

Светлана Пескина (г. Москва)

Иммерсионное охлаждение электроники

Копирование, тиражирование и размещение данных материалов на Web-сайтах без письменного разрешения редакции преследуется в административном и уголовном порядке в соответствии с Законом РФ.



Взрывной рост Интернета, искусственного интеллекта, облачных сервисов и высокопроизводительных вычислительных систем привели не только к кардинальным изменениям в работе дата-центров (или центров обработки данных — ЦОД), но и в самом качестве жизни. Но все имеет свою цену. Сегодня дата-центры потребляют колоссальное количество электроэнергии, в США оно доходит до 2% от общего объема энергопотребления страны. Энергия, потребляемая подсистемой охлаждения, может варьироваться от 2 до 70% от общего количества энергии ЦОД. Один крупный дата-центр может потреблять в день электроэнергии столько же, сколько небольшой город в 9 тысяч жителей. При этом основная часть электричества уходит на работу охлаждающих устройств и вентиляторов. Поэтому вопрос эффективности отвода тепла в современном ЦОД — это вопрос построения максимально эффективной системы отвода тепла от массива серверов.

Для сокращения затрат на охлаждение серверов и уменьшения вредного воздействия выбросов в окружающую среду компания 3М разработала новый метод охлаждения для дата-центров — технические жидкости для иммерсионного охлаждения в одно- и двухфаз-

ных системах. Внедрение такого метода охлаждения позволяет сократить энергозатраты на 97% (!) при уменьшении площадей серверных помещений на порядок и поддержке оптимальной рабочей температуры процессоров.

Иммерсионное охлаждение обеспечивает отвод тепла методом непосредственного погружения печатных плат в непроводящую диэлектрическую жидкость. Тепло, выделяемое электронными компонентами, напрямую передается жидкости, устраняя необходимость в активных компонентах охлаждения (таких как термоинтерфейсы, радиаторы и вентиляторы). Такая организация теплоотвода повышает эффективность используемых энергоносителей и уплотняет размещение серверов в стойках. А «собранное» тепло можно использовать для последующих инноваций.

Например, в США энергоэффективность государственных дата-центров регулируется указом президента от 2015 года, согласно которому PUE*

* PUE. Power Usage Effectiveness — эффективность использования энергии, показатель, характеризующий эффективность расходования энергии в центре обработки данных как отношение всей потребленной объектом энергии к количеству, расходуемому на работу вычислительных устройств.

всех дата-центров должна составлять менее 1,5, а новые дата-центры должны достичь к 2025 году уровня PUE в пределах 1,2...1,4.

В 2014 году компания 3М получила бронзовую медаль Эдисона (награда, вручаемая институтом инженеров электротехники и электроники IEEE) за технологию двухфазного охлаждения посредством жидкостей Novac.

Основные типы иммерсионного охлаждения

Основными методами охлаждения электроники являются воздушное (преимущественно) и жидкостное.

Сегодня большинство ЦОД построено на воздушном или воздушно-водяном охлаждении. Сравнение с воздушным методом охлаждения приведено на рис. 1 и в таблице 1.

В качестве жидкостного охлаждения сегодня используются различные материалы: вода, деионизированная вода, ингибированные гликоли (этиленгликоль и пропиленгликоль), диэлектрические жидкости. Принципиальное значение при выборе типа жидкости имеет вопрос совместимости жидкости со смачиваемыми материалами, что позволит избежать коррозии при долгосрочном использовании (см. таблицу 2).

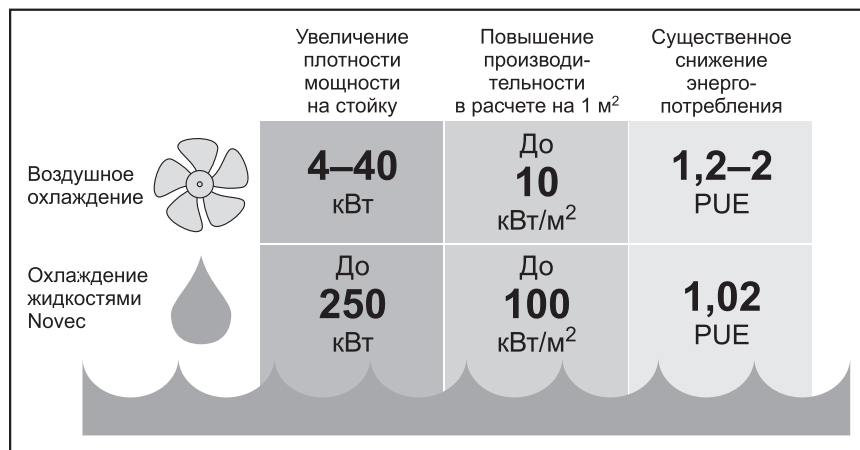


Рис. 1. Преимущества двухфазного охлаждения перед воздушным

Таблица 1. Сравнение воздушного и жидкостного охлаждения (данные ГК РСК)

