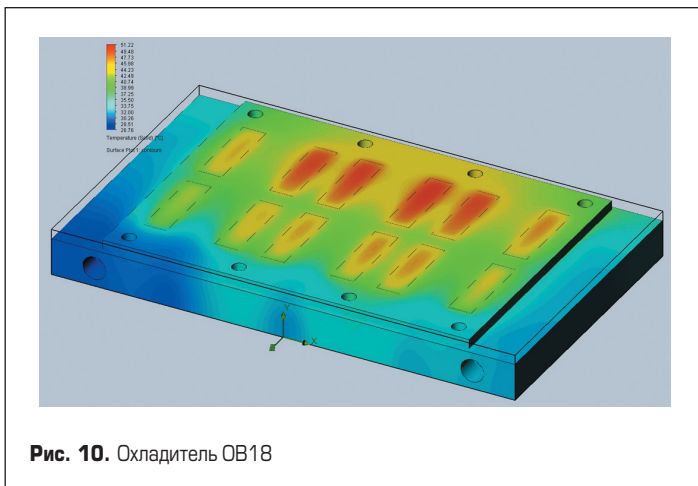


Рис. 10. Охладитель OV18

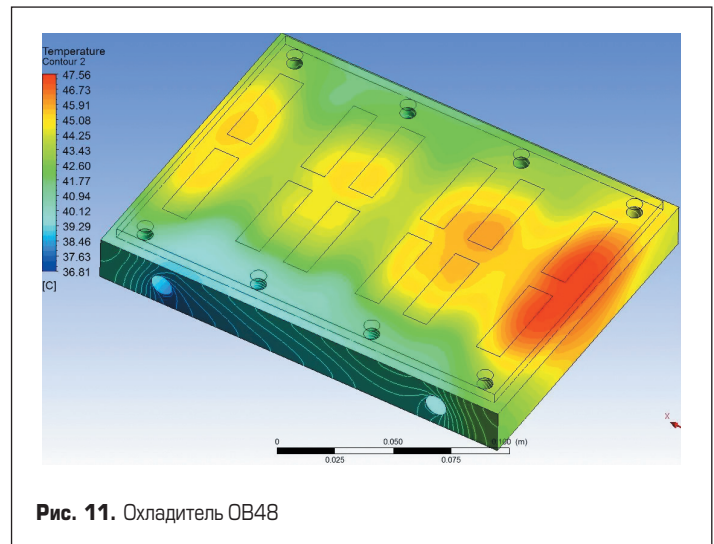


Рис. 11. Охладитель OV48

деления потока жидкости (рис. 9) по сравнению с прототипом — охладителем OV18 подтвердили снижение теплового сопротивления охладителя на 20%. Испытания проведены в собственной специализированной лаборатории тепловых и аэродинамических измерений.

В конструкции охладителя OV18 выявлено наличие «мертвых» зон (рис. 10), к которым ограничен доступ охлаждающей жидкости. На этих участках присутствует минимальная эффективность охлаждения и, как следствие, имеются зоны перегрева.

В конструкции вновь разработанного охладителя OV48 учтены предыдущие конструктивные недоработки. В результате проведенных расчетов проведена оптимизация конструкции, снижено его тепловое сопротивление и увеличены основные эксплуатационные характеристики (рис. 11).

Сравнительные параметры охладителей OV18 и OV48, подтвержденные испытаниями, показаны на рис. 12.

Заключение

Широкий выбор силовых полупроводниковых приборов и модулей, а также охлаждающих систем и аксессуаров, наличие квалифицированной технической поддержки от одного производителя предоставляет разработ-

чикам преобразовательной техники возможность выбора качественных и оптимальных технических вариантов для решения поставленных задач.

Дальнейшее совершенствование электротехнических устройств и увеличение основных эксплуатационных параметров высокоомощных силовых полупроводниковых приборов и модулей ставят задачи по разработке новых высокоэффективных охлаждающих систем. Для решения проблем, связанных с повышением эффективности и надежности жидкостных охладителей, а также снижением их стоимости, специалисты компании «Электровыпрямитель» продолжают дальнейшие работы по освоению новых технологий их производства.

