Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2026, Том 18, № 5 / 2026, Vol. 18, Iss. 5 https://esj.today/issue-5-2026.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/04ECVN526.pdf

DOI: 10.15862/04ECVN526 (https://doi.org/10.15862/04ECVN526)

5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**
Волохов, А. Ф. Оценка потенциала экономии электроэнергии за счёт жидкостного охлаждения в центрах обработки данных / А. Ф. Волохов, В. А. Бодина, М. А. Кузин, Ю. В. Люлин // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/04ECVN526.pdf. DOI: 10.15862/04ECVN526.

**For citation:**
Volokhov A.F., Bodina V.A., Kuzin M.A., Lyulin Yu.V. Assessment of the electricity saving potential of liquid cooling in data centers. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(5): 04ECVN526. Available at: https://esj.today/PDF/04ECVN526.pdf. DOI: 10.15862/04ECVN526. (In Russ., abstract in Eng.).

**УДК 338.49**

**Волохов Арсений Фёдорович**
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
E-mail: arseniyvolokhov99@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1254147

**Бодина Валерия Алексеевна**
АНОО ВО «Сколковский институт науки и технологий», Москва, Россия
E-mail: bodina_v@inbox.ru

**Кузин Максим Александрович**
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
E-mail: maks.kuzin.05@list.ru

**Люлин Юрий Вячеславович**
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
Преподаватель
Кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: LiulinYV@mpei.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=126707

# Оценка потенциала экономии электроэнергии за счёт жидкостного охлаждения в центрах обработки данных

**Аннотация.** Развитие цифровой экономики сегодня характеризуется резким ростом спроса на вычислительные мощности, обусловленным внедрением технологий искусственного интеллекта. По прогнозам аналитиков, к 2030 году спрос на серверное оборудование на российском рынке удвоится. В настоящее время загрузка существующих мощностей достигает 99 %, создавая дефицит свободных площадей для новых стоек. Традиционно при расширении инфраструктуры центры обработки данных выбирали количественный рост, а именно строительство новых дата-центров. Однако сегодня операторы центров обработки данных все чаще выбирают компактное серверное оборудование с более высокой производительностью, что вынуждает их переходить от традиционных систем воздушного охлаждения к жидкостным. В данном исследовании оценивается экономия электроэнергии при переходе от систем воздушного охлаждения к жидкостным решениям. В работе моделируется энергопотребление и его влияние на стоимость эксплуатации. Полученные результаты показывают, что технология

жидкостного охлаждения позволяет перенаправить 70–80 % тепловой нагрузки от охлаждения внутри серверных стоек к чиллерам (холодильным машинам), тем самым значительно снижая использование воздухоохладителей машинного зала и продлевая период фрикулинга (свободного охлаждения наружным воздухом). В работе авторами рассматриваются процессы и оборудование, благодаря которым снижается энергопотребление на охлаждение серверного оборудования, что приводит к увеличению плотности размещения оборудования и снижению стоимости эксплуатации центров обработки данных; расчёты выполняются с учётом региональных климатических данных. Отдельно проводится сравнение энергозатрат воздушной и жидкостной систем охлаждения и рассчитывается экономия электроэнергии при переходе с воздушной на жидкостную систему. Для условий Московской области переход на жидкостное охлаждение сокращает энергопотребление системы охлаждения примерно на две трети.

**Ключевые слова:** охлаждение центров обработки данных; жидкостное охлаждение; гибридное охлаждение; энергоэффективность; инфраструктура машинного обучения; снижение эксплуатационных расходов; фрикулинг

## Введение

Экономическая целесообразность внедрения систем жидкостного охлаждения в российских центрах обработки данных (ЦОД) приобретает особую актуальность в контексте растущего спроса на высокопроизводительные вычисления, обусловленного глобальной трансформацией в области искусственного интеллекта (ИИ). Переход от традиционного воздушного охлаждения к жидкостным решениям, способным обеспечить теплоотвод до 100 кВт на стойку, становится необходимым по мере роста тепловыделения серверов. Воздушное охлаждение отводит не более 15–20 кВт тепла от одной стойки, тогда как современные серверы для задач ИИ выделяют значительно больше. Ситуацию усугубляет почти полная загрузка существующих ЦОД сегодня: дефицит свободных площадей для новых стоек делает основным путём наращивания вычислительных мощностей повышение плотности размещения оборудования, а не строительство новых объектов.

Данная тематика имеет критически важное значение для российского рынка ЦОД, где по прогнозам, спрос на серверное оборудование удвоится к 2030 году.[1] Однако высокие процентные ставки по кредитам и коэффициенты использования инфраструктуры в 99 %[2] ограничивают расширение и строительство новых ЦОД. Кроме того, из-за повышенного теплоотвода оборудования воздушное охлаждение неэффективно для современных серверов, что приводит к снижению показателей эффективности, таких как PUE (Power Usage Effectiveness — коэффициент отношения общего количества энергии, потребляемой ЦОД, к энергии, фактически доставленной ИТ-оборудованию) (1,8–1,6 для воздушного охлаждения против потенциального 1,1 для жидкостного охлаждения)[3], увеличению затрат на электроэнергию и неэффективному использованию пространства. Неэффективность технологии воздушного охлаждения уже подтолкнула североамериканский и китайский рынки к переходу на жидкостное охлаждение.

[1] Cnews. Рынок облачных сервисов в России вырос за год на треть. — Режим доступа: URL: https://www.cnews.ru/news/top/2026-02-10_rynok_oblachnyh_servisov (дата обращения: 19.02.2026).