Метод охлаждения	Воздушное	Жидкостное	Разница
Время выполнения теста	63 мин. 21сек.	59 мин. 29 сек.	6,5%
Средняя электрическая мощность	491 Вт	425 Вт	15,5%
Потребленная сервером энергия	0,518 кВт/ч	0,421 кВт/ч	23%
PUE	1,6	1,06	50%
Оценка общей потребленной энергии для теста	0,83 кВт/ч	0,44 кВт/ч	88%

Таблица 2. Совместимость материалов с различными охлаждающими жидкостями

Материал	Вода	Гликоли	Деионизированная вода	Диэлектрические жидкости
Медь	+	+	—	+
Алюминий	—	+	—	+
Нержавеющая сталь	+	+	+	+

Вода является отличным решением для охлаждения, она имеет хорошую теплопроводность и совместима с медью. Для ее использования в системе охлаждения необходимо предусмотреть установку дополнительных фильтров или деионизаторов воды, поскольку примеси в водопроводной воде очень быстро приведут к образованию коррозии. Для защиты от коррозии в воду добавляют фосфаты, они являются эффективной антикоррозионной добавкой для нержавеющей стали

и большинства алюминиевых компонентов, а также обеспечивают pH-контроль. Их единственный недостаток — отложение осадка вместе с кальцием.

Этиленгликоли широко используются в автомобильной промышленности (антифриз), однако их нельзя использовать для охлаждения электроники, поскольку они содержат ингибиторы с силикатами, которые разрушают герметизирующие прокладки и способствуют гелеобразованию. Сегодня этот тип охлаждения использу-

ется в оборудовании для пищевой промышленности.

По сравнению с водопроводной водой деионизированная вода является хорошим изолятором, но отличается высокой резистивностью и коррозионностью, поэтому в нее добавляют антикоррозионные добавки. Кроме того, трубки должны быть выполнены из сверхчистого материала, а любая арматура иметь покрытие никелем.

Технические жидкости Novac (производство ЗМ)

имеют ряд преимуществ перед другими диэлектрическими жидкостями, например, минеральным маслом. Помимо того, что жидкости ЗМ являются невоспламеняющимися и невзрывоопасными, они имеют необходимую точку кипения и термостабильность для построения двухфазной системы охлаждения. Обслуживание и ремонт оборудования не вызовет проблем, поскольку погруженные в жидкость платы остаются чистыми и сухими (именно сухими, несмотря на то, что они погружены в якобы «жидкость»). Кроме того, масло вызывает множество проблем с очисткой как охлаждаемой аппаратуры, так и помещений, где оно расположено (в случае протечки). Диэлектрические жидкости ЗМ совместимы с любыми материалами (см. таблицу 3), в то время как масло плохо совместимо с пластиковыми кабелями, может оставлять осадок на компонентах. Также масло долго сохраняет тепло, что затрудняет быстрое и своевременное обслуживание оборудования.

Таблица 3. Совместимость жидкостей Novac с различными материалами

Металлы	Пластмассы	Эластомеры
Алюминий	Акрил (PMMA)	Бутиловый каучук
Медь	Полиэтилен	Натуральный каучук
Углеродистая сталь	Полипропилен	Нитрильный каучук
Нержавеющая сталь 302	Поликарбонат	EPDM
Латунь	Полиэстер	
Молибден	Эпоксидная смола	
Тантал	РЕТ	
Вольфрам	фенол	
Cu/Be-сплав C172	ABS	
Mg-сплав AZ32B		

Диэлектрические охлаждающие жидкости 3М

В 1950 годы компания 3М выпустила первую фторсодержащую охлаждающую жидкость для военной авионики (Fluorinert). 70...80-е гг. XX века стали эрой расцвета материалов для прямого контактного охлаждения, благодаря чему стало возможным развитие радарной техники, силовой электроники и суперкомпьютеров.

В 1996 году 3М разработала новый тип жидкости для замены озоноразрушающих веществ (таких как CFC, HFC) — жидкости под торговой маркой Novac.

Жидкости Fluorinert

Жидкости Fluorinert (относятся к классу полностью фторированных жидкостей, известных как перфторуглероды (PFC). Прозрачные, без цвета и запаха, невоспламеняемые жидкости имеют ряд особенностей, делающих их привлекательными для иммерсионного охлаждения печатных плат, в их число входят отличные диэлектрические свойства, широкий диапазон точек кипения и хорошая совместимость с различ-

ными материалами. Физические характеристики жидкостей представлены в таблице 4. Эти жидкости используются для решения сложных и ответственных задач теплоотвода, например, в пассажирских экспрессах в Японии и в экспериментальном космическом модуле Kibo (Hope) на МКС. Также они широко используются как практический материал для прямого охлаждения силовых конвертеров и в испытательных лабораториях.

Несмотря на то, что жидкости Fluorinert не разрушают озоновый слой, они имеют долгий срок жизни в атмосфере и обладают высоким потенциа-

лом глобального потепления. По этой причине, как и все перфторуглероды, они должны использоваться только в тех приложениях, где требуются их уникальные свойства, при этом особое внимание следует уделить контролю выбросов и их минимизации.

Жидкости Fluorinert должны использоваться только в закрытых резервуарах и системах, особые меры безопасности требуются для предотвращения попадания в глаза и на кожу. Несмотря на то что жидкость инертная, практика ее применения в суперкомпьютерах Cray-2 показала, что в течение продолжительного срока эксплуатации она расщепляется и выделяет высокотоксичный перфторизобутан. Для его удаления необходимо использовать катализаторные очистители.

