

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 62-683

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-4-147-156

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАТА-ЦЕНТРА

Юдин А.К.

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург, Россия

yudin.a.k@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Дата-центры (или ЦОД – центров обработки данных) – это специализированный объект, представляющий собой связанную систему ИТ-инфраструктуры, инженерной инфраструктуры, оборудование (серверного и сетевого) и части которых размещены в здании или помещении, подключенном к внешним сетям, как инженерным, так и телекоммуникационным. Из-за значительного тепловыделения данных систем возникла потребность в повышении эффективности систем охлаждения за счёт эффективной утилизации теплоты. *ЦЕЛЬ.* Расчет энергетического баланса типового дата-центра, проектируемого для эксплуатации в условиях центральной России. *МЕТОДЫ.* Разработанная энергетическая модель дата-центра представляет собой математическое описание всех энергетических процессов в здании, включая процессы теплопередачи, влияние вентиляции и кондиционирования, работу освещения, электроприборов и другого оборудования, работу инженерных систем. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Согласно результатам моделирования удельное потребление энергии составило 1353 кВт·ч/м², удельная годовая стоимость энергоресурсов – 8572,90 руб./м². Получены следующие ключевые результаты: потребляемая энергия модулями ЦОД – 38 399,53 МВт·ч/год; энергия, потребляемая ИТ оборудованием – 31 685,20 МВт·ч/год; PUE (представляет собой отношение общей потребляемой энергии ЦОД к энергии, непосредственно используемой ИТ-оборудованием) – 1,21. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Получены данные о годовом потреблении энергии, стоимости потребленных энергоресурсов и количестве CO₂, выбрасываемого в атмосферу при выработке энергетических ресурсов. Разработана месячная диаграмма потребления энергии по категориям (отопление, охлаждение, вентиляторы, утилизация тепла, насосы, внутреннее освещение, розеточное оборудование, серверы). В ходе дальнейших исследований планируется рассмотреть приоритетные схемы утилизации тепловой энергии дата-центра.

Ключевые слова: дата-центр; когенерация; утилизация тепловой энергии; энергетическое моделирование; централизованное теплоснабжение.

Для цитирования: Юдин А.К. Разработка энергетической модели дата-центра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 147-156. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-147-156.

DEVELOPMENT OF AN ENERGY MODEL OF A DATA CENTER

Yudin A.K.

SPbPU, Saint Petersburg, Russia

yudin.a.k@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Data centers are a specialized facility that is an interconnected system of IT infrastructure, engineering infra-structure, equipment (server and network) and parts of which are located in a building or room connected to external networks, both engineering and telecommunications. Due to the significant heat generation of these systems, there is a need to increase the efficiency of cooling systems through efficient heat recovery. *THE PURPOSE.*

Calculation of the energy balance of a typical data center designed for operation in central Russia. METHODS. The developed energy model of a data center is a mathematical description of all energy processes in a building, including heat transfer processes, the effects of ventilation and air conditioning, the operation of lighting, electrical appliances and other equipment, and the operation of engineering systems. RESULTS. According to the simulation results, the specific energy consumption was 1,353 kWh/m², the specific annual cost of energy resources was 8,572.90 rubles/m². The following key results were obtained: energy consumed by data center modules – 38,399.53 MWh/year; energy consumed by IT equipment – 31,685.20 MWh/year; PUE (it represents the ratio of the total energy consumed by the data center to the energy directly used by the IT equipment) – 1.21. CONCLUSION. Data on annual energy consumption, the cost of consumed energy resources and the amount of CO₂ released into the atmosphere during the production of energy resources were obtained. A monthly energy consumption chart has been developed by category (heating, cooling, fans, heat recovery, pumps, interior lighting, outlet equipment, servers). In the course of further research, it is planned to consider priority schemes for the utilization of thermal energy of the data center.

Keywords: data center; cogeneration; heat energy utilization; energy modeling; centralized heat supply.