[2] Агентство новостей "Строительный бизнес". В Москве больше не подключают ЦОД — электричество кончилось. — Режим доступа: URL: https://ancb.ru/news/read/20895 (дата обращения: 05.03.2026).

[3] Dantex. Холодильная стена для ЦОД: охлаждение серверных центров обработки данных. — Режим доступа: URL: https://dantex.ru/articles/kholodilnaya-stena-dlya-tsod-okhlazhdenie-servernykh-tsentrov-obrabotki-dannykh/?ysclid=mumg8koi4150616489 (дата обращения: 29.09.2026)

Целью данного исследования является оценка потенциала экономии электроэнергии при переходе от систем воздушного охлаждения к жидкостным решениям. Задачами работы являются расчёт энергопотребления ключевых компонентов каждой из систем, количественное определение экономии электроэнергии с учётом региональных климатических данных и определение совокупного снижения эксплуатационных расходов.

Внедрение систем жидкостного охлаждения в ЦОД происходит поэтапно с интеграцией новых компонентов и минимальным временем простоя оборудования. Обычно используются гибридные конструкции, где жидкостное охлаждение применяется только в самых горячих стойках, в которых размещены высокопроизводительные серверы, а воздушное охлаждение предназначено для оборудования средней интенсивности. Эта стратегия минимизирует риски и снижает инвестиции, сохраняя при этом общую структуру ЦОДа [1].

Система жидкостного охлаждения включает в себя несколько ключевых компонентов: охлаждающие пластины или погружные системы для прямого отвода тепла от процессоров и графических процессоров, насосную станцию (англ. Coolant Distribution Unit — CDU, — устройство распределения хладагента), чиллеры (холодильные машины для охлаждения жидкости) с фрикулингом (свободным охлаждением наружным воздухом без работы компрессора) или сухие градирни (теплообменники, сбрасывающие тепло в наружный воздух без испарения воды), систему датчиков контроля температуры и утечек, а также трубопроводы, по которым охлаждающая жидкость циркулирует между стойками и теплообменником. Внедрение системы жидкостного охлаждения обычно требует усиления перекрытий, установки дополнительных трубопроводов, увеличения мощности насосов и интеграции с существующей системой управления.[4]

Во многих случаях доступны готовые модульные комплекты, позволяющие поэтапно перенести кластеры серверов с жидкостным охлаждением и создать контур мониторинга для отслеживания параметров охлаждающей жидкости.

Несмотря на сложность внедрения такого оборудования, большинство ЦОД уже имеют жидкостный контур благодаря системе CRAH (англ. Computer Room Air Handler, — воздухоохладитель машинного зала). Эта система получает холодную жидкость из чиллера с температурой 10–15°C, затем нагревает жидкость в системе CRAH теплым воздухом от серверов через теплообменник и возвращает её в чиллер. Для реализации систем жидкостного охлаждения возможно параллельное подключение существующей замкнутой системы жидкостного охлаждения и перенаправление её непосредственно на охлаждение серверов [2].

Для повышения надёжности и безопасности системы в гибридных и жидкостных системах используются блоки CDU, которые, по сути, представляют собой теплообменник с насосом. Такие системы могут быть установлены как на каждом сервере отдельно, так и в виде отдельных установок на нескольких серверах или даже во всем серверном помещении [3].

## Методы и материалы

В данном исследовании оценивается экономическая эффективность перехода ЦОД с традиционных систем воздушного охлаждения на решения с жидкостным охлаждением. Рассматриваются коммерческие ЦОД Tier III уровня, которые характеризуются высокой плотностью размещения ИТ-оборудования (от 20 до 100 кВт на стойку) и расположенные в зоне умеренно-континентального климата. В качестве территории для проведения климатических расчетов был выбран Московский регион.

[4] Hewlett Packard Enterprise. Cooling strategies for the modern Data Center. — Режим доступа: URL: https://www.hpe.com/psnow/doc/a00104981enw (дата обращения: 12.03.2026).

Методологическую основу исследования составила научно-техническая литература и отраслевые обзоры, а именно публикации в рецензируемых журналах и материалы профильных изданий и компаний (CNews, Datacenters.com, Schneider Electric и др.) в которых описаны принципы функционирования систем воздушного и жидкостного охлаждения ЦОД, а также подходы к оценке их энергоэффективности. Значительное влияние на структуру расчёта оказали работы [4; 5], в которых детально рассмотрена архитектура жидкостных систем охлаждения и приведены типовые значения доли тепла, отводимого жидкостным контуром.

Источниками технической информации для расчетов послужили официальные каталоги и спецификации оборудования от ведущих производителей систем охлаждения для центров обработки данных (CoolIT Systems, Vertiv). На основе опубликованных технических характеристик были определены сопоставимые количественные показатели для каждого компонента системы: энергопотребление на единицу ИТ-мощности (кВт/кВт), холодопроизводительность (кВт), температурные диапазоны работы оборудования. Эти данные легли в основу эмпирической базы для последующего расчета удельного годового энергопотребления и оценки экономической эффективности перехода на жидкостные и гибридные системы охлаждения [2; 4; 6; 7].

В исследовании используется комплекс взаимодополняющих методов для обеспечения технической и экономической обоснованности результатов.