Жидкости Novac

Поскольку перфторуглероды (Fluorinert) имеют высокий потенциал глобального потепле-

Таблица 4. Характеристики жидкостей Fluorinert

Тип жидкости	FC-40	FC-770
Технология	1-фазное охлаждение	
Температура кипения, °C	155	95
Температура застывания, °C	-57	-127
Критическая температура, °C	270	238
Молекулярная масса, г/моль	650	399
Критическое давление, МПа	1,18	2,47
Давление пара, кПа	0,43	6,6
Теплота парообразования, кДж/кг	68	86
Плотность жидкости, кг/куб. м	1850	1793
Коэффициент расширения, К	0,0012	0,0015
Кинетическая вязкость, сСт	1,8	0,79
Удельная теплота, кДж/кг·К	1100	1038
Теплопроводность, Вт/м·К	0,065	0,063
Поверхностное натяжение, мН/м	16	15
Диэлектрическая прочность, зазор 0.1°, кВ	>40	>40
Диэлектрическая постоянная при 1кГц	1,9	1,9

Таблица 5. Характеристики жидкостей Noves

Тип жидкости	Noves 7000	Noves 7100	Noves 7200	Noves 7300	Noves 7500
Технология	2-фазное охлаждение			1-фазное охлаждение	
Температура кипения, °С	34	61	76	98	128
Температура застывания, °С	-122	-135	-138	-38	-100
Критическая температура, °С	165	195	210	243	261
Молекулярная масса, г/моль	200	250	264	350	414
Критическое давление, МПа	2,48	2,23	2,01	1,88	1,55
Давление пара, кПа	65	27	16	5,9	2,1
Теплота парообразования, кДж/кг	142	112	119	102	89
Плотность жидкости, кг/куб. м	1400	1520	1420	1660	1614
Коэффициент расширения, К	0,0022	0,0018	0,0016	0,0013	0,0013
Кинетическая вязкость, сСт	0,32	0,38	0,41	0,71	0,77
Удельная теплота, кДж/кг·К	1300	1183	1220	1140	1128
Теплопроводность, Вт/м·К	0,075	0,069	0,068	0,063	0,065
Поверхностное натяжение, мН/м	12,4	13,6	13,6	15,0	16,2
Диэлектрическая прочность, зазор 0,1°, кВ	-40	-40	-40	-40	-40
Диэлектрическая постоянная при 1кГц	7,4	7,4	7,3	6,1	5,8

ния, компания 3М разработала новый тип охлаждающей жидкости Noves 7100, не наносящий вреда окружающей среде (на рис. 2 показаны формулы жидкостей Fluorinert FC-72 и Noves 7100). Жидкость Noves 7100 выполнена на основе метоксинонафторбутана (C4F9OCH3), состоящего из двух неразделимых изомеров с практически идентичными свойствами: (CF3)2CF2CF2OCH3 (CAS-номер 163702-08-7) и CF3CF2CF2CF2OCH3 (CAS-номер 163702-07-6).

Жидкости Noves (см. таблицу 5) позволяют создавать двухфазные (2PIC) иммерсионные системы охлаждения с полукрытыми контейнерами (Open Bath Immersion, OBI). Уже сегодня применение этих жидкостей в дата-центрах демонстрирует хорошие результаты, экономя до 95% электроэнергии и сокращая в 10 раз занимаемые оборудованием площади. Двухфазные системы не требуют охладителей, вентиляторов или герметичных корпусов.

Система однофазного охлаждения

Охлаждающие жидкости могут применяться в одной из двух систем — однофазной или двухфазной. Различие между ними заключается в наличии или отсутствии фазового перехода, т.е. перехода жидкости в пар. В однофазной системе (рис. 3) жидкость циркулирует посредством дополнительного насоса и не переходит в пар. Для таких систем выбирают

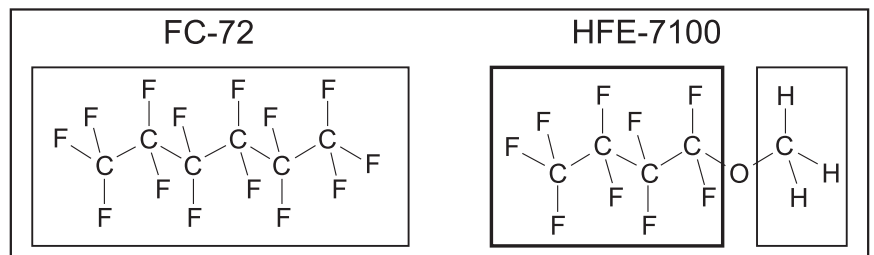


Рис. 2. Сравнение формул жидкостей Fluorinert и Noves

жидкости с высокой точкой кипения (более +80°С). Двухфазная система не требует насоса,

использует фазовый переход и считается более эффективным методом охлаждения.

