DOI: https://doi.org/10.17816/RF678130 EDN: FTEMLG

Анализ эффективности систем охлаждения жидкости: возможности фрикулинга в Санкт-Петербурге

Р.В. Сигунов, И.В. Баранов, В.В. Митропов

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлен анализ и сравнительная оценка энергетической и экономической эффективности систем круглогодичного охлаждения жидкости, применимых в климатических условиях г. Санкт-Петербурга. На основе анализа среднемесячных температур наружного воздуха за последние 10 лет и расчета сезонного коэффициента энергоэффективности для стандартного чиллера с и чиллера со встроенным фрикулингом, выполнен расчет экономической эффективности внедрения технологии свободного охлаждения.

Результаты исследования показали, что чиллер со встроенным фрикулингом обладает значительно более высоким (примерно на 30%) значением сезонного коэффициента энергоэффективности по сравнению со стандартным чиллером. Экономический расчет подтвердил, что несмотря на более высокие первоначальные капитальные затраты, система с фрикулингом обеспечивает годовую экономию на электроэнергии около 1,5 млн. руб. Экономическая выгода (окупаемость дополнительных инвестиций) достигается уже в первый год эксплуатации за счет существенного снижения эксплуатационных расходов.

Новизна работы заключается в проведении анализа и расчетов для систем охлаждения с учетом специфики реальных климатических данных Санкт-Петербурга (среднегодовая температура 7,1°C) и параметров конкретных установок, что повышает практическую применимость полученных результатов для проектирования энергоэффективных систем в данном регионе.

Ключевые слова: чиллер; фрикулинг; драйкулер; коэффициент энергоэффективности; холодопроизводительность.

Как цитировать:
Сигунов Р.В., Баранов И.В., Митропов В.В. Анализ эффективности систем охлаждения жидкости: возможности фрикулинга в Санкт-Петербурге // Холодильная техника. 2025. Т. 114, № 1. С. 27–34. DOI: 10.17816/RF678130 EDN: FTEMLG

Рукопись получена: 04.04.2025 **Рукопись одобрена:** 27.08.2025 **Опубликована online:** 29.11.2025

DOI: https://doi.org/10.17816/RF678130 EDN: FTEMLG

Liquid Cooling System Performance Analysis: Free Cooling Opportunities in Saint Petersburg

Rostislav V. Sigunov, Igor V. Baranov, Vladimir V. Mitropov

ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

This paper presents an analysis and comparison of the energy and cost effectiveness of year-round liquid cooling systems that could be used in the climate of Saint Petersburg. An analysis of average monthly outdoor air temperatures over the past 10 years and the calculation of the seasonal energy performance ratio of a standard chiller and a chiller with an integrated free cooling system allowed to calculate the cost effectiveness of the free cooling technology.

The study showed that a chiller with an integrated free cooling system has a significantly higher (by approximately 30%) seasonal energy performance ratio compared to a standard chiller. A cost estimate has confirmed that, despite higher initial capital costs, the free cooling system provides annual energy savings of approximately 1.5 million RUB. Economic benefits (return on additional investment) are already achieved in the first year of operation due to a significant reduction in operating costs.

This study analyzes and provides design solutions for cooling systems based on real-life climate data for Saint Petersburg (average annual temperature = 7.1 °C) and the parameters of specific systems, enhansing the applicability of the findings in desiging energy-efficient systems in this region.

Keywords: chiller; free cooling; dry cooler; energy performance ratio; cooling capacity.

To cite this article:
Sigunov RV, Baranov IV, Mitropov VV Liquid Cooling System Performance Analysis: Free Cooling Opportunities in Saint. *Refrigeration Technology.* 2025; 114(1):27–34. DOI: 10.17816/RF678130 EDN: FTEMLG

Submitted: 04.04.2025 **Accepted:** 27.08.2025 **Published online:** 29.11.2025

АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТАПРИМЕНЕНИЯ ФРИКУЛИНГА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Повышение энергоэффективности холодильных машин — это критически важная задача, направленная на достижение двух ключевых целей: снижение эксплуатационных затрат и минимизация негативного воздействия на окружающую среду. Экономия электроэнергии напрямую ведет к уменьшению эксплуатационных расходов, в то время как сокращение энергопотребления снижает выбросы парниковых газов.