For citation: Yudin A.K. Development of an energy model of a data center. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (4): 147-156. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-147-156.

Введение (Introduction)

Согласно [1] суммарная мощность ЦОД в России превысила 500 МВт в 2021 г., по состоянию на 2024 г. эта величина равняется 800 МВт. Таким образом, ежегодный прирост потребляемой мощности в отрасли хранения данных составляет не менее 100 МВт/год. Известно, что практически вся электроэнергия, потребляемая основным оборудованием дата-центров, преобразуется во вторичную тепловую энергию. Внедрение дата-центров с отводом тепловой энергии внешним абонентам позволяет снизить потребление электрической энергии на охлаждение и утилизировать большую часть тепловой энергии (как правило, до 70%) от работы основного оборудования. Цель настоящего исследования заключается в расчете энергетического баланса типового дата-центра, проектируемого для эксплуатации в условиях центральной России.

Дата-центры играют важную роль в современном мире, так как они являются основой для работы большинства современных компаний, облачных сервисов и интернет-сервисов. По данным IDC (International Data Corporation – Международная корпорация информационных технологий), в 2021 году мировой рынок дата-центров оценивался в 152 миллиарда долларов США. Прогнозируется, что к 2025 году этот рынок вырастет до 236 миллиардов долларов [2].

Что касается России, то в настоящее время на ее территории действует множество дата-центров, как международных, так и российских компаний. Согласно отчету компании TAdviser (Российский интернет-ресурс и аналитическое агентство), к концу 2020 года в России насчитывалось более 370 дата-центров, которые находятся во всех регионах страны. Наибольшее количество дата-центров находится в Москве и Санкт-Петербурге, однако также имеются дата-центры в крупных городах, таких как Екатеринбург, Казань, Новосибирск и другие.

В настоящее время российский рынок дата-центров активно развивается. Согласно исследованию компании MarketsandMarkets, до 2025 года российский рынок дата-центров оценивается в 1,5 миллиарда долларов США и ожидается, что он будет расти с CAGR (Compound Annual Growth Rate – показатель совокупного среднегодового темпа роста) около 12% в период с 2020 по 2025 год.

Существует множество классификаций дата-центров, которые могут использоваться для определения их характеристик и применения в конкретных условиях. Основные классификации дата-центров:

Классификация по уровню доступности:

- Tier I (1-й уровень) – это дата-центр с минимальной доступностью, который не предоставляет гарантии непрерывности работы и имеет одну источник питания и охлаждения.

- Tier II (2-й уровень) – это дата-центр с повышенной доступностью, который имеет две независимые системы питания и охлаждения, что позволяет уменьшить вероятность простоя.

- Tier III (3-й уровень) – это дата-центр с высокой доступностью, который имеет двойные системы питания и охлаждения, которые работают независимо друг от друга и обеспечивают непрерывность работы в случае отказа одной из них.

- Tier IV (4-й уровень) – это дата-центр с максимальной доступностью, который имеет все преимущества Tier III, а также резервные системы источников питания и охлаждения, что обеспечивает наивысший уровень надежности.

Классификация по количеству содержащихся серверных стоек:

- Small data center (малый дата-центр) – это дата-центр, который может содержать от нескольких до нескольких десятков серверных стоек.

- Medium data center (средний дата-центр) – это дата-центр, который может содержать от нескольких десятков до нескольких сотен серверных стоек.

- Large data center (большой дата-центр) – это дата-центр, который может содержать более тысячи серверных стоек.

Классификация по характеру загрузки:

- Compute-intensive data center (Центр обработки данных с высокой вычислительной нагрузкой) – это дата-центр, который используется для выполнения тяжелых вычислительных задач, таких как научные расчеты и моделирование.

- Storage-intensive data center (Центр обработки данных с высокой нагрузкой на хранение данных) – это дата-центр, который используется для хранения и обработки больших объемов данных.