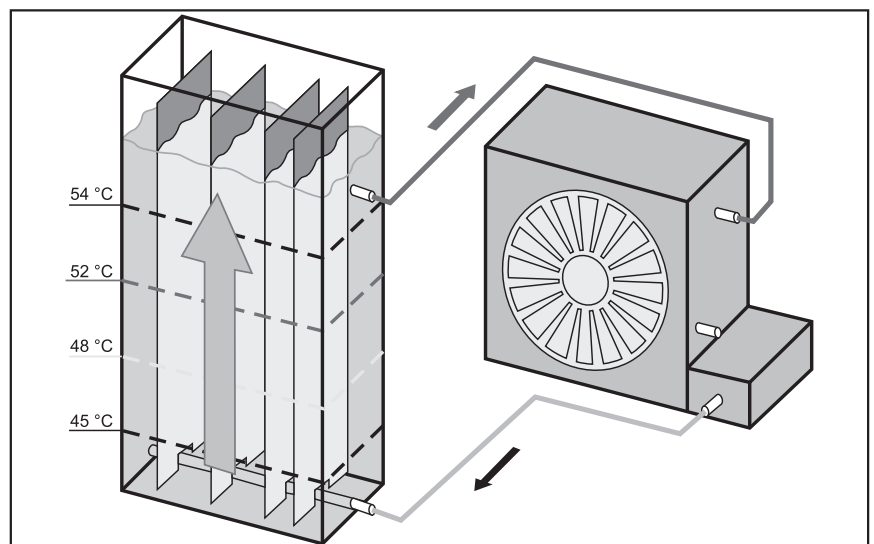


Рис. 3. Схема однофазного типа охлаждения без фазового перехода

Для правильного выбора охлаждающей жидкости необходимо учитывать рабочий температурный диапазон. Например, требуется охладить полупроводниковый тестер, его рабочая температура находится в диапазоне $-40...+40^{\circ}\text{C}$. Из этого можно предположить, что температура охлаждающей жидкости не поднимется выше 40°C (она не должна закипать при этой температуре), в то время как в чиллере (охладителе) она может достигать до -50°C . Таким образом, необходимо найти жидкость, которая будет работать в этом диапазоне (рис. 4) — в данном случае подойдет FC-72. Из ее характеристик следует, что при -50°C вязкость ее составит 1,5 сСт — чуть выше воды при комнатной температуре. Поэтому жидкость будет достаточно легко поддаваться насосной перекачке без дополнительных затрат электроэнергии.

Однако применение FC-72 может привести к лишним потерям жидкости, так как система работает в широком температурном диапазоне, жидкость будет значительно расширяться и сжиматься (обычно 1% от объема на каждые 10°C). Большинство расширительных резервуаров чиллеров вентилируется для подачи и очистки воздуха посредством этих расширительных отсеков. Поскольку воздух в этих резервуарах насыщается парами жидкости, единственный путь — уменьшить количество жидкости, переносимой воздухом за каждый термоцикл — это сократить

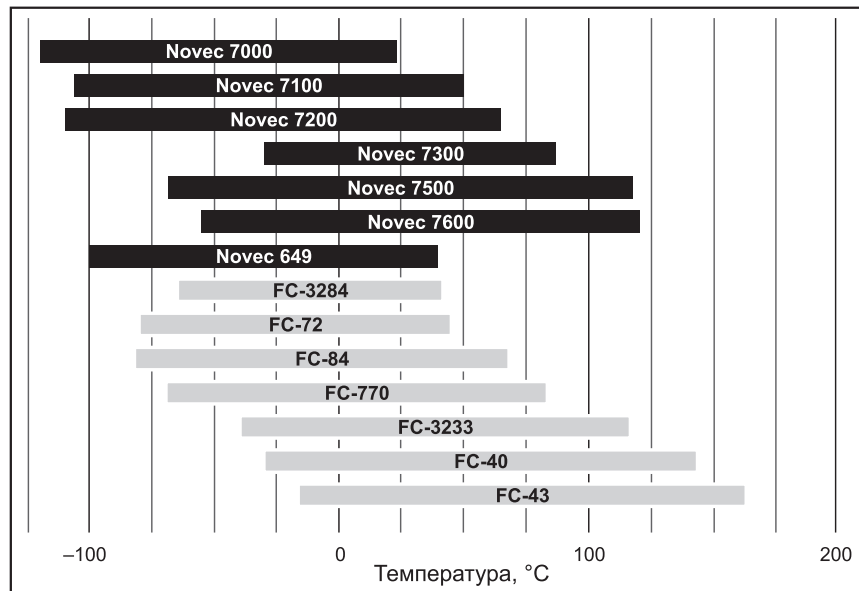


Рис. 4. Рекомендуемый диапазон температур для насосных однофазных систем

давление пара в жидкости. Это можно сделать, если выбрать жидкость с более высокой температурой кипения.

Рассмотрим жидкость FC-84, у которой точка кипения составляет 80°C . У нее давление пара при $+40^{\circ}\text{C}$ составляет только 40% от FC-72. Несмотря на то что реальные потери испарений необходимо рассчитывать на основании отношения давления пара и температуры, применение FC-84 позволит значительно сократить потери жидкости. Вязкость FC-84 при -40°C равна 3 сСт (см. рис. 5), то есть жидкость достаточно подвижна для насосной перекачки. Применение жидкости с еще более высокой точкой кипения (FC-77) сократит давление пара при 40°C до 20% по отношению к FC-72, вязкость FC-77 равна 6,6 сСт, также вполне допустимо для данного приложения.