В мировой практике нередко используется свободное охлаждение (фрикулинг) для повышения энергоэффективности систем охлаждения. К примеру, Тхэк Дон Квон и Чже Вон Чон [1], проанализировав работу существующей системы охлаждения на производстве полупроводников, предложили интегрировать систему свободного охлаждения; реализация этого подхода продемонстрировала снижение холодильной нагрузки. Технология свободного охлаждения также успешно внедряется в центрах обработки данных (ЦОД). Исследования демонстрируют ее значительный потенциал: например, в [2] применение фрикулинга снизило PUE (Power Usage Effectiveness) дата-центра на 20%, а в [3] зафиксировано сокращение годового энергопотребления системы охлаждения на 557 МВт·ч (что составило ~15% от общего потребления ЦОД). Помимо промышленных объектов, свободное охлаждение активно используется в коммерческих и общественных зданиях. Несмотря на эффективность технологии, ее реализация чаще всего предполагает работу в гибридном режиме с традиционной холодильной машиной. Ключевым фактором при этом является обеспечение точного переключения между режимами фрикулинга и искусственного охлаждения (машинного). Матеуш Борковски и Адам Кшиштоф Пилат разработали контроллер, позволивший увеличить продолжительность работы в режиме свободного охлаждения на 2064 часа в год и снизить потребление электроэнергии на 206,9 МВт·ч [4].

Внедрение технологии свободного охлаждения также распространено в России, например, охлаждение ЦОДов [5]. Кроме того, российскими исследователями были проанализированы распространенные заблуждения относительно применимости свободного охлаждения в ЦОД городов Москва, Санкт-Петербург, Краснодар и Уфа [6]. Несмотря на относительно высокие капитальные затраты и значительные габаритные размеры, системы со свободным охлаждением демонстрируют высокую энергетическую эффективность не только в северных широтах, а также характеризуются приемлемым сроком окупаемости (порядка 3 лет).

Принимая во внимание доказанную эффективность свободного охлаждения в снижении энергопотребления и эксплуатационных затрат в различных климатических условиях и типах зданий, целесообразно более детально изучить возможности его применения в специфических климатических условиях Санкт-Петербурга.

ОБЗОР ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТИ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

В работе были рассмотрены основные системы охлаждения жидкости, использующиеся в условиях Санкт-Петербурга с учетом принципов их работы и характеристик. Эти системы были классифицированы на три категории: естественное, искусственное и комбинированное охлаждение и подробно рассмотрены с точки зрения возможности круглогодичной работы [7].

Несмотря на то, что системы естественного охлаждения, такие как мокрые градирни и драйкулеры имеют самую высокую энергоэффективность и низкую стоимость, они зависимы от наружной температуры воздуха. Поэтому в условиях температуры наружного воздуха Санкт-Петербурга, которая имеет значительные колебания в зависимости от сезона, системы естественного охлаждения не способны обеспечить стабильное охлаждение в течение всего года.

Вместе с тем, системы искусственного охлаждения, такие как парокомпрессионные (ПХМ) или абсорбционные (АБХМ) [8] холодильные машины обеспечивают круглогодичное охлаждение. Однако их стоимость и сложность конструкций намного выше, чем у систем естественного охлаждения [9].

Наибольший потенциал демонстрируют комбинированные системы охлаждения, объединяющие энергоэффективность естественного охлаждения с надежностью искусственного, обеспечивающей круглогодичную эксплуатацию. К данному типу относится чиллер со встроенным фрикулингом [10]. В частности, она может являться оптимальным решением для г. Санкт-Петербурга. Данная система, основываясь на температуре наружного воздуха, способна автоматически переключаться между режимами искусственного охлаждения, естественного охлаждения или комбинированного охлаждения (гибридного), тем самым минимизируя энергопотребление и эксплуатационные расходы. Именно из-за последнего фактора абсорбционные холодильные машины (АБХМ) не были включены в сравнительный анализ, т.к. для их эффективной работы необходим источник бросового (отбросного) тепла. Однако, следует отметить, что при выборе системы охлаждения необходимо основываться не только на низких эксплуатационных затратах и возможности круглогодичной работы, но и на ряде других факторов, таких как надежность, энергоэффективность, ремонтопригодность, наличие единого источника энергии.