- Network-intensive data center (Центр обработки данных с высокой нагрузкой на сеть) – это дата-центр, который используется для обработки и передачи больших объемов медиа-данных.

Классификация по мощности электроснабжения на объект (согласно нормативной документации в Российской Федерации) [3]:

- Класс А – более 30 МВт.
- Класс В – от 15 до 30 МВт.
- Класс С – от 5 до 15 МВт.
- Класс D – от 0,5 до 5 МВт.
- Класс E менее 0,5 МВт.

Системы охлаждения серверных помещений дата-центров в принципиальном смысле разделяются на активные и пассивные. Активная схема охлаждения, представляет собой систему кондиционирования с использованием активных элементов, вентиляторов, где потоки воздуха протекают в специальных проходах, контролируемых перфорированными плитами. Удаление тепла в них происходит по схемам с открытыми проходами и с изолированными проходами. Данные решения являются самыми распространёнными решениями, однако при их использовании увеличивается потребление электроэнергии из-за необходимости в кондиционировании. Главным недостатком открытых проходов является смешивание холодных и горячих потоков воздуха, что приводит к увеличению температуры охлаждения. Недостатками же изолированных проходов являются более высокий уровень акустического шума и повышенное потребление электричества из-за холодильных компрессионных установок и охлаждающих вентиляторов. Пассивные системы представляют собой системы, где отсутствует активный элемент, а теплообмен происходит с помощью контакта охлаждаемых компонентов либо с теплоносителями, либо с рекуперативными теплообменными аппаратами.

Примером успешного использования утилизированного тепла от дата-центров являются Стокгольмские Дата Парки [4]. Данные объекты работают по чиллерной схеме охлаждения [5] и позволяют удовлетворить тепловые потребности около 2500 квартир. Как можно заметить из работы [6], многие дата-центры находятся в плотно застроенных зонах Лулео и Стокгольма. Положительный опыт применения тепла дата-центров для централизованного теплоснабжения также имеется в Финляндии. Одним из первых исследований потенциала использования тепла дата-центров стала работа [7]. В ней был проведён анализ дата центров воздушной системы охлаждения с применением чиллеров. Результаты моделирования показали, что рассматриваемый дата-центр может обеспечить ежегодное отопление помещений и нагрев горячей воды для помещений общей площадью около 30 тыс. м². Согласно [8, 9], страны Северной Европы хорошо подходят для дата-центров из-за простоты внедрения фрикулинговых систем в силу более низких наружных температур и возможностей использования воды от моря и озер.

В России существует несколько решений для систем охлаждения дата-центров. Одним из таких решений является использование метода фрикулинга, который использует воздух из окружающей среды для охлаждения серверного оборудования [10-12]. Данное решение может быть достаточно эффективно в холодный период года [13]. Другим решением для систем охлаждения может быть применение жидких теплоносителей, которые используются, например, в работе чиллерных систем. Также применяется метод иммерсионного охлаждения, являющийся сравнительно инновационным. Такой метод позволяет существенно снизить затраты на энергию и обслуживание, благодаря использованию жидкости с высокими теплофизическими характеристиками. Однако, такие системы требуют затрат на устройства подачи и отвода теплоносителя, а также на системы контроля обработки охлаждающей жидкости и системы безопасности [14, 15]. Стоит отметить, что не все типы серверного оборудования способны работать в системе иммерсионного охлаждения, некоторые из компонентов чувствительны к воздействию жидкостей, что влечет за собой необходимость установки дополнительной защиты.

Материалы и методы (Materials and methods)

Энергомоделирование – это процесс создания цифровой модели здания, которая позволяет анализировать его энергопотребление и внутренний микроклимат. Энергетическая модель представляет собой математическое описание всех энергетических процессов в здании, включая процессы теплопередачи, влияние вентиляции и кондиционирования, работу освещения, электроприборов и другого оборудования, работу инженерных систем [16]. Такая модель может использоваться для многих целей, включая оценку текущего энергопотребления, прогнозирование будущих затрат на энергию, сравнение различных проектных решений и их влияние на энергоэффективность, а также для оценки выбросов CO_2 и разработке программ углеродной нейтральности [17].