Несмотря на достаточно узкий диапазон рабочих темпе-

ратур, выбор фторсодержащих жидкостей Fluorinert или Novec для однофазного охлаждения опирается обычно на компромисс между летучестью высокого порога температуры и теплопередачей или эффективностью насосной подкачки на нижнем пороге температуры.

Система двухфазного охлаждения

Двухфазная система охлаждения предполагает наличие резервуара, где размещены серверные платы, наполненного жидкостью Novec 7100 с температурой кипения 61°C . Когда процессоры излучают тепло, жидкость нагревается и закипает, горячий пар поднимается вверх к крышке резервуара. В верхней части резервуара размещается охлаждающий змеевик (с водяным охлаждением), на котором пар конденсируется и снова превращается в жидкость. Таким образом, жидкость повторно возвращается в

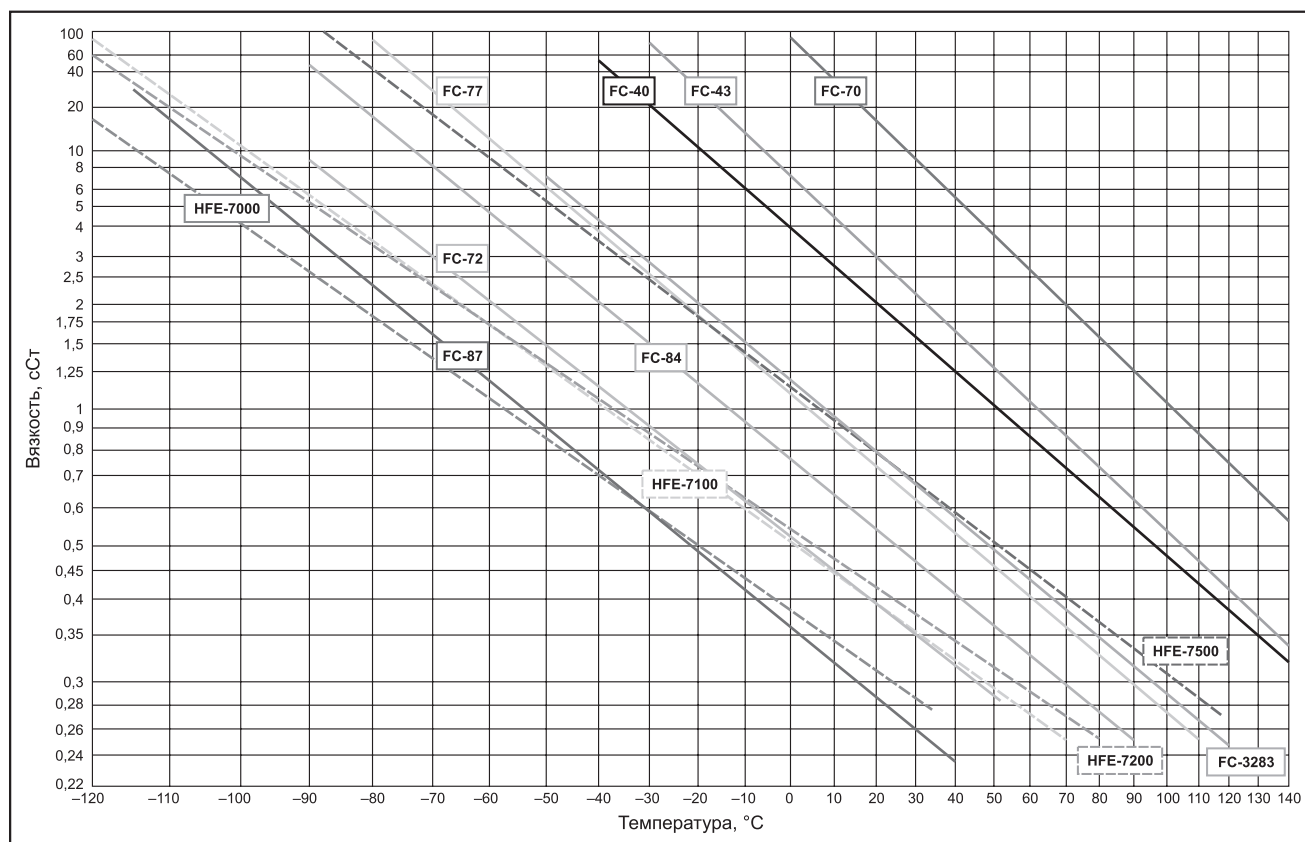


Рис. 5. Зависимость вязкости от температуры жидкости

резервуар без использования насосов (рис. 6). Подобная система позволяет экономить до 95% энергии с минимальными потерями жидкости.

Печатные платы, предназначенные для охлаждения иммерсионным способом, не содержат радиаторов или охлаждающих площадок. Компоненты на них могут размещаться более плотно, а процессоры разгоняться быстрее (например, 500 Вт ASIC можно разогнать до 750 Вт).