DOI: https://doi.org/10.17816/RF678130

АНАЛИЗ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 ЛЕТ

Учитывая тенденцию мирового глобального потепления были проанализированы среднегодовая и среднемесячные температуры из двух источников: действующий свод правил строительной климатологии СП 131.13330.2020, зарегистрированный федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) в 2021 году и данные с сайта «rp5.ru» [11], за последние 10 лет. Среднегодовая температура по усредненным за последние 10 лет данным выше, чем представленная в своде правил и составляет 7,1 °С против 5,6 °С. Аналогично и среднемесячные температуры года, представленные на рис. 1, повышаются с течением времени.

Проецируя полученные температурные данные на работу фрикулинга и учитывая стандартный температурный график теплоносителя для всех установок, который составят 12 °С до охлаждения и 7 °С после охлаждения, можно рассчитать среднегодовое количество дней работы [12]. В отличие от круглогодичной работы стандартного чиллера в режиме искусственного охлаждения, установка с фрикулингом будут работать в режиме естественного охлаждения 137 дней в году, а также дополнительно 86 дней в режиме совместного охлаждения жидкости. В данном режиме фрикулинг подключается к парокомпрессионному циклу при падении наружной температуры ниже 12 °С и уменьшает общее энергопотребление.

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФЕКТИВНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ВЫГОДЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Исходными параметрами расчётов энергоэффективности являлись: температура кипения холодильного агента, температура теплоносителя от потребителя, температура теплоносителя к потребителю, используемый холодильный агент, используемый теплоноситель и требуемая холодопроизводительность установок. Исходные данные представлены в табл. 1.

Ключевым показателем энергоэффективности установок круглогодичной работы является сезонный коэффициент энергоэффективности (SEER) [13] рассчитанный по формуле:

$$SEER = \frac{Q_0 \cdot 8760}{\sum N_{кп} \cdot n_{кп} + \sum N_{нип} \cdot n_{нип} + \sum N_{вп} \cdot n_{вп}},$$

Таблица 1. Исходные данные (The initial data)
Table 1. Inputs

Параметр	Величина
Температура кипения холодильного агента, °С	2,3
Температура теплоносителя от потребителя, °С	12
Температура теплоносителя к потребителю, °С	7
Тип холодильного агента	R410A
Теплоноситель – водный раствор этиленгликоля, Концентрация %	45
Требуемая холодопроизводительность установки, кВт	512

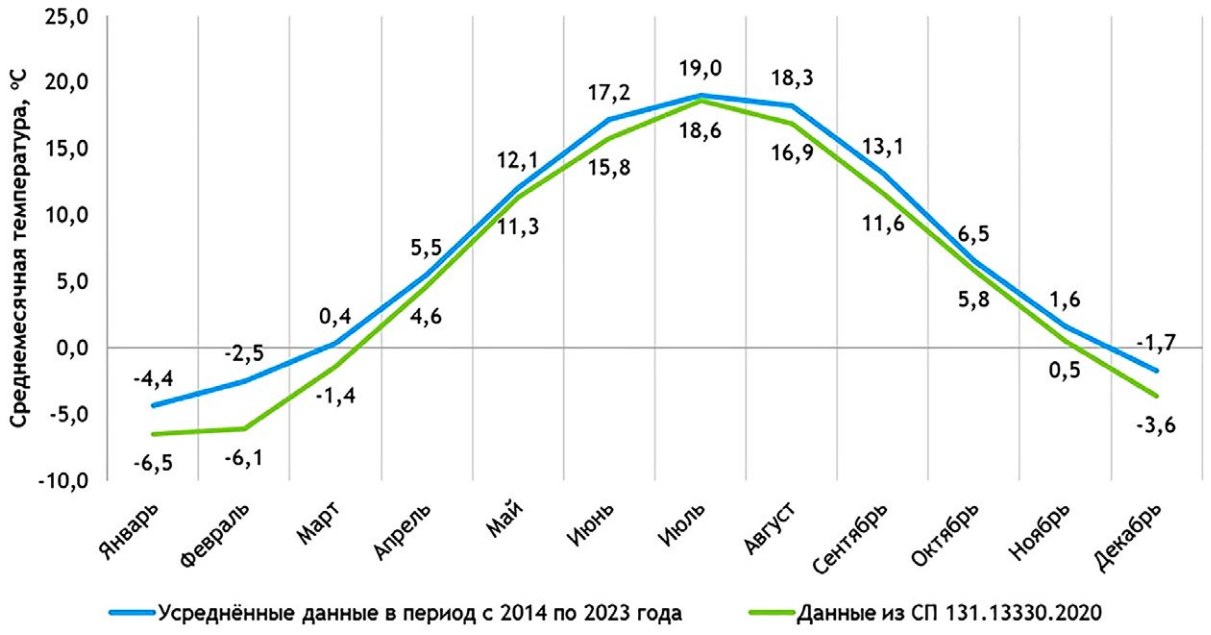

Рис. 1. Среднемесячная температура в Санкт-Петербурге в период с 2013 по 2024 г.
Fig. 1. Average monthly temperature in Saint Petersburg (2013–2024).