В данной работе была создана энергетическая модель для оценки энергоэффективности проектных решений здания. Это было достигнуто путем моделирования работы здания и его инженерных систем на протяжении года, что позволило подробно проанализировать общее расчётное энергопотребление. Полученные результаты также могут служить отправной точкой для последующих исследований и разработки мер по оптимизации энергопотребления реальным зданием.

Построение энергетической модели – поэтапный и комплексный процесс. Построение энергетической модели состоит из следующих шагов (рис. 1):

1. Назначение местоположения, ориентации по сторонам света и использование климатических данных для учета внешних условий среды.
2. Построение геометрии модели на основе архитектурных чертежей, включая форму и размеры здания, его этажность и архитектурные особенности.
3. Назначение теплофизических свойств материалов и конструкций здания: теплопроводность, удельную теплоемкость и другие характеристики для точного моделирования процессов теплопередачи.
4. Определение функционала помещений, режимов их работы, а также поддерживаемые параметры микроклимата.
5. Назначение основных потребителей электроэнергии: система электрического освещения, розеточное оборудование, а также специализированное оборудование, такое как серверы и другие технические устройства.
6. Создание математической модели работы инженерных систем здания: моделирование работы систем отопления, вентиляции, кондиционирования, холодоснабжения и теплоснабжения.
7. Расчет годового цикла работы инженерных систем, внутренних параметров микроклимата и выбросов CO_2 .

Для энергетического моделирования объекта использовался программный комплекс, расчетный модуль которого – программа для динамического моделирования, основанная на прямом численном моделировании процессов теплопередачи, происходящих внутри и снаружи здания. Эта программа служит средой для детальной оценки здания и работы его систем с точки зрения потребления энергии и комфорта. В рамках расчётов процессы передачи теплоты посредством теплопроводности, конвекции и излучения для каждого из элементов здания моделируются индивидуально и в связке с данными о теплопоступлениях в помещения, воздухообмене и математической модели работы оборудования систем отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВиК). Моделирование выполняется на основе детальных погодных данных и может покрывать любой период времени от одного дня до одного

года. Тепловые процессы здания моделируются на интервалах времени вплоть до одной минуты.



Рис. 1. Основные этапы создания энергетической модели Fig. 1. The main stages of creating an energy model

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Климатическая зона: Зона умеренно-континентального климата. Основными признаками этого вида умеренного климата является жаркое лето и морозная зима.

Наружные климатические условия:

- Для системы отопления: Расчётная температура наружного воздуха в холодный период -31°C .

- Для системы вентиляции и кондиционирования: Расчётная температура наружного воздуха в холодный период -37°C . Расчётная температура наружного воздуха в тёплый период $+40^{\circ}\text{C}$.

Приведённые климатические параметры используются для инженерного расчёта потребности помещений в тепловой и холодильной нагрузке, а также для расчёта нагрузок для смоделированных систем ОВиК методом теплового баланса. Метод теплового баланса представляет собой расчет нестационарного теплового баланса помещения с учетом воздействий солнечной радиации и температуры наружного воздуха, а также внутренних технологических и бытовых теплопоступлений для определения нагрузки на системы ОВиК.

Этот метод является стандартным подходом к расчету тепловых нагрузок здания и широко используется в инженерной практике для проектирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Он позволяет учитывать множество факторов, влияющих на тепловые условия внутри здания, и обеспечивает основу для оптимизации проектирования систем комфорта и энергоэффективности.

Построение архитектурной модели – это процесс создания цифрового представления здания с учетом его геометрии, расположения, ориентации и конструктивных особенностей. Архитектурная модель включает в себя информацию о форме и размерах здания, расположении окон и дверей, типах и характеристиках строительных материалов, а также другие архитектурные детали (рис. 2).