Аналитические методы выступают основным инструментом для количественной оценки энергопотребления каждого компонента системы охлаждения, которые используются для вывода формул удельного годового энергопотребления (в пересчете на 1 кВт ИТ-мощности) для блоков распределения охлаждения (CDU), прецизионных кондиционеров (CRAH) и чиллеров с функцией фрикулинга. При расчетах учитываются технические характеристики серийного оборудования и время его работы в течение года ($t = 8760$ ч). Среднегодовой коэффициент загрузки ИТ-системы ($k = 0,7$) [9] зависит от ЦОД и его загрузки.

Применение данного метода позволяет получить и сравнить показатели энергопотребления для систем воздушного и жидкостного охлаждения.

Сравнительный анализ применяется для оценки энергопотребления двух типов систем охлаждения воздушной и жидкостной в идентичных условиях эксплуатации (одинаковая ИТ-нагрузка, один климатический регион). Этот метод позволяет выявить количественные различия в энергопотреблении между альтернативными вариантами и определить, какой из них обеспечивает минимальные эксплуатационные расходы. На основе сравнительного анализа рассчитывается экономия энергии на единицу ИТ-мощности, что служит базой для экономической оценки.

Для оценки влияния климатических факторов на продолжительность работы чиллера в режиме компрессорного охлаждения по сравнению с режимом фрикулинга используется метод анализа климатических данных.

В качестве исходных данных использовались архивные значения среднесуточных температур воздуха в Московском регионе за 2025 год.[5] С учетом пороговых значений температуры хладагента, характерных для систем воздушного ($\leq 4$°C) и жидкостного ($\leq 25$°C) охлаждения, было определено количество часов в год, в течение которых чиллеры дата-центров могут работать в энергоэффективном режиме фрикулинга [8; 10].

На заключительном этапе исследования применяется экономический метод перевода энергетических показателей в финансовые величины.

[5] JSPRAV.ru. Архив погоды в Москве. — Режим доступа: URL: https://pogoda.jsprav.ru/ru/moskva/archive/#y=2025&m=1&c=19wn (дата обращения: 15.03.2026).

На основе рассчитанной экономии энергии ( E_Savings ), суммарной мощности ИТ-оборудования центра обработки данных и действующего тарифа на электроэнергию определяется величина ежегодного снижения эксплуатационных расходов (C_savings), что позволяет не только технически, но и экономически обосновать применение жидкостной системы охлаждения.

Расчет разделен на два этапа для обеспечения прозрачности и воспроизводимости результатов. На первом этапе определяется удельное годовое энергопотребление для каждого ключевого компонента систем воздушного и жидкостного охлаждения. На втором этапе полученные показатели энергопотребления переводятся в денежный эквивалент путем умножения на тариф на электроэнергию и масштабирования с учетом общей ИТ-мощности дата-центра.

Для блока CDU удельное годовое энергопотребление рассчитывается между возможным максимальным тепловыделением и потребляемой электроэнергией. Годовое энергопотребление CDU на единицу потребляемой мощности рассчитывается по формуле:

$$E_CDU = k \cdot t \cdot EC_CDU, \quad (1)$$

где:

E_CDU — годовое энергопотребление блока CDU, необходимое для охлаждения ИТ-оборудования (кВт · ч/(кВт$_{ит}$ · год));

k — среднегодовой коэффициент загрузки ИТ-оборудования;

t — продолжительность часов работы CDU в год (ч/год);

EC_CDU — энергопотребление CDU для охлаждения 1 кВт ИТ-оборудования (кВт/кВт$_{ит}$).

Для систем CRAH методология предоставляет два варианта расчёта в зависимости от типа системы охлаждения. В сценарии с воздушным охлаждением годовое энергопотребление CRAH определяется аналогично энергопотреблению CDU.

В жидкостном сценарии вводится коэффициент распределения тепловой нагрузки q (q = 0,75), указывающий на долю тепла, отводимого жидкостным контуром (типичные значения составляют 0,7–0,8). [11] Соответственно, энергопотребление CRAH уменьшается пропорционально оставшейся доле тепла, что отражается в скорректированном коэффициенте энергоэффективности:

$$E_CRAH = k \cdot t \cdot EC_CRAH \cdot (1 - q). \quad (2)$$

Снижение нагрузки CRAH не только уменьшает прямые затраты на электроэнергию, но и приносит экономическую выгоду за счет увеличения доступной плотности оборудования, что может быть учтено за счет альтернативной стоимости площади дата-центра.

Наиболее сложным компонентом методологии является учет работы чиллеров с естественным охлаждением, поскольку их энергопотребление в значительной степени зависит от климатических условий региона эксплуатации. Расчёт делит время работы дата-центра на 2 интервала: режим работы компрессора, режим естественного охлаждения. Суммарная продолжительность этих режимов работы составляет 365 × 24 = 8760 часов.

Границы интервалов определяются температурой наружного воздуха, которая определяется на основе требуемой температуры хладагента на входе в систему охлаждения. Для систем с воздушным охлаждением критическим параметром является температура подаваемого воздуха от блоков CRAH и разница температур хладагента, необходимая для надлежащей работы чиллера. Для жидкостных систем аналогичное соотношение строится на основе температуры хладагента на входе в CDU. Поскольку допустимая температура хладагента для жидкостных

систем выше, интервал времени работы чиллеров в режиме естественного охлаждения значительно увеличивается [12].