где $\Sigma N_{пп} \cdot n_{пп}$ — суммарная электрическая мощность каждого электропотребителя чиллера для каждой среднемесячной температуры наружного воздуха (кВт); $N_{кп}$ — мощность компрессора для выбранной температуры наружного воздуха (кВт); $N_{нип}$ — мощность насоса испарителя (кВт); $N_{вп}$ — мощность вентилятора конденсатора для выбранной температуры наружного воздуха (кВт); $n_{кп}$ — время работы компрессора для выбранной температуры наружного воздуха (ч); $n_{нип}$ — время работы насоса испарителя (ч); $n_{вп}$ — время работы вентилятора конденсатора для выбранной температуры наружного воздуха (ч). Принципиальная схема чиллера представлена на рис. 2.

Для расчёта *SEER* необходимо было рассчитать потребляемую мощность каждого элемента систем: компрессоров, вентиляторов, насоса испарителя.

Для расчёта мощности компрессоров [14] были использованы полиномиальные функции, по которым в зависимости от изменения параметров окружающей среды были рассчитаны коэффициенты энергоэффективности (EER) для каждой среднемесячной температуры и затем при условии неизменяемой требуемой холодопроизводительности рассчитаны потребляемые мощности компрессоров (Рис. 3) по формуле [15]:

$$N_к = \frac{Q_0}{EER},$$

где Q_0 — требуемая холодопроизводительность системы охлаждения; $N_к$ — действительная мощность компрессоров при данной температуре; EER — коэффициент энергоэффективности при данной температуре.

Расчет мощности вентилятора конденсатора проводился для модели EC — вентилятора EC180/85D3G01 AS 800/120A1-01-B1 из каталога фирмы WEIGUANG [16]. При расчете, для вентилятора, были применены следующие температурные условия конденсации: в зимний период (до +10 °C окружающей среды) она принималась равной 20 °C, тогда как при температуре окружающей среды выше +10 °C, температура конденсации определялась по формуле ($t_к = t_{ос} + 10K$). Для расчета использовались

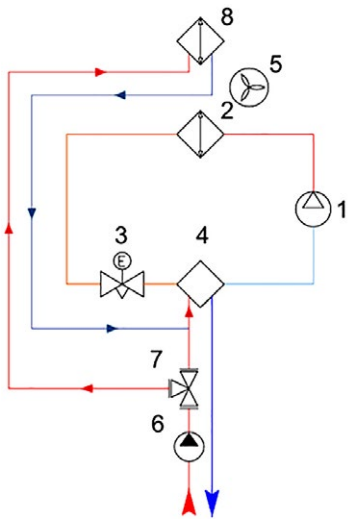

Рис. 2. Принципиальная схема охлаждения чиллером со встроенным фрикулингом: *1* — компрессор, *2* — конденсатор воздушного охлаждения, *3* — терморегулирующий вентиль, *4* — испаритель, *5* — вентилятор, *6* — циркуляционный насос, *7* — трехходовой вентиль, *8* — теплообменник фрикулинга.
Fig. 2. Schematic diagram of a chiller with a built-in free cooling system: *1*, compressor; *2*, air-cooled condenser; *3*, thermal expansion valve; *4*, evaporator; *5*, fan; *6*, transfer pump; *7*, three-way valve; *8*, free cooling heat exchanger.