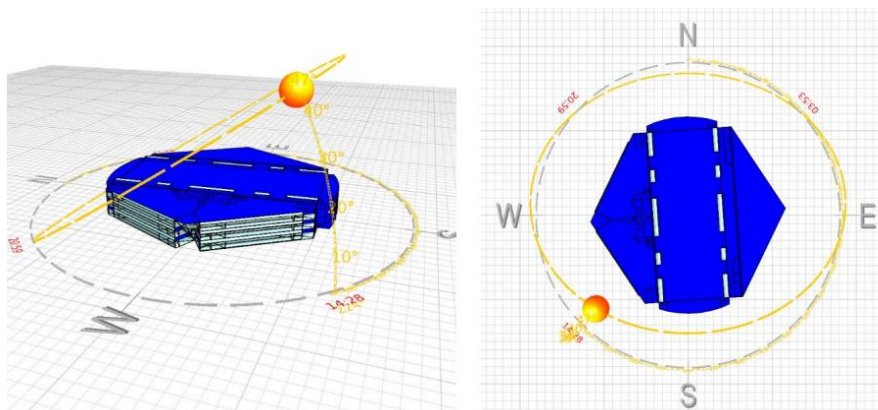


Рис. 2. Архитектурная модель здания

Fig. 2. Architectural model of the building

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Она является основой для последующего создания энергетической модели, так как она определяет физические параметры здания, необходимые для расчета его энергетических характеристик. Архитектурная модель строится на основе чертежей разделов Архитектурные решения и Конструктивные решения проектной документации.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Ниже представлены результаты энергетического моделирования всего здания технического центра. В табл. 1 приведены данные о годовом потреблении энергии, стоимости потребленных энергоресурсов и количестве CO₂, выбрасываемого в атмосферу при выработке энергетических ресурсов.

Таблица 1

Table 1

Абсолютные показатели энергопотребления

Absolute energy consumption figures

Показатель	Годовое потребление энергии, кВт·ч	Годовая стоимость энергоресурсов, руб.	Годовые выбросы CO ₂ , кг
Величина	39 775 715,45	251 985 829,14	13 777 530,00

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 3 представлено общее годовое потребление энергии с разбиением на тепловую энергию и электрическую энергию, на рисунке 4 – годовая стоимость энергоресурсов.

Согласно результатам моделирования удельное потребление энергии составило 1353 кВт·ч/м², удельная годовая стоимость энергоресурсов – 8572,90 руб./м². На рисунке 5 представлено удельное энергопотребление по категориям оборудования. На рисунке 6 представлена помесечная диаграмма потребление энергии по категориям.



Рис. 3. Годовое энергопотребление по видам энергии, МВт·ч

Fig. 3. Annual energy consumption by energy types, MWh

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 4. Стоимость энергоресурсов, млн. руб. Fig. 4. Cost of energy resources, million rubles
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

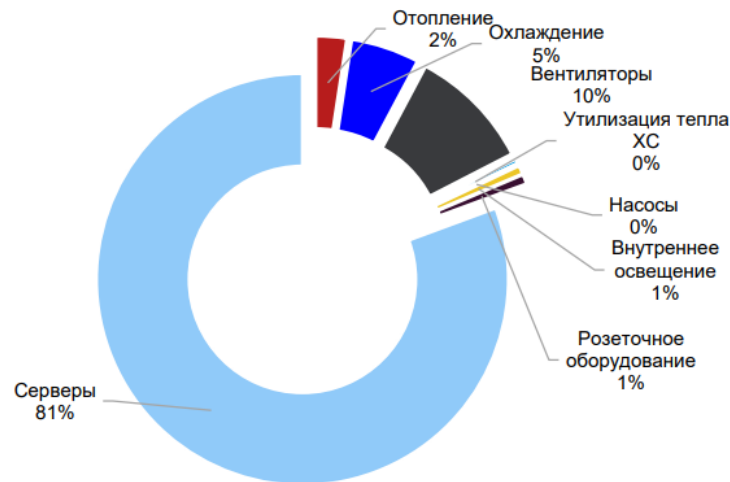


Рис. 5. Удельное энергопотребление по категориям оборудования Fig. 5. Specific energy consumption by equipment categories
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