Потребление энергии чиллером в каждом режиме характеризуется соответствующими коэффициентами нагрузки, при этом потребление энергии в режиме естественного охлаждения составляет 10 % от потребления в режиме максимальной производительности.[6] Годовое потребление энергии чиллером на единицу потребляемой мощности рассчитывается следующим образом:

$$E_Chiller = k \cdot (EC_f_Chiller \cdot t_f + EC_m_Chiller \cdot t_m), \quad (3)$$

где:

E_Chiller — годовое энергопотребление чиллера необходимое для охлаждения IT-оборудования (кВт·ч/(кВт$_{ит}$ · год));

$EC_f$_Chiller — энергопотребление чиллера для охлаждения 1 кВт ИТ-оборудования в режиме фрикулинга (кВт/кВт$_{ит}$);

$EC_m$_Chiller — энергопотребление чиллера для охлаждения 1 кВт ИТ-оборудования в режиме максимальной производительности (кВт/кВт$_{ит}$);

$t_f$ — продолжительность часов работы чиллера в год в режиме фрикулинга (ч/год);

$t_m$ — продолжительность часов работы чиллера в год в режиме максимальной производительности (ч/год).

Для определения времени работы в каждом режиме используются данные о среднесуточной температуре региона. Количество часов в режиме естественного охлаждения рассчитывается как количество часов в год, когда температура наружного воздуха не превышает пороговое значение, исходя из требуемой температуры хладагента и эффективности теплообменника.

Общее энергопотребление систем охлаждения рассчитывается путём суммирования энергопотребления всего оборудования:

$$E_Air = E_CRAH_{AIR} + E_Chiller_{AIR}. \quad (4)$$

$$E_Liquid = E_CRAH_L + E_Chiller_L + E_CDU_L. \quad (5)$$

Экономия энергии на единицу потребляемой ИТ-оборудованием энергии определяется следующим образом:

$$E_Savings = E_Air - E_Liquid. \quad (6)$$

Расчёт экономии достигается путём умножения экономии энергии на тариф на электроэнергию и масштабирования на общую мощность ИТ-оборудования:

$$Cash_Savings = E_Savings \cdot E_Tariff \cdot P_IT. \quad (7)$$

P_IT — мощность ИТ-оборудования (кВт$_{ИТ}$);

$E_{Tariff}$ — Тариф на электроэнергию долл./(кВт·ч).

Это значение представляет собой годовую экономию на эксплуатационных расходах на электроэнергию, которая служит основой для расчёта показателей эффективности инвестиций.

[6] TICA. Фрикулинг: что это, принцип работы, виды. — Режим доступа: URL: https://tica.ru/articles/frikuling-chto-eto-princzip-raboty/ (дата обращения: 03.06.2026).

## Расчёт экономических эффектов

### Потребление энергии ключевыми компонентами системы

#### *CDU*

Для внедрения и начала эксплуатации жидкостных и гибридных систем необходимо установить и подключить дополнительное оборудование. В первую очередь, это касается блока распределения охлаждения (CDU). К ведущим производителям этого оборудования относятся Boyd Corporation, Coolcentric, Motivair, Vertiv, CoolIT Systems, DCX и Nortek Air Solutions.[7]

Для анализа стоимости внедрения был проанализирован CDU блок CoolIT Systems CHx200, способный рассеивать до 200 кВт тепла и занимающий 4 юнита в стойке. Энергопотребление такого устройства составляет 2,4 кВт. Вся инфраструктура ЦОД работает круглосуточно, поэтому распределительный щит также должен работать круглосуточно. Для охлаждения 1 кВт ИТ-оборудования этот блок потребляет 12 Вт/кВт$_{ит}$. Согласно техническим характеристикам, разница температур между внутренним (горячим) и внешним (холодным) контурами должна составлять не менее 4°C [13].

#### *CRAH*

Преимущество систем жидкостного охлаждения в том, что их реализация не требует установки дополнительных агрегатов CRAH. Более того, рассеивая одинаковое количество тепла, системы CRAH работают всего на 20–30 %[8] мощности, а более чем 70 %[9] тепла рассеивается за счет жидкостного охлаждения.[10] Это означает, что некоторые устройства CRAH можно отключить или использовать в других помещениях. Одна из популярных моделей системы CRAH — Vertiv Liebert PDX PI059, может рассеивать 70,4 кВт тепла, потребляя при этом 19,9 кВт мощности[11] [14]. Удельное энергопотребление CRAH Vertiv Liebert PDX PI059 составляет 0,283 кВт на 1 кВт холодопроизводительности при работе в ЦОД с воздушным охлаждением и снижается до 0,085 кВт/кВт$_{ит}$ при переходе на гибридную схему [15; 16].

Менее активное использование установок CRAH позволяет не только экономить электроэнергию, но и существенно повысить плотность размещения оборудования без приобретения и установки новых систем CRAH.

#### *Чиллеры и сухие градирни*

Большинство ЦОД перешли на использование чиллеров с фрикулингом для экономии энергии. Эти устройства позволяют отключать компрессор в холодные периоды, охлаждая поступающую жидкость только с помощью вентиляторов.

---

[7] Archive Market Research. Coolant Distribution Units (CDUs). — Режим доступа: URL: https://www.archivemarketresearch.com/reports/coolant-distribution-units-cdus-443102?tab=summary (дата обращения: 01.03.2026).

[8] 2CRSi. DIRECT LIQUID COOLING. — Режим доступа: URL: https://2crsi.com/direct-liquid-cooling (дата обращения: 03.03.2026).

[9] Datacenters.com. Why Liquid Cooling Is Becoming the Data Center Standard. — Режим доступа: URL: https://www.datacenters.com/news/why-liquid-cooling-is-becoming-the-data-center-standard (дата обращения: 15.12.2025).

[10] Schneider Electric. Why liquid cooling for AI data centers is harder than it looks. — Режим доступа: URL: https://blog.se.com/datacenter/2025/08/12/why-liquid-cooling-for-ai-data-centers-is-harder-than-it-looks/ (дата обращения: 07.12.2025).