Выбор жидкости для двухфазного охлаждения обычно основывается на ее точке кипения. Для оборудования пайки струей горячего пара точка кипения жидкости выбирается так, чтобы ее уровень соответствовал точке эвтектики при-

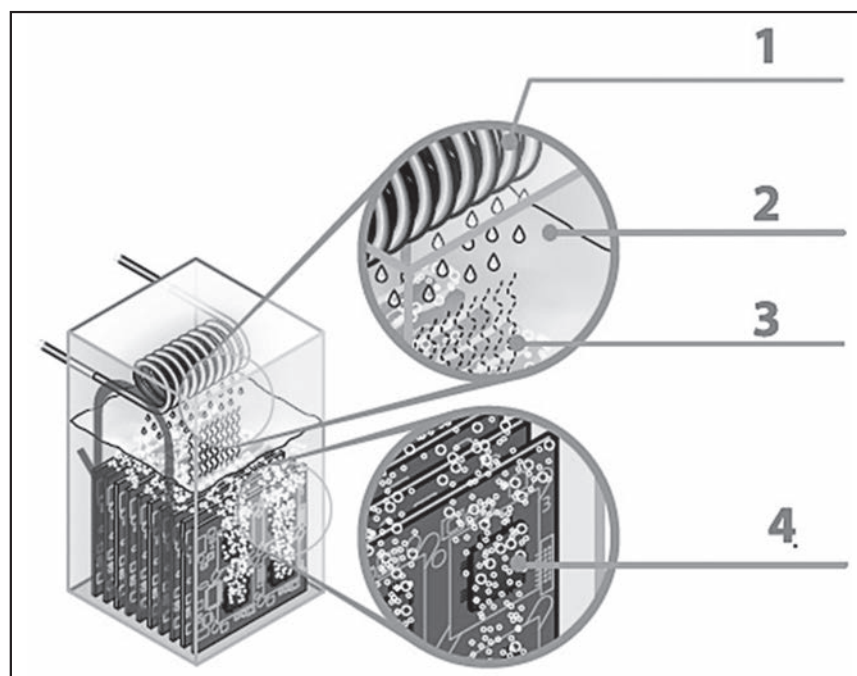


Рис. 6. Механизм двухфазного охлаждения, где:
1 — пар конденсируется на крышке или катушке радиатора;
2 — жидкость стекает в резервуар;
3 — пар поднимается вверх;
4 — жидкость, нагретая от работы компонентов, переходит в пар

поя. Для систем охлаждения электроники точка кипения жидкости должна поддерживать требуемый рабочий температурный режим компонентов.

Также следует учитывать температуру оконечного радиатора. В некоторых случаях жидкость FC-72 используется не по причине того, что ее точка кипения 56°C является идеальной для работы электроники, а потому что эта точка кипения позволяет конденсатору выбрасывать тепло в окружающую среду без компрессора. Следует учитывать, что жидкостям Fluorinert или Novoc обычно нужны тепловые потоки более 2 Вт/см² для поддержки кипения. Перегрев стенок обычно составляет 15...25°C в процессе кипения и критические тепловые потоки обычно составляют 15...20 Вт/см² для кипящего резервуара. Более подробно построение системы двухфазного охлаждения будет рассмотрено во второй части статьи.

Экологичность и безопасность для обслуживающего персонала

Организация дата-центров с иммерсионным охлаждением не должна идти в ущерб безопасности рабочей среды для обслуживающего персонала. Все технические жидкости 3М отвечают всем требованиям по безопасности (см. таблицу 6), имеют низкую токсичность и не воспламеняются.

Снижение энергопотребления хорошо не только само по себе, это позволяет улучшить

Таблица 6. Данные о безопасности жидкостей 3М

Острая летальная ингаляционная концентрация	Более 100 000 ppm (4 часа)
Пероральное воздействие	Практически не токсичная (более 5 г/кг)
Раздражение глаз и кожи	Практически не вызывает раздражения
Вдыхание (90 дней)	Норматив воздействия 750 ppm, имеются подробные данные о результатах исследования
Сердечная сенсбилизация	Отсутствие признаков сенсбилизации при уровне воздействия до 100000 ppm
Испытания на экотоксичность	Очень низкая токсичность в воде

экологию. Меньшие площади дата-центров экономят строительные материалы и ресурсы на обслуживание. «Зеленый» дата-центр с жидкостями 3М обладает следующими преимуществами:

- благоприятный экологический профиль;
- низкий потенциал глобального потепления;
- нулевой потенциал разрушения озонового слоя земли.

Примеры внедрения

Сегодня иммерсионное охлаждение посредством жидкостей 3М только выходит на российский рынок. Однако на ми-

ровом рынке она уже имеет 50-летнюю историю успеха. Эта технология сегодня используется в суперкомпьютерах Intel и SGI — ведущих игроках на рынке высокопроизводительных вычислений. В демонстрации технологии 3М используются чипы ES-2600 Xeon Intel. Тестовые испытания серверов Intel показали энергоэффективность 1,02-1,03 PUE.

Приведем несколько примеров успешного внедрения.