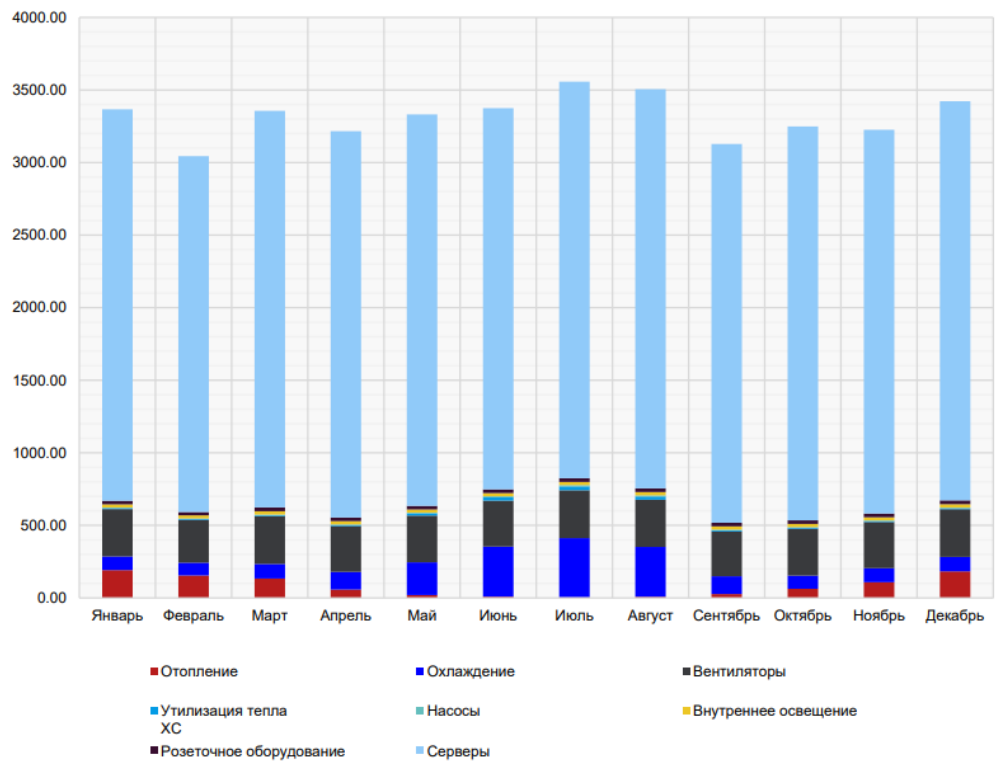


Рис. 6. Годовое помесечное потребление энергии с разбиением по категориям, МВт·ч Fig. 6. Annual monthly energy consumption by category, MWh
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Power Usage Effectiveness (PUE) является ключевым показателем энергоэффективности центров обработки данных (ЦОД). Он представляет собой отношение общей потребляемой энергии ЦОДа к энергии, непосредственно используемой ИТ-оборудованием. При этом общая потребляемая энергия включает в себя все источники энергопотребления в ЦОДе, такие как системы охлаждения, источники бесперебойного питания (ИБП), освещение и другие вспомогательные системы. Энергия, потребляемая ИТ-оборудованием, охватывает только энергию, необходимую для работы серверов, систем хранения данных и сетевого оборудования.

PUE предоставляет важную информацию для анализа и оптимизации энергетической эффективности ЦОДа. Идеальное значение PUE равно 1, что указывает на то, что вся потребляемая энергия используется исключительно ИТ-оборудованием без дополнительных потерь на вспомогательные системы. В реальности, PUE обычно превышает 1, и снижение этого показателя свидетельствует о повышении эффективности использования энергии. Общая потребляемая энергия модулями ЦОД складывается из энергопотребления: чиллеров, насосов системы холодоснабжения (ХС), конденсаторов системы ХС, освещения, розеточного оборудования, вентиляторов.

