

Организационно-технологические решения строительства центров обработки данных под нагрузки искусственного интеллекта: требования, риски, регламенты

Роман Олегович Самсонов, Виктор Станиславович Лоткин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Быстрый рост обработки нагрузок искусственного интеллекта (ИИ-нагрузки) сместил ключевые ограничения центров обработки данных (ЦОД) с площади и воздушного охлаждения к доступной мощности присоединения, теплосъему и водной инфраструктуре. AI-ready становится свойством строительного проекта: решения о жидкостных/иммерсионных схемах, утилизации тепла, резервировании и программе пусконаладки должны приниматься на ранних стадиях и быть формализованы в проектных параметрах и допусках.

Материалы и методы. Выполнен целенаправленный обзор публикаций с включением рецензируемых статей и профильных стандартов (EN 50600, рекомендации ASHRAE TC 9.9, серия ISO/IEC 30134). Источники проходили тематическое кодирование по темам «охлаждение/теплосъем», «электроснабжение», «вода и экология», «площадка и компоновка», «регламенты и KPI». Анализ осуществлялся как проекция «требование ИИ → строительное решение → проверяемый параметр» с построением матрицы соответствия и схемы «риск → мероприятие → KPI → метод приемки», что позволило увязать литературные данные с практическими инженерными допусками и процедурами испытаний.

Результаты. Целевая архитектура высокоплотных ИИ-кластеров требует принятия жидкостных контуров охлаждения с подготовкой к иммерсии, подтвержденной устойчивости электроснабжения к переходным процессам, постановки водных KPI (WUE) наравне с PUE, а также проектирования интерфейсов утилизации низкопотенциального тепла. Эффективность повышают модульность и блоки заводского производства, каскадный ввод мощностей и применение цифровых двойников. Предложены интегрированная карта рисков и матрица нормативного соответствия, связывающие регламенты с проектными параметрами и приемочными процедурами.

Выводы. «Готовность к ИИ» формируется как результат согласованных организационно-технологических решений строительства. Управленческая рамка, включающая KPI-бюджеты на этапе проектирования, матрицу соответствия требованиям и программу stress-испытаний, обеспечивает воспроизводимость целевых показателей (PUE/WUE/ERE/ERF), управляемость сроков и стоимости и ускоряет достижение проектной вычислительной мощности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: центры обработки данных, искусственный интеллект, организационно-технологические решения, жидкостное охлаждение, иммерсионное охлаждение, утилизация тепла, выбор площадки, PUE

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самсонов Р.О., Лоткин В.С. Организационно-технологические решения строительства центров обработки данных под нагрузки искусственного интеллекта: требования, риски, регламенты // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.11

Автор, ответственный за переписку: Виктор Станиславович Лоткин, victorlotkin@yandex.ru.

Organizational and technological solutions for data centres construction under AI workloads: requirements, risks, and regulations

Roman O. Samsonov, Victor S. Lotkin

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The rapid growth of AI workloads has shifted the key constraints of data centres from floor space and air cooling to available connection power, heat removal capacity, and water infrastructure. AI-ready is becoming an inherent property of building design: decisions regarding liquid/immersion cooling schemes, heat recovery, redundancy, and commissioning programs must be made at early stages and formalized within design specifications and tolerances.

Materials and methods. A targeted review of publications was conducted, incorporating peer-reviewed papers and relevant standards (EN 50600, ASHRAE TC 9.9 guidelines, ISO/IEC 30134 series). Sources were thematically coded under the categories: "cooling/heat removal", "power supply", "water and ecology", "site layout and configuration", and "regulations and KPI".

Analysis was performed as a mapping of “AI requirement → building solution → measurable parameter”, resulting in a correspondence matrix and a risk-mitigation framework structured as “risk → mitigation measure → KPI → acceptance method”. This approach effectively linked academic literature with practical engineering tolerances and testing procedures.

Results. The target architecture for high-density AI clusters requires implementation of liquid cooling circuits with readiness for immersion cooling, validated resilience of power supply against transient loads, establishment of water usage effectiveness (WUE) KPI on par with PUE, and design of interfaces for low-grade heat recovery. Efficiency is enhanced through modularity and factory-built modules, staged power ramp-up, and digital twin technologies. An integrated risk map and a regulatory compliance matrix are proposed, explicitly linking standards to design parameters and acceptance procedures.

Conclusions. “AI-readiness” emerges as the outcome of coordinated organizational and technological construction decisions. A management framework encompassing KPI budgets during design phase, a requirements-compliance matrix, and a stress-testing program ensures reproducibility of target metrics (PUE/WUE/ERE/ERF), control over schedule and cost, and accelerated achievement of designed computational capacity.

KEYWORDS: data centres, artificial intelligence, organizational-technological solutions, liquid cooling, immersion cooling, heat recovery, site selection, PUE

FOR CITATION: Samsonov R.O., Lotkin V.S. Organizational and technological solutions for data centres construction under AI workloads: requirements, risks, and regulations. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(4):11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.11

Corresponding author: Victor S. Lotkin, victorlotkin@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное распространение прикладных и генеративных технологий искусственного интеллекта (ИИ) существенно трансформировало требования к центрам обработки данных (ЦОД). В отличие от традиционных вычислительных комплексов, ИИ-кластеры характеризуются высокой плотностью вычислительных нагрузок, повышенной чувствительностью к температурным и электрическим режимам, а также жесткими ограничениями по отказо-устойчивости и масштабируемости. Указанные свойства определяются не только выбором ИТ-оборудования, но, прежде всего, архитектурой и качеством организационно-технологических решений (ОТР) в строительстве на предынвестиционной и проектно-строительной стадиях жизненного цикла (ЖЦ) объекта. Следовательно, способность ЦОД надежно и эффективно обслуживать ИИ-нагрузки является функцией корректно принятых и последовательно реализованных строительных решений.