Суперкомпьютер Suiren («водяная лилия») (рис. 7) японских компаний PEZY Computing и ExaScaler Inc. использует однофазное охлаждение на основе

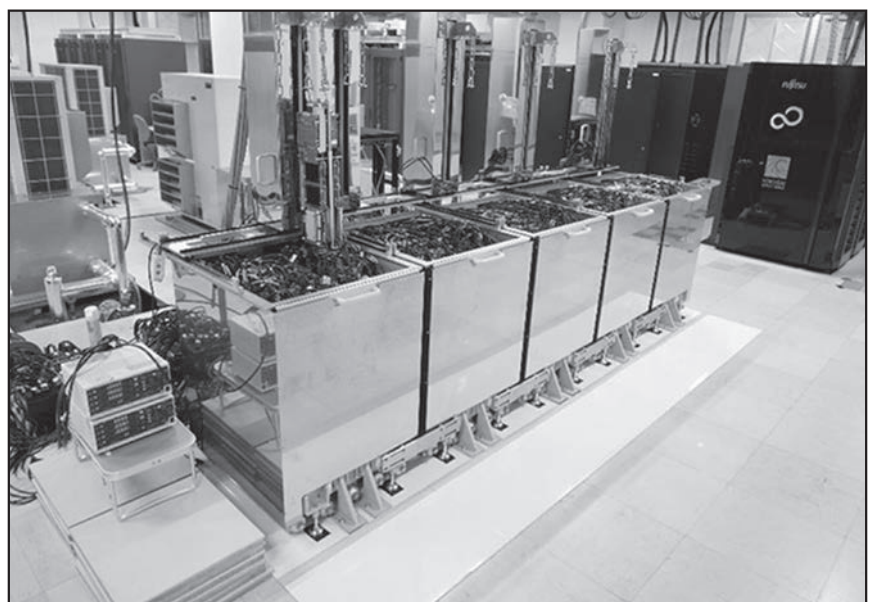


Рис. 7. Суперкомпьютер Suiren

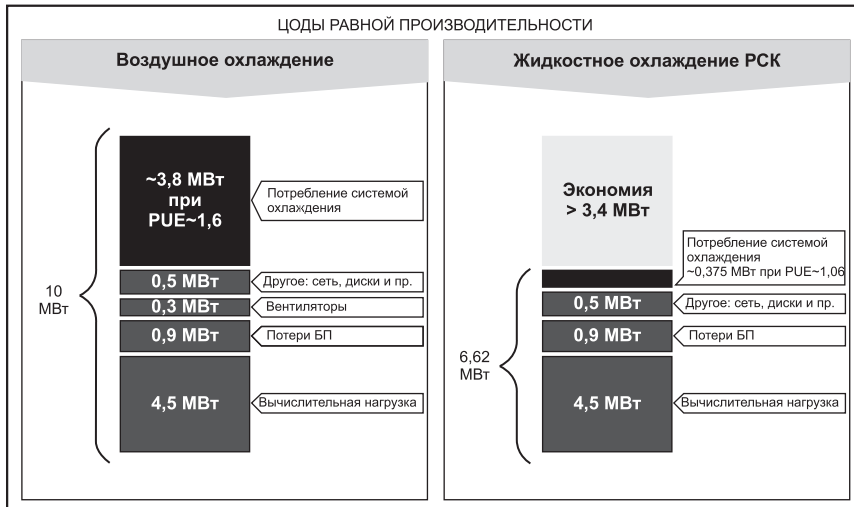


Рис. 8. Сравнение систем с воздушным и жидкостным охлаждением (оценки ПСК)

жидкости 3M Fluorinert, что помогло ему войти в лист «Green 500» самых высокопроизводительных компьютеров. Этот рейтинг ведется с 2007 года, в основе критерия производительности лежит число операций, выполненных за 1 Вт. В 2014 году они заняли 2 место, достигнув производительности 4,95 Гфлопс/Вт, затратив на это 37,38 кВт.

Прорыв в эффективности дата-центров был сделан компанией Allied Control (сегодня принадлежит BitFury Group), ведущим провайдером Blockchain технологии. В 2014 году компания, уже имеющая опыт двух проектов по иммерсионному охлаждению, запустила самый большой свой проект — масштабируемая система 40+ МВт на 160 емкостей с плотностью мощности 250 кВт на емкость и эффективностью энергопотребления PUE 1,02 (отметим, что сегодня лучшими мировыми стандартами являются значения 1,5). Это будет самый мощный дата-



Рис. 9. Внешний вид узла ПСК Торнадо

центр с погружным охлаждением в мире. В качестве охлаждающей жидкости был выбран Novac 7100.

Примеры совсем не ограничиваются зарубежным опытом, в России уже несколько компаний успешно применяют охлаждающие жидкости 3M. Например, интегратор и разработчик суперкомпьютерных решений компания ПСК использует прямое жидкостное охлаждение в своей линейке ЦОД. На рис. 8 приведено сравнение систем с воздушным и жидкостным охлаждением ПСК [2].