Таким образом, показатели годового потребления энергии для модулей ЦОД составляет:

- Потребляемая энергия модулями ЦОД – 38 399,53 МВт·ч/год;
- Энергия, потребляемая ИТ оборудованием – 31 685,20 МВт·ч/год;
- PUE – 1,21.

Заключение (Conclusions)

Выбор решения для охлаждения дата-центров в России зависит от многих факторов, таких как климатические условия, доступность ресурсов, требования к надежности и эффективности, а также бюджетные ограничения. Использование теплоты дата-центров требует серьезного подхода и профильных компетенций, но может быть эффективным комплексным решением для повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения.

Одним из перспективных решений является размещение дата-центров на территориях действующих энергетических объектов:

- Земельные участки оформлены, на освобождаемых площадях предусмотрено развитие под новое технологическое строительство.
- Доступны качественные и надежно поставляемые энергетические ресурсы, при этом при наличии собственной генерации стоимость электрической энергии может быть ниже, чем из сети.
- Площадки обеспечены транспортным сообщением, комплексом инженерно-технических средств охраны и ресурсами жизнеобеспечения для эксплуатации ЦОД.
- Объекты размещаются в развитых районах, т.е. там, где есть жилая среда и крупные промышленные потребители.

Литература

1. IKS Consulting. Аналитический отчет «Российский рынок коммерческих дата-центров 2023» [Электронный ресурс]: Рынок коммерческих ЦОД в России 2023 – Режим доступа: <https://survey.iksconsulting.ru/page30265406.html>
2. International Data Corporation. Режим доступа: <https://www.idc.com/>.
3. ГОСТ Р 70139-2022 Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Классификация.
4. Stockholm Data Parks [Электронный ресурс]: Stockholm Data Parks – Режим доступа: <https://stockholmdataparks.com/>.
5. Arianna Tofani. A case study on the integration of excess heat from Data Centres in the Stockholm district heating system // TRITA: TRITA-ITM-EX 2022:469, Stockholm, Sweden 2022. p. 56.
6. Cristina Ramos Caceres, Marcus Sandberg, Adolfo Sotoca. Planning data center locations in Swedish municipalities. A comparative case study of Luleå and Stockholm // Cities 150, 2024. p. 22.
7. Tao Lu, Xiaoshu Lü, Matias Remes, Martti Viljanen. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study // Energy and Buildings 43, 2011. p. 3360–3372.
8. Mikko Wahlroos, Matti Pärssinen, Samuli Rinne, Sanna Syri, Jukka Manner. Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe // Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 2018. p. 1749–1764.
9. Mikko Wahlroos, Matti Pärssinen, Jukka Manner, Sanna Syri. Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks // Energy 140, 2017. p. 1228–1238.

10. Рассмуссен Н. Расчет технических требований для общего охлаждения в центрах обработки данных / Н. Рассмуссен // Информационная статья American Power Conversion. – 2003. – № 25. – 9 с.
11. Chayan Nadjahi, Hasna Louahlia, Stéphane Lemasson A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center // NORMANDIE UNIV, UNICAEN, LUSAC, 2018. p. 14-28.
12. Ahmed A. Alkurush, Mohamed S. Salem, O. Abdelrehim, A.A. Hegazi. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions // International Journal of Refrigeration 160, 2024. p. 246-262.
13. Suhas V. Patankar. Airflow and cooling in a data center // Journal of Heat Transfer, 2010. p. 17.
14. B. Fakhim, M. Behnia, S.W. Armfield, N. Srinarayana. Cooling solutions in an operational data centre: A case study // Applied Thermal Engineering 31, 2011. p. 2279-2291.
15. Hongjie Lu, Zhongbin Zhang, Liu Yang. A review on airflow distribution and management in data center // Energy & Buildings 179, 2018. p. 265-277.
16. Ю.И. Солуянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин // Расчет поправочного коэффициента к нормативным значениям удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов г. Москвы и Московской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 142-153. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-4-142-153. – EDN CAFEMG.
17. М.С. Иваницкий // Технологические нормативы и показатели выбросов ТЭСИ котельных // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 3-15. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-3-3-15. – EDN GWNTMS.