Литература

1. Мартыненко В., Мускатиньев В., Чибиркин В., Елисеев В. Современная отечественная элементная база для силовой преобразовательной техники // Силовая электроника. 2005. № 3.
2. www.elvpr.ru
3. Васильев П., Васильев И., Шведов М., Григорьев В. Сварка трением с перемешиванием в производстве изделий силовой электроники // Силовая электроника. 2019. № 5.

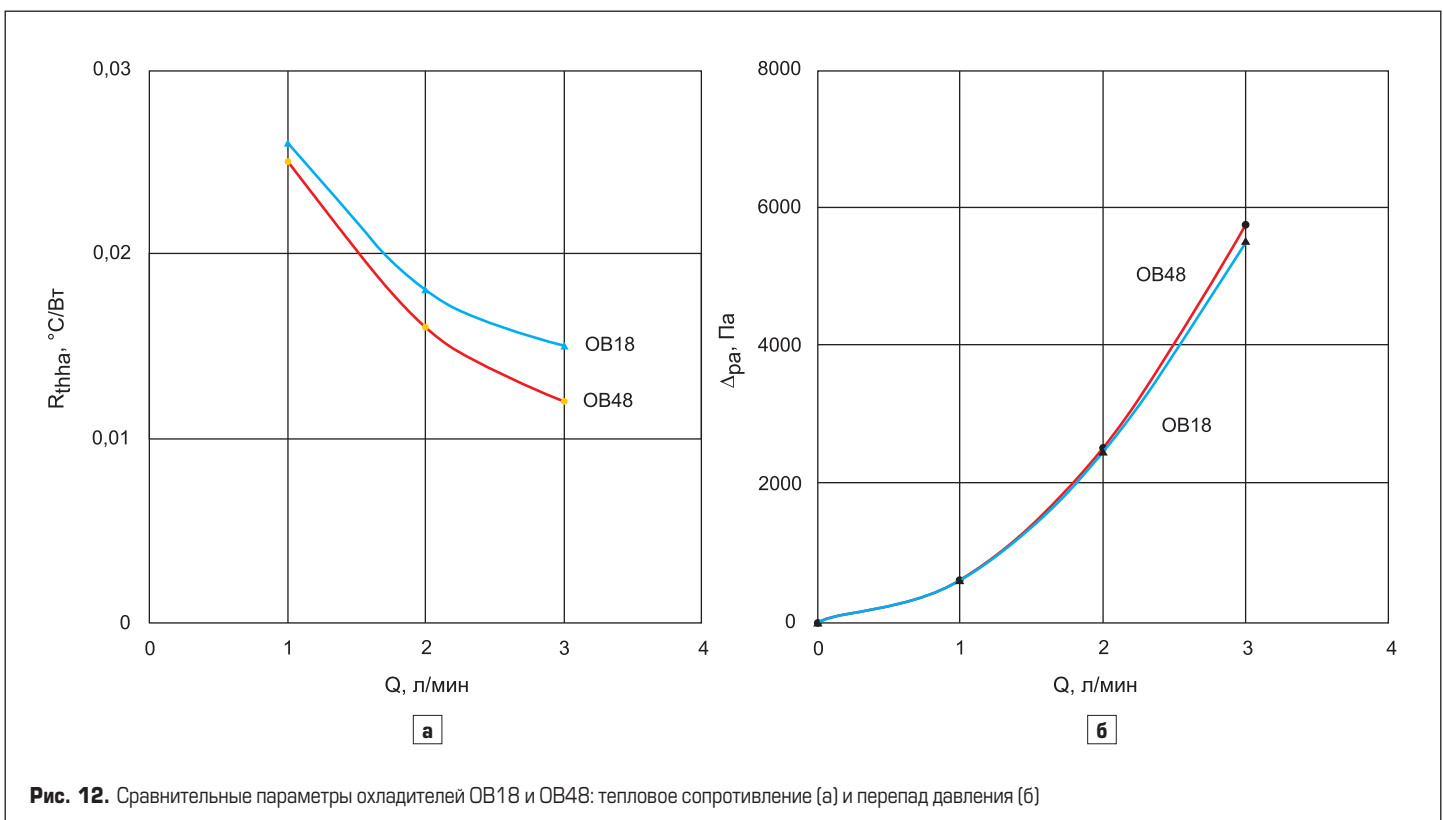


Рис. 12. Сравнительные параметры охладителей OV18 и OV48: тепловое сопротивление (а) и перепад давления (б)