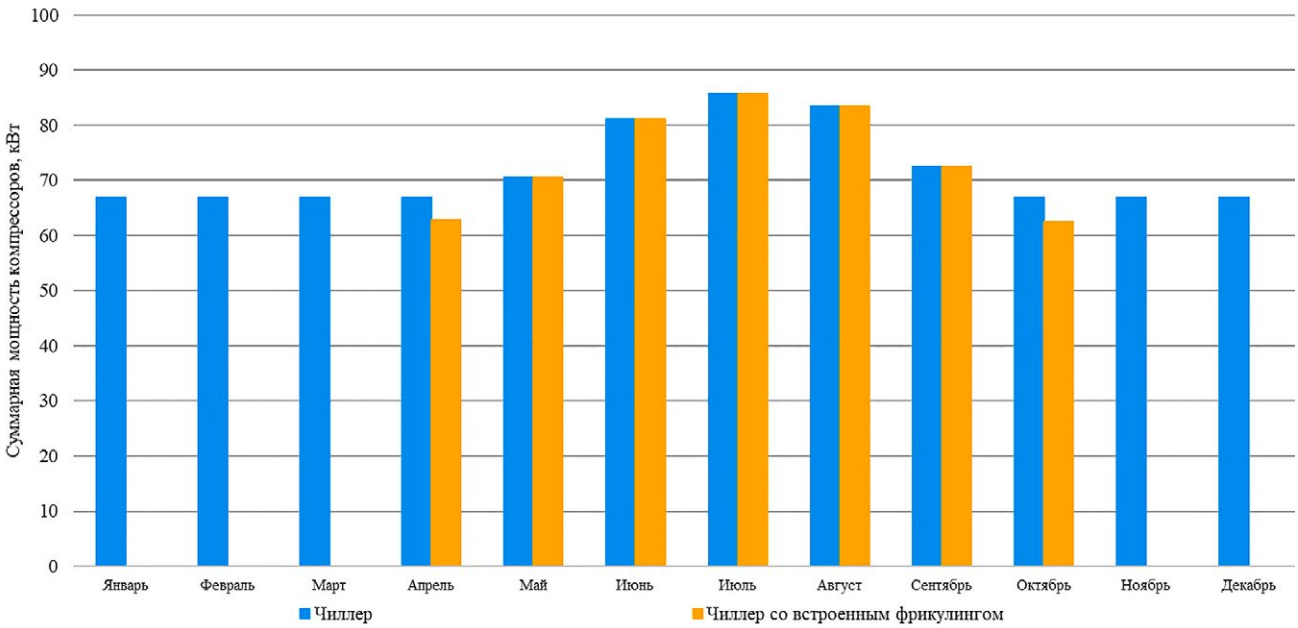

Рис. 3. Среднемесячное потребление энергии компрессорами чиллеров для холодопроизводительности 512 кВт.
Fig. 3. Average monthly energy consumption of chiller compressors for a cooling capacity of 512 kW.

DOI: https://doi.org/10.17816/RF678130

полиномиальные функции, из которых следовало, что на потребляемую мощность вентилятора напрямую влияет частота вращения и сопротивление воздуха [17]:

$$N_{в} = \frac{G_{в} \cdot \Delta P_{в}}{\eta_{в}} \cdot 3600,$$

где $G_{в}$ — расход воздуха для выбранной системы охлаждения (м^3/с); $\Delta P_{в}$ — сопротивление на микроканальном теплообменнике конденсатора с воздушным охлаждением и/или теплообменнике фрикулинга для выбранной системы охлаждения жидкости (Па); $\eta_{в}$ — КПД электродвигателя вентилятора.

В силу того, что установки рассчитываются на постоянную круглогодичную нагрузку, то подбор насоса был на неизменные характеристики расхода и напора теплоносителя, следовательно, потребляемая мощность насоса постоянна [18]. Расход насоса был получен по формуле:

$$G = \frac{Q_0}{c_{рэ} \cdot \Delta t_{и} \rho_{э}} \cdot 3600,$$

где G — массовый расход теплоносителя на испарителе чиллера (м^3/ч); $c_{рэ}$ — теплоемкость теплоносителя (кДж/(кг·К)); $\Delta t_{и}$ — разница температур между потоками теплоносителя от потребителя и к потребителю; $\rho_{э}$ — плотность теплоносителя (кг/м^3).