[11] Vertiv. Vertiv Liebert PDX with Variable Speed Compressors. — Режим доступа: URL: https://www.vertiv.com/48eb2f/globalassets/products/thermal-management/room-cooling/liebert-pdx-pi-models-br-en-emea-rev.2-1-2021.pdf (дата обращения: 09.02.2025).

В теплые периоды компрессор включается, и, хотя он потребляет значительно больше энергии на охлаждение, он может охладить жидкость до любой желаемой температуры [3].

Гибридные системы охлаждения позволяют использовать гораздо более тёплую жидкость для охлаждения процессора. При использовании жидкости в водоблоках с температурой 40°C и расходом 2 л/мин средняя температура центрального процессора при потреблении более 1 кВт составляла 55°C. Увеличение расхода до 3 л/мин снижает температуру на 4°C. Следовательно, можно сделать вывод, что температура жидкости на выходе из CDU не должна превышать 40°C. Согласно техническим характеристикам, выбранная CoolIT Systems CHx200 требует разницы температур в 4°C [13].

Для работы системы без перегрева заданная температура жидкости, поступающей в CDU, не должна превышать 35°C. Использование жидкостной системы и работа при более высоких температурах жидкости позволяют увеличить периоды фрикулинга на чиллерах. Система работает полностью в режиме естественного охлаждения с разницей температур 7–10°C[12] и потребляет 10 % энергии[13], существенно снижая затраты на охлаждение.

Для расчета эффективности в качестве примера использовался чиллер MDV MDVS-CAF395HV-FC-D. Этот чиллер может отводить 1393 кВт тепла, потребляя при этом 434 кВт.

Удельное энергопотребление данного чиллера составляет 0,312 кВт/кВт$_{ит}$ в сценарии воздушного охлаждения. При интеграции в жидкостную систему этот показатель снижается до 0,031 кВт/кВт$_{ит}$, что позволяет максимально использовать режим естественного охлаждения при температурах наружного воздуха до 25°C.

В качестве примера была взята Московская область, где средняя температура в самый тёплый месяц 2025 года не превышала 25°C. Однако наблюдались максимальные суточные пиковые температуры, превышающие 25°C, при которых требовалось включение компрессоров. Таких дней было не более 40. С учётом суточной динамики температур компрессор работал только в дневные часы этих 40 дней (ориентировочно 12 ч/сут), что составило 40 * 12 = 480 ч в год. В ночные часы этих же 40 дней (40 × 12 = 480 ч) и в течение остальных 325 дней года (325 × 24 = 7800 ч) температура воздуха не превышала порогового значения, и система работала в режиме естественного охлаждения. Итого продолжительность работы в режиме фрикулинга составила 7800 + 480 = 8280 ч в год. [17].

При использовании воздушного охлаждения температура жидкости, подаваемой в систему CRAH, не должна превышать 14°C. Соответственно, для максимальной эффективности фрикулинга температура окружающей среды не должна превышать 4°C. В Москве таких дней было 120 или 1440 часов. Ночью температура опускалась ниже 4°C в течение 230 дней, или 2760 часов. Общее время фрикулинга с воздушным охлаждением составляет не более 4200 часов в год. Существующие чиллеры справятся с переходом на жидкостные системы, но по мере увеличения плотности потребуются дополнительные установки для резервирования в жаркие дни.

### *Охлаждение серверных стоек*

Охлаждение серверных стоек при жидкостном охлаждении осуществляется за счет охлаждающих пластин, которые играют ключевую роль в теплопередаче.

[12] Planer Cooling. Чиллеры с фрикулингом. Принцип работы и преимущества. — Режим доступа: URL: https://www.planerchiller.ru/blog/free-cooling-sistemy-estestvennogo-ohlazhdeniya.php?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F (дата обращения: 12.02.2025).

[13] TICA. Фрикулинг: что это, принцип работы, виды. — Режим доступа: URL: https://tica.ru/articles/frikuling-chto-eto-princzip-raboty/ (дата обращения: 12.02.2025).

Это полые медные пластины с ребрами, через которые прокачивается жидкость. Пластины чаще всего изготавливаются из меди и требуют системы коллекторов, соединяющей CDU и сервер. Существует два типа пластин. Водоблоки — это устройства, устанавливаемые только на процессоры, наиболее тепловыделяющие компоненты серверного оборудования [18]. Существуют также охлаждающие пластины, которые покрывают всю материнскую плату и рассеивают тепло от всех компонентов сервера. Гибридные решения чаще используются при применении водоблоков, поскольку примерно 70–80 % тепла выделяется процессором [3; 5]. Однако системы CRAH по-прежнему необходимы. Сами охлаждающие пластины не потребляют энергию. Они могут рассеивать до 800 Вт тепла от одного процессора [8; 19]. Стойки с таким охлаждением позволяют использовать оборудование с тепловыделением до 100 кВт и размещать до 50 серверов. Для ИИ используются серверы в конфигурации 2 центральных процессора и 4–8 графических процессоров. В серверную стойку помещается всего 4–6 таких серверов с суммарной теплоотдачей 50 кВт.

## Расчёт экономии электроэнергии

Замена воздушного охлаждения на жидкостное или гибридное значительно снижает энергопотребление системы охлаждения. Это, в первую очередь, связано с уменьшением использования CRAH и чиллеров. Наиболее эффективные системы воздушного охлаждения способны отводить не более 20 кВт тепла от одной серверной стойки. Соответственно, можно рассчитать энергию, необходимую системам жидкостного и воздушного охлаждения для отвода такого количества тепла.