Авторы публикации

Юдин Александр Константинович – аспирант ФГАОУ ВО «СПбПУ», Высшая школа атомной и тепловой энергетики, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: yudin.a.k@mail.ru

References

1. IKS Consulting. Analytical report "Russian market of commercial data centers 2023" [Electronic resource]: The market of commercial data centers in Russia 2023 – Access mode: <https://survey.iksconsulting.ru/page30265406.html>
2. International Data Corporation. Режим доступа: <https://www.idc.com/>.
3. GOST R 70139-2022 Data processing centers. Engineering infrastructure. Classification.
4. Stockholm Data Parks [Electronic resource]: Stockholm Data Parks – Access mode: <https://stockholmdataparks.com/>.
5. Arianna Tofani. A case study on the integration of excess heat from Data Centres in the Stockholm district heating system // TRITA: TRITA-ITM-EX 2022:469, Stockholm, Sweden 2022. p. 56.
6. Cristina Ramos Caceres, Marcus Sandberg, Adolfo Sotoca. Planning data center locations in Swedish municipalities. A comparative case study of Luleå and Stockholm // Cities 150, 2024. p. 22.
7. Tao Lu, Xiaoshu Lü, Matias Remes, Martti Viljanen. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study // Energy and Buildings 43, 2011. p. 3360–3372.
8. Mikko Wahlroos, Matti Pärssinen, Samuli Rinne, Sanna Syri, Jukka Manner. Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe // Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, 2018. p. 1749–1764.
9. Mikko Wahlroos, Matti Pärssinen, Jukka Manner, Sanna Syri. Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks // Energy 140, 2017. p. 1228–1238.
10. Rasmussen N. Calculation of technical requirements for general cooling in data centers / N. Rasmussen // American Power Conversion Information Technology. – 2003. – № 25. – 9 С.
11. Chayan Nadjahi, Hasna Louahlia, Stéphane Lemasson A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center // NORMANDIE UNIV, UNICAEN, LUSAC, 2018. p. 14-28.
12. Ahmed A. Alkurush, Mohamed S. Salem, O. Abdelrehim, A.A. Hegazi. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions // International Journal of Refrigeration 160, 2024. p. 246-262.
13. Suhas V. Patankar. Airflow and cooling in a data center // Journal of Heat Transfer, 2010. p. 17.
14. B. Fakhim, M. Behnia, S.W. Armfield, N. Srinarayana. Cooling solutions in an operational data centre: A case study // Applied Thermal Engineering 31, 2011. p. 2279-2291.
15. Hongjie Lu, Zhongbin Zhang, Liu Yang. A review on airflow distribution and management in data center // Energy & Buildings 179, 2018. p. 265-277.
16. Yu.I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin // Calculation of the correction factor to the normative values of specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region // Publications of higher educational institutions. Energy problems. – 2022. – Vol. 24, No. 4. – pp. 142-153. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-4-142-153.

17. M.S. Ivanitsky // Technological standards and emission indicators of thermal power plants and boiler houses // News of higher educational institutions. Problematic issues. – 2024. – VOL. 26, No. 3. – pp. 3-15. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-3-3-15.

Authors of the publication

Alexander K. Yudin – SPbPU, Higher School of Atomic and Thermal Energy, Saint Petersburg, Russia. E-mail: yudin.a.k@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **03.06.2025 г.**

Отредактировано **19.06.2025 г.**

Принято **03.07.2025 г.**