На основе полученных данных о потребляемой мощности каждого компонента системы и среднемесячных температур наружного воздуха было рассчитано годовое энергопотребление систем охлаждения в целом и их отдельных компонентов для двух вариантов: стандартного чиллера и чиллера со встроенным контуром свободного охлаждения. Результаты представлены на рис. 4. По итогам расчета потребляемой мощности компонентов систем охлаждения был определен коэффициент SEER (Сезонный коэффициент энергоэффективности) для каждой системы (Рис. 5). Анализ показал, что в чиллере со встроенным контуром свободного охлаждения наблюдается повышенное энергопотребление вентиляторов по сравнению с базовым чиллером, что обусловлено возросшим аэродинамическим сопротивлением дополнительных теплообменников. Однако энергопотребление компрессоров в этой системе в течение года значительно ниже благодаря использованию естественного холода. Несмотря на возросшие затраты на вентиляторы, суммарное годовое энергопотребление и, как следствие, значение SEER системы со встроенным свободным охлаждением оказались выше, чем у стандартного чиллера. Следовательно, установка со встроенным свободным охлаждением демонстрирует более высокую сезонную энергоэффективность.

Расчёт экономической эффективности основывался на стоимости установки и затратам на электроэнергию [19]. Для определения стоимости установок был сделан запрос в отдел продаж компании THERMEX ENERGY по моделям TMS-28-512-10EC-HM2-0-0-WS (чиллер) и TMS-28-512-10EC-HM2-0-FC-0 (чиллер с встроенным фрикулингом), и получена актуальная стоимость оборудования на май 2024 года (Табл. 2). Экономические затраты на электроэнергию чиллеров рассчитывались при условии круглогодичного электропотребления и стоимости 1 кВт·ч равного 9,98 (на май 2024 года). Результаты показали, что затраты на электроэнергию для традиционного чиллера составляют

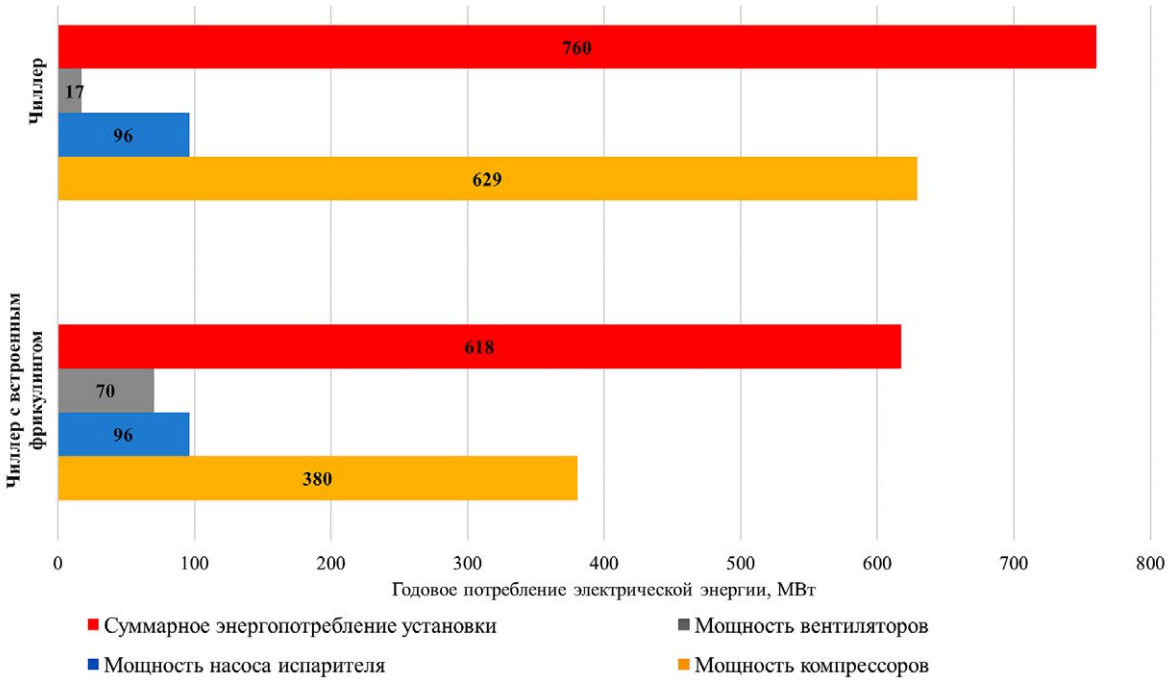

Рис. 4. Годовое потребление электричества системами охлаждения и их компонентами
Fig. 4. Annual power consumption of cooling systems and their components.

Рис. 5. Сравнительная диаграмма сезонных коэффициентов эффективности рассматриваемых систем охлаждения
Fig. 5. Comparative diagram of seasonal performance ratios of the studied cooling systems.