*Система воздушного охлаждения.*

Средний коэффициент загрузки: k = 0,7

$$E_CRAH_{AIR} = 0,7 \cdot (24 \cdot 365) \cdot 0,283 = 1735,4 \text{ (кВт·ч/(кВт}_{\text{ит}}\text{·год))}.$$

$$E_Chiller_{AIR} = 0,7 \cdot (0,031 \cdot 4200 + 0,312 \cdot 4560) = 1126,1 \text{ (кВт·ч/(кВт}_{\text{ит}}\text{·год))}.$$

$$E_Air = 1735,4 + 1126,1 = 2861,5 \text{ (кВт·ч/(кВт}_{\text{ит}}\text{·год))}.$$

*Жидкостная система охлаждения.*

$$E_CRAH_{L} = 0,7 \cdot (24 \cdot 365) \cdot 0,283 \cdot (1 - 0,75) = 433,1 \text{ (кВт·ч/(кВт}_{\text{ит}}\text{·год))}.$$

$$E_Chiller_{L} = 0,7 \cdot (0,031 \cdot 8200 + 0,312 \cdot 560) = 376,5 \text{ (кВт·ч/(кВт}_{\text{ит}}\text{·год))}.$$

$$E_CDU_{L} = 0,7 \cdot (24 \cdot 365) \cdot 0,012 = 73,6 \text{ (кВт·ч/(кВт}_{\text{ит}}\text{·год))}.$$

$$E_Liquid = 433,1 + 376,5 + 73,6 = 883,2 \text{ (кВт·ч/(кВт}_{\text{ит}}\text{·год))}.$$

*Экономия на затратах на электроэнергию.*

Годовая экономия на электроэнергии составит на 1 кВт ИТ-мощности:

$$E_Savings = 2\ 861,5 - 883,2 = 1978,3 \text{ (кВт·ч/(кВт}_{\text{ит}}\text{·год))}.$$

Годовая экономия в денежном выражении на 1 кВт ИТ-мощности:

$$C_Savings = 1978,3 \cdot 0,11 = 217,613 \text{ (долл./кВт}_{\text{ит}}\text{·год)}.$$

Для дата-центра уровня Tier 3 с мощностью ИТ-оборудования 4,32 МВт переход на систему жидкостного охлаждения для всего дата-центра приведет к экономии в размере:

$$Tot_Savings = 1978,3 \cdot 4320 \cdot 0,11 = 940\ 088 \text{ (долл./год)}.$$

На основе представленной методологии выполнен расчёт годового энергопотребления систем воздушного и жидкостного охлаждения в пересчёте на 1 кВт ИТ-мощности. Расчёт учитывает реальные условия эксплуатации ЦОД: фактические характеристики оборудования, интенсивность нагрузок, климатические условия Московской области и действующий тариф на электроэнергию. Результаты расчётов приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

**Сравнение энергопотребления систем охлаждения ЦОД, кВт·ч/кВт$_{ит}$·год**

| Компонент системы | Воздушное охлаждение | Жидкостное охлаждение | Экономия |
|---|---|---|---|
| Чиллер | 1126,1 | 376,5 | 749,6 |
| CRAH | 1735,4 | 433,1 | 1302,3 |
| CDU | — | 73,6 | −73,6 |
| Итого | 2861,5 | 883,2 | 1978,3 |

*Составлено авторами*

## Заключение

В данной работе исследуется экономический эффект от внедрения жидкостных систем охлаждения на энергопотребление инфраструктуры ЦОД. В работе анализируется переход от традиционных систем воздушного охлаждения, ограниченных теплоотдачей в 15–20 кВт на стойку, к гибридным решениям, способным эффективно рассеивать до 100 кВт.

Результаты анализа показывают, что традиционные системы воздушного охлаждения и модели расширения инфраструктуры сталкиваются с критическими эксплуатационными и экономическими ограничениями в современных реалиях. Системы воздушного охлаждения не способны эффективно управлять тепловыми потоками от современных графических процессоров/центральных процессоров для рабочих нагрузок ИИ, что приводит к увеличению PUE (1,6–1,8), неоправданному увеличению энергопотребления вспомогательными системами и неэффективному использованию дорогостоящей площади. Учитывая высокую стоимость заемного капитала, строительство новых центров обработки данных становится финансово рискованным, а попытки разместить более мощное оборудование в существующих помещениях без модернизации инфраструктуры приводят к перегреву и снижению надежности.

Предложенный в данной работе расчёт демонстрирует, что переход на гибридную систему снижает энергопотребление охлаждения на 65 %, уменьшает эксплуатационные расходы и повышает эффективность использования пространства. Однако по-прежнему необходим воздушный контур для охлаждения периферийных компонентов.

С практической точки зрения в данной работе сформулированы управленческие решения и проведены экономические расчеты для оценки целесообразности внедрения жидкостного охлаждения.

Исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, эмпирическая база основана на расчетных моделях и средних отраслевых данных, а не на данных конкретного коммерческого центра обработки данных, что ограничивает возможность учета уникальных эксплуатационных нюансов. Во-вторых, анализ климатической эффективности проводился на примере Московской области, и результаты могут отличаться для регионов с различными температурными профилями. Наконец, основное внимание в работе уделяется технико-экономическим аспектам, в то время как вопросы долгосрочного технического обслуживания, использования хладагента, квалификации персонала и ограничений на дополнительные мощности, выделяемые городом, остаются за пределами данного исследования. Будущие исследования могли бы сосредоточиться на нескольких перспективных областях. Во-первых, необходимы долгосрочные эмпирические исследования для оценки влияния гибридных систем на реальный показатель PUE, надежность

оборудования и общую стоимость владения при непрерывной эксплуатации. Во-вторых, было бы полезно изучить адаптируемость методологии к различным климатическим зонам, типам нагрузок и архитектуре зданий. В-третьих, сравнительные межрегиональные исследования помогли бы оценить, как различия в тарифах на электроэнергию, стоимости земли и нормативных требованиях влияют на экономическую привлекательность жидкостного охлаждения.

В данной статье показано, что гибридные системы жидкостного охлаждения следует рассматривать не только как технологическую альтернативу системам на основе воздуха, но и как стратегический финансовый и управленческий инструмент. Они позволяют преодолеть физические и экономические ограничения традиционной инфраструктуры, оптимизировать капитальные и эксплуатационные расходы, обеспечить отложенные инвестиции и создать новые потоки доходов за счет интенсивного использования существующих площадей. В условиях растущего спроса на вычисления для ИИ и ограниченности ресурсов на российском рынке этот подход становится ключевым фактором устойчивого развития и конкурентоспособности центров обработки данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Alkrush, A.A., M.S. Salem, O. Abdelrehim, A.A. Hegazi. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions / A.A. Alkrush, M.S. Salem, O. Abdelrehim, A.A. Hegazi // International Journal of Refrigeration. — 2024. — Т. 160. — С. 246–262. — DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2024.02.007. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700724000458 (дата обращения: 23.05.2026).
2. Erden, H.S. Comprehensive energy and economic assessment of CRAH bypass method in air-cooled data centers / H.S. Erden // Sustainable Energy Technologies and Assessments. — 2022. — Т. 52. — С. 102120. — DOI: 10.1016/j.seta.2022.102120. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138822001722 (дата обращения: 21.05.2026).
3. Ayoub, R., M. Hnayno, A. Chehade, F. Fardoun, T. Moussa [et al.] Immersion cooling fluid comparison using a single-phase immersion/liquid technique for data centers / R. Ayoub, M. Hnayno, A. Chehade, F. Fardoun, T. Moussa [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2025. — Т. 280. — С. 128355. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128355. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431125029473 (дата обращения: 14.06.2026).
4. Страшко, Е. И., И. А. Шорсткий, Р. А. Жлобо. Методика охлаждения серверных помещений / Е. И. Страшко, И. А. Шорсткий, Р. А. Жлобо // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2024. — Т. 51, № 3. — С. 35–41. — DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-35-41. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=73320381 (дата обращения: 28.09.2026).
5. Архаров, И. А., И. Д. Махотин. Сравнительный анализ способов охлаждения серверов вычислительных центров и банков данных. Часть 1. Схемотехнические решения и их особенности / И. А. Архаров, И. Д. Махотин // Вестник Международной академии холода. — 2022. — № 3. — С. 21–26. — DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-21-26. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49959232 (дата обращения: 27.09.2026).

6. Almheiri, M.J., H.M. Khalid, A. Ismail, A. Gulraiz, Z. Said [et al.] Chilled water-based hybrid cooling solution for data centers: A comprehensive survey of technologies, developments, and regenerative energy transitions / M.J. Almheiri, H.M. Khalid, A. Ismail, A. Gulraiz, Z. Said [et al.] // Energy Conversion and Management: X. — 2026. — Т. 30. — С. 101612. — DOI: 10.1016/j.ecmx.2026.101612. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174526000954 (дата обращения: 20.04.2026).
7. Azarifar, M., M. Arik, J.-Y. Chang. Liquid cooling of data centers: A necessity facing challenges / M. Azarifar, M. Arik, J.-Y. Chang // Applied Thermal Engineering. — 2024. — Т. 247. — С. 123112. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123112. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431124007804 (дата обращения: 20.04.2026).
8. Huang, K., J. Fan, Y. Bi, P. Lu, R. Gao [et al.] Beyond arbitrage: How PUE-linked electricity pricing reshapes the selection of data center waste heat recovery strategies in China / K. Huang, J. Fan, Y. Bi, P. Lu, R. Gao [et al.] // Applied Energy. — 2026. — Т. 422. — С. 128322. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2026.128322. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261926009761 (дата обращения: 25.04.2026).
9. Евушкин, А. И., С. С. Шереметьев. Энергоэффективные решения кондиционирования серверных помещений в климатических условиях московского региона / А. И. Евушкин, С. С. Шереметьев // Политехнический молодежный журнал МГТУ имени Н. Э. Баумана. — 2017. — № 3. — DOI: 10.18698/2541-8009-2017-3-83. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29010901 (дата обращения: 24.09.2026).
10. Li, W., C. Chan, Y. Chen. Numerical investigation of baffle-enhanced cooling strategies in data center server racks / W. Li, C. Chan, Y. Chen // Case Studies in Thermal Engineering. — 2026. — Т. 77. — С. 107606. — DOI: 10.1016/j.csite.2025.107606. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X25018660 (дата обращения: 23.05.2026).
11. Каляев, И. А., А. И. Дордопуло, И. И. Левин, А. М. Федоров. Развитие отечественных многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем: от воздушного к жидкостному охлаждению / И. А. Каляев, А. И. Дордопуло, И. И. Левин, А. М. Федоров // Труды СПИИРАН. — 2017. — № 1(50). — С. 5–31. — DOI: 10.15622/sp.50.1. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28307146 (дата обращения: 27.09.2026).
12. Tao, Y., P. Li, H. Liu, L. Weng, X. Deng [et al.] Experimental study on a multi-stage separated gravity heat pipe cooling system for liquid-cooled data center server racks / Y. Tao, P. Li, H. Liu, L. Weng, X. Deng [et al.] // Applied Thermal Engineering. — 2026. — Т. 290. — С. 129887. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2026.129887. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135943112600195X (дата обращения: 26.04.2026).
13. Hu, J., R. Li, Y. Liu, J. Wang. Towards fine-grained load balancing with dynamical flowlet timeout in datacenter networks / J. Hu, R. Li, Y. Liu, J. Wang // Computer Networks. — 2024. — Т. 255. — С. 110867. — DOI: 10.1016/j.comnet.2024.110867. — URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4860814 (дата обращения: 22.04.2026).
14. Abbas, A.M., A.S. Huzayyin, T.A. Mouneer, S.A. Nada. Effect of data center servers' power density on the decision of using in-row cooling or perimeter cooling / A.M. Abbas, A.S. Huzayyin, T.A. Mouneer, S.A. Nada // Alexandria Engineering Journal. — 2021. — Т. 60. — С. 3855–3867. — DOI: 10.1016/j.aej.2021.02.051. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821001423 (дата обращения: 22.04.2026).