Технология, применяемая ПСК, позволяет реализовать

жидкостное охлаждение для стандартных серверных плат, процессоров и памяти, но также и дополнительных карт расширения, таких как ускорители или сопроцессоры, карты ввода/вывода и прочее. На основе технологии прямого жидкостного охлаждения ПСК была создана архитектура высокоплотного размещения серверов в стойке с прямым жидкостным охлаждением всех серверов — ПСК «Торнадо» (см. рис. 9), обеспечивающая плотность упаковки до 128 серверов в стойке размерами 80×80×200 см. Такая архитектура позволяет отвести до 100 кВт тепловой энергии от одной стойки. Коэффициент эффективности использования энергии равен 1,06, то есть на охлаждение тратится не более 6 % электроэнергии, потребляемой вычислителем. Суммарная экономия затрат на охлаждение составляет до 68 % по сравнению с воздушной или воздушно-водяной системами охлаждения (у которых типичный коэффициент PUE равен 1,5...2).

Другой пример отечественной разработки — суперкомпьютеры «СКИФ-Аврора ЮУрГУ», разработанные компанией «ПСКСКИФ» при участии института программных систем РАН.

Суммируем основные преимущества построения ЦОД и вычислительных центров на иммерсионном охлаждении: — уменьшение энергопотребления, используемого для охлаждения серверов,

- возможность построения «зеленых» дата-центров;
- для обслуживания и ремонта оборудования требуется всего несколько подвижных элементов;
- увеличение плотности размещения серверов, поскольку жидкость более эффективно отводит тепло;
- возможность максимального использования ресурсов процессоров, поскольку

- температура поддерживается ниже термального предела;
 - простота обслуживания, не требуется чистка и сушка;
 - значительное сокращение шумового фона в серверных зонах;
 - защита IT-оборудования от загрязнений окружающей среды, таких как пыль и сера.
- Иммерсионное охлаждение диэлектрическими жидкостями 3М — это новый этап в разви-

тии систем охлаждения не только вычислительных центров, но и всей силовой электроники.

Интернет-источники

1. <https://habrahabr.ru/company/3mruussia/blog/206658/>
2. <http://www.rscgroup.ru/ru/our-technologies/171-tehnologiya-zhidkostnogo-ohlazhdeniya-rsk>

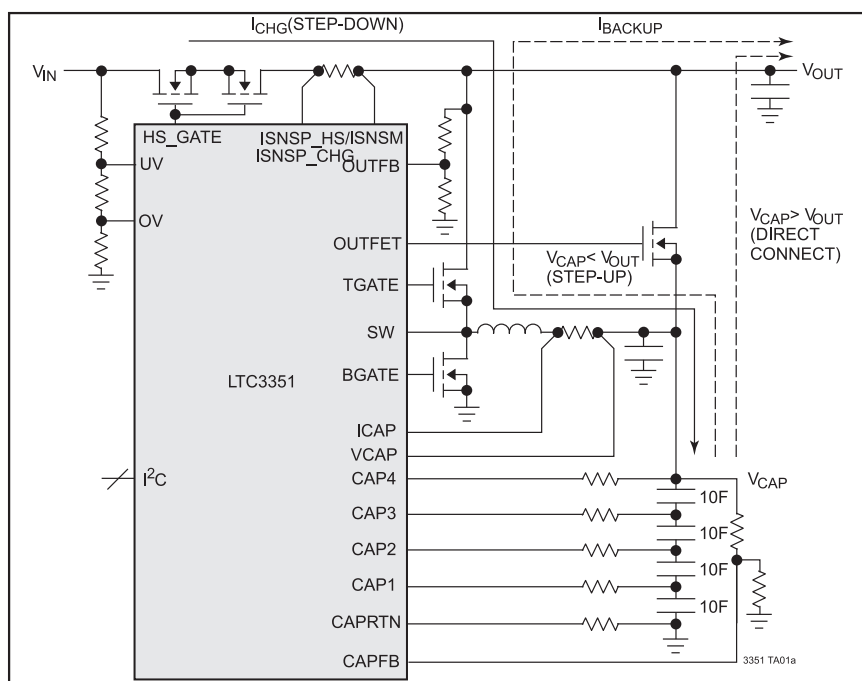
LTC3351 — контроллер для системы бесперебойного питания на основе ионисторов

Analog Devices выпустила микросхему Power by Linear LTC3351, выполняющую функции контроллера резервного питания и зарядного устройства для ионисторов, в которой содержатся цепи защиты, необходимые для безопасного

«горячего» подключения, а также все средства, требующиеся для создания законченного автономного решения резервного питания на основе конденсаторов. В устройство интегрированы контроллер горячей замены и размыкатель

цепи, использующие внешние N-канальные MOSFET и образующие низкоомный путь тока от входа к выходу, а также схема прогрессирующего ограничения, снижающая пусковые броски тока. Устройство надежно обеспечивает кратковременную бесперебойную работу при аварии основного источника в таких приложениях, как твердотельные накопители, модули энергонезависимой памяти (NVDIMM), сигнализаторы сбоев питания в медицинском и промышленном оборудовании и индикаторы «последнего вдоха».

При входных напряжениях от 4,5 В до 35 В поддерживаемые LTC3351 токи заряда и резервного питания превышают 10 А. В режиме резервирования понижающий преобразователь работает в обратном направлении как синхронный повышающий DC/DC-преобразова-



Типовая схема включения LTC3351