7,5 млн. руб., а на чиллер со встроенным фрикулингом 6 млн. руб. Система со встроенным свободным охлаждением демонстрирует значительное снижение эксплуатационных расходов на электроэнергию — экономия составляет 1.5 млн рублей ежегодно по сравнению со стандартным чиллером. Таким образом, несмотря на более высокие первоначальные капитальные вложения (CAPEX, см. табл. 2), чиллер со встроенным фрикулингом обеспечивает существенное снижение годовых затрат на электроэнергию (OPEX). Это формирует основу для экономической целесообразности внедрения данной технологии.

Таблица 2. Актуальная стоимость оборудования на май 2024 года
Table 2. Current cost of equipment as of May 2024

Тип системы	Стоимость, руб
Чиллер	10 268 084
Чиллер со встроенным фрикулингом	11 775 278

СРОК СЛУЖБЫ УСТАНОВКИ

Основным компонентом парокомпрессионного холодильного цикла, обеспечивающим требуемую холодопроизводительность, является компрессор. Этот компонент, наряду с другими элементами системы, является наиболее критичным и наименее ремонтопригодным. Следовательно срок службы установки напрямую определяется ресурсом компрессоров.

В рассмотренных выше установках компании THERMEX ENERGY используется одинаковая модель компрессора от одного производителя. Логично предположить, что эти компрессоры обладают идентичным расчётным ресурсом (в часах наработки). Несмотря на то, что компрессоры не эксплуатируются круглосуточно, чиллер со встроенным контуром свободного охлаждения позволяет полностью исключить работу компрессоров в течение 137 дней в году. Такое значительное снижение времени наработки компрессоров потенциально способно увеличить общий срок службы чиллера со встроенным свободным охлаждением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведен анализ систем охлаждения, эксплуатируемых в климатических условиях Санкт-Петербурга, включая системы с естественным и искусственным охлаждением.

На основе анализа температуры наружного воздуха определены потенциальные режимы работы систем и показано, что чиллер со встроенным контуром свободного охлаждения (фрикулингом) обладает наибольшим потенциалом энергоэффективности. Данное предположение получило подтверждение при расчете сезонного коэффициента энергоэффективности сравниваемых чиллеров.

Анализ экономической эффективности продемонстрировал, что более высокие капитальные затраты на чиллер со свободным охлаждением компенсируются значительной экономией на эксплуатационных расходах (электроэнергия), приводя к окупаемости дополнительных инвестиций в течение первого года эксплуатации.

Дополнительно, анализ ресурса ключевых компонентов показал потенциал для существенного увеличения срока службы чиллера со встроенным свободным охлаждением за счет снижения наработки компрессоров.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Р.В. Сигунов — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; И.В. Баранов — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; В.В. Митропов — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи.

Источник финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один внешний рецензент и член редакционной коллегии.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: R.V. Sigunov: investigation, writing—original draft, writing—review & editing; I.V. Baranov: investigation, writing—original draft, writing—review & editing; V.V. Mitropov: investigation, writing—original draft, writing—review & editing.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or non-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: When creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing is not applicable to this work, and no new data has been collected or created.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on its own initiative and reviewed according to the usual procedure. One external reviewer and a member of the editorial board participated in the review

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kwon TD, Jeong JW. Energy advantage of cold energy recovery system using water- and air-side free cooling technologies in semiconductor fabrication plant in summer. *Journal of Building Engineering.* 2023;69. doi: 10.1016/j.jobe.2023.106277 EDN: GMMJPE

2. Kargar S, Moran JL. Combining direct and indirect free cooling for data centers via transformation into a building-scale heat exchanger. *Applied Energy.* 2025;392. doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125973

3. Borkowski M, Piłat AK. Customized data center cooling system operating at significant outdoor temperature fluctuations. *Applied Energy.* 2022;306. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117975 EDN: SUOFIH

4. Borkowski M, Piłat AK. Energy Efficiency Increase Achieved by Dedicated Rule-Based Control of Chillers Operating in the Data Center. *Energies.* 2022;15. doi: 10.3390/en15010254 EDN: HKJTHD

5. Astafiev R. Application of direct freecooling (freshcooling) based on STULZ precision air conditioning. *AVOK.* 2021;7:16–19. (In Russ.)