15. Zakarya, M., L. Gillam. Managing energy, performance and cost in large scale heterogeneous datacenters using migrations / M. Zakarya, L. Gillam // Future Generation Computer Systems. — 2019. — T. 93. — C. 529–547. — DOI: 10.1016/j.future.2018.10.044. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X17326249 (дата обращения: 23.04.2026).
16. Khoshvaght-Aliabadi, M., P. Ghodrati, A. Nasrolahzadeh, Y.T. Kang. Optimization of heat sinks for data center server CPUs cooled via single-phase immersion cooling / M. Khoshvaght-Aliabadi, P. Ghodrati, A. Nasrolahzadeh, Y.T. Kang // Applied Thermal Engineering. — 2025. — T. 280. — C. 127790. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127790. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431125023828 (дата обращения: 28.04.2026).
17. Azarifar, M., M. Arik, J.-Y. Chang. Liquid cooling of data centers: A necessity facing challenges / M. Azarifar, M. Arik, J.-Y. Chang // Applied Thermal Engineering. — 2024. — T. 247. — C. 123112. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123112. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431124007804 (дата обращения: 02.05.2026).
18. Kong, R., H. Zhang, M. Tang, H. Zou, C. Tian [et al.] Enhancing data center cooling efficiency and ability: A comprehensive review of direct liquid cooling technologies / R. Kong, H. Zhang, M. Tang, H. Zou, C. Tian [et al.] // Energy. — 2024. — T. 308. — C. 132846. — DOI: 10.1016/j.energy.2024.132846. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544224026203 (дата обращения: 14.05.2026).
19. Stahlhut, M., M. Sekulla, P. Großöhme, A. Auweter, T. Urbaneck [et al.] Data Centers With Direct Liquid-Cooled Servers: Experimental Analysis and Modeling / M. Stahlhut, M. Sekulla, P. Großöhme, A. Auweter, T. Urbaneck [et al.] // Energy Science & Engineering. — 2025. — T. 13. — C. 70116. — DOI: 10.1002/ese3.70116. — URL: https://www.researchgate.net/publication/391229338_Data_Centers_With_Direct_Liquid-Cooled_Servers_Experimental_Analysis_and_Modeling (дата обращения: 20.04.2026).

**Volokhov Arsenii Fedorovich**
National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
E-mail: arseniyvolokhov99@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1254147

**Bodina Valeria Alekseevna**
Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia
E-mail: bodina_v@inbox.ru

**Kuzin Maxim Alexandrovich**
National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
E-mail: maks.kuzin.05@list.ru

**Lyulin Yuri Vyacheslavovich**
National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
E-mail: LiulinYV@mpei.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=126707

# Assessment of the electricity saving potential of liquid cooling in data centers

**Abstract.** The development of the digital economy is currently characterized by a sharp increase in demand for computing power, driven by the implementation of artificial intelligence technologies. Analysts predict that demand for server hardware in the Russian market will double by 2030. Currently, the utilization rate of existing capacity reaches 99 %, creating a shortage of available space for new racks. Traditionally, when expanding infrastructure, data centers have opted for quantitative growth, namely the construction of new data centers. However, today, data center operators are increasingly choosing compact, higher-performance server hardware, forcing them to migrate from traditional air-cooled systems to liquid cooling.

This study evaluates the energy savings from switching from air-cooled systems to liquid solutions. The paper models energy consumption and its impact on operating costs. The obtained results show that liquid cooling technology allows for the redirection of 70–80 % of the heat load from cooling inside server racks to chillers (refrigeration machines), significantly reducing the use of computer room air handler and extending the free-cooling period (cooling with outdoor air). In this paper, the authors examine processes and equipment that reduce the energy consumption for cooling server equipment, leading to increased equipment density and lower data center operating costs; the calculations take regional climate data into account. They also compare the energy consumption of each cooling system separately and calculate the energy savings from switching from an air-cooled to a liquid-cooled system. For the Moscow region, switching to liquid cooling reduces the energy consumption of the cooling system by about two-thirds.

**Keywords:** data center cooling; liquid cooling; hybrid cooling; free cooling; energy efficiency; machine learning infrastructure; operational cost reduction