6. Khomutskiy Yu. *Bulletin of the UCC APIC: Myths and Truth about Free Cooling.* 2019. (In Russ.) Accessed: 04.04.2025. Available from: https://mir-klimata.info/vestnik-ukc-apik-mify-i-pravda-o-frikulinge/

7. Fan C, Zou B, Liao Y, Zhou X. Evaluation of energy performance and ecological benefit of free-cooling system for data centers in worldwide climates. *Sustainable Cities and Society.* 2024;108(3). doi: 10.1016/j.scs.2024.105509

8. Baranenko AV, Malinina OS. Development of refrigeration systems based on absorption lithium bromide refrigeration machines. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration.* 2024;1:3–12. (In Russ.) doi: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-3-12 EDN: ICQZTI

9. Baranenko AV, Bukharin NN, Pekarev VI, et al. *Refrigerating machines.* St. Petersburg: Politekhnika; 1997. (In Russ.)

10. Antipov AV. Ways to improve the energy efficiency of chillers. *Milk processing.* 2012;147(1):28–33. (In Russ.) EDN: WJLLVF

11. Weather in Saint Petersburg — RP5. [internet] Accessed: 04.04.2025. Available from: https://rp5.ru/Погода_в_Санкт-Петербурге

12. Bozorgi M, Tasnim SH, Mahmud S. Machine learning-driven hybrid cooling system for enhanced energy efficiency in multi-unit residential buildings. *Energy & Buildings.* 2025;336:11–28.

13. Yang J, Chan KT, Wu X, et al. An analysis on the energy efficiency of air-cooled chillers with water mist system. *Energy and Buildings.* 2012;55:273–284.

14. Selection of compressor and piping of refrigeration machine. (In Russ.) [internet] Accessed: 04.04.2025. Available from: https://ridan.ru/instruments/coolconfig#introduce-cool-config (дата обращения 15.05.2024).

15. Maake V, Eckert GYu, Koshpen JL. *Textbook on refrigeration engineering.* Moscow: Polmann; 1998. (In Russ.)

16. Axial fans EC Weiguang. [internet] Accessed: 04.04.2025. Available from: https://weiguang.ru/catalog/r-osevie_ec/

17. SANHUA. Micro-channel heat exchangers [internet] Accessed: 04.04.2025. Available from: https://cdn.sanhuaeurope.co.uk/new_content/static/uploads/files/catalogue/mche-pdf.pdf

18. Pump selection CNP. [internet] Accessed: 04.04.2025. Available from: https://v3.cnppump.ltd/#/RU/Index (дата обращения 10.05.2024).

19. Maslakov V.N. Method for calculating the payback period of natural cooling (free cooling). *Refrigeration Technology.* 2018;107(2):44–48. (In Russ.) EDN: YVVLIL

ОБ АВТОРАХ

*** Сигунов Ростислав Владимирович;**
адрес: Российская Федерация, 191002, Санкт-Петербург, Ломоносова, 9, 1208;
e-mail: rsigunov@thermexenergy.ru

Баранов Игорь Владимирович,
д-р техн. наук, профессор;
ScopusAuthorID: 57209773690;
ORCID: 0000-0003-0595-368X;
eLibrary SPIN: 1938-6901;
РИНЦ AuthorID: 227737;
e-mail: barigor@mail.ru

Митропов Владимир Викторович,
канд. техн. наук, доцент;
ScopusAuthorID: 57213689378;
ORCID: 0000-0003-1614-7392;
eLibrary SPIN: 6602-5288;
РИНЦ AuthorID: 915802;
e-mail: vvmitropov@itmo.ru

AUTHOR'S INFO

*** Rostislav V. Sigunov;**
address: 9 Lomonosov st, art. 1208, Saint Petersburg, Russian Federation, 191002;
e-mail: rsigunov@thermexenergy.ru

Igor V. Baranov,
Dr. Sci. (Engineering), Professor;
ScopusAuthorID: 57209773690;
ORCID: 0000-0003-0595-368X;
eLibrary SPIN: 1938-6901;
RSCI AuthorID: 227737;
e-mail: barigor@mail.ru

Vladimir V. Mitropov,
Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor;
ScopusAuthorID: 57213689378;
ORCID: 0000-0003-1614-7392;
eLibrary SPIN: 6602-5288;
RSCI AuthorID: 915802;
e-mail: vvmitropov@itmo.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author