Ключевой особенностью AI-ready ЦОД выступает изменение ограничивающих факторов. Если при традиционном проектировании доминировали геометрия машинных залов и возможности воздушного охлаждения, то для ИИ-кластера определяющими становятся доступная электрическая мощность присоединения, тепловая нагрузка и требуемые режимы теплосъема. Это предопределяет переход к технологиям жидкостного охлаждения (в том числе direct-to-chip и теплообменные двери заднего типа) и иммерсионным системам, а также к проработке утилизации низкопотенциального тепла посредством тепловых насосов и подключений к системам теплоснабжения. Соответствующие решения имеют прямые строительные последствия: изменяются требования к конструктивным элементам (несущая способность перекрытий, фундаментов, узлов ввода), планировке (технологические высоты, трассировка трубопроводов и шинопроводов), вибро- и шумозащите насосных агрегатов, коррози-

онной стойкости материалов и технологии монтажа контуров охлаждения и водоподготовки.

Выбор площадки и типизация проекта в условиях ИИ-нагрузок приобретают многокритериальный характер, в котором строительная отрасль играет определяющую роль. К числу приоритетных факторов относятся: сроки и условия технологического присоединения к электрическим сетям, доступность и качество водных ресурсов, мезоклиматические параметры (влияющие на режимы свободного и адиабатического охлаждения), природоохранные и градостроительные ограничения, а также геотехнические и гидрогеологические риски. Принятые на этой стадии решения предопределяют целевые показатели эффективности — коэффициент энергоэффективности (PUE), коэффициент водной эффективности (WUE), показатели энергетической повторной утилизации (ERE/ERF) — и критически влияют на показатель time-to-compute, т.е. срок достижения проектной вычислительной мощности. Практика показывает эффективность модульности, использования изделий и блоков заводской готовности, раннего размещения заказов на длиннопериодное оборудование (трансформаторы, распределительные устройства, источник бесперебойного питания (ИБП), теплообменные и насосные группы) и каскадного ввода мощностей.

Организационно-технологический контур строительства ЦОД, ориентированного на ИИ, должен обеспечивать консистентный перевод технологических требований в инженерно-строительные регламенты и процедуры.

Электроснабжение и резервирование. Формирование конфигураций N+1/2N для источников бесперебойного питания и дизель-генераторных установок, обеспечение селективности защиты и качества электроэнергии при наличии мощной силовой электроники, учет гармонических и переходных процессов.

Системы охлаждения и теплосъема. Проектирование жидкостных контуров (включая блоки рас-

пределения охлаждающей жидкости, коллекторные группы и байпасные линии), нормирование параметров теплоносителя (температура, давление, химический состав), обеспечение отказоустойчивости и ремонтпригодности без остановки критических зон, подготовка к применению иммерсионных технологий.

Водоподготовка и экологические режимы. Выполнение объемно-балансовых расчетов, организация систем подготовки и подпитки, соблюдение требований к сбросам и мониторингу водного следа, включение соответствующих мероприятий в разрешительную документацию.

Архитектурно-планировочные решения. Обеспечение несущей способности для высоких точечных нагрузок стоечных рядов и иммерсионных ванн, формирование технологических пространств и шахт для транспортировки крупногабаритного оборудования, разделение «чистых» и «грязных» зон монтажа.

Пусконаладочные работы и ввод. Построение ступенчатых программ термических и электрических испытаний, проведение стресс-тестов, применение цифровых чек-листов и систем трассируемости дефектов, использование информационного моделирования для координации инженерных систем и логистики монтажа.

Содержательное значение имеет нормативно-технический контекст. Международные и национальные стандарты (например, EN 50600 по проектированию и эксплуатации ЦОД; рекомендации ASHRAE TC 9.9 по температурным классам для жидкостного охлаждения; серия ISO/IEC 30134 по ключевым показателям эффективности: PUE, WUE, ERE/ERF) задают рамочные требования к качеству проектных и строительных решений. Для ИИ-нагрузок принципиальна корректная интеграция этих требований в проект: от расчетов энергопотребления и водопользования до сценариев резервирования и обеспечения безопасности на стадии строительства и эксплуатации. В ряде юрисдикций вводятся дополнительные экологические критерии (водный след, уровень шума, требования к утилизации тепла), оказывающие прямое влияние на архитектуру объекта и календарные сроки реализации.

Зависимость ИИ-нагрузок от строительных ОTR носит причинно-следственный характер и проявляется на всех стадиях ЖЦ: от транспортной и ресурсной обеспеченности площадки до ремонтпригодности и модернизируемости инженерной инфраструктуры под последующие поколения аппаратных ускорителей. Для заказчика это выражается в снижении капитальных и эксплуатационных затрат, управляемости рисков и ускорении выхода вычислительных мощностей на рынок.

Современная научная литература последовательно демонстрирует, что экспоненциальный рост нагрузок, обусловленных применением ускорителей

для ИИ, приводит к пересборке базовой инженерной парадигмы ЦОД и переносит акцент с «классических» архитектур на решения, где теплотехника, электроснабжение и водопользование проектируются как взаимосвязанные элементы единого организационно-технологического контура строительства. Наиболее заметным является устойчивый дрейф от воздушного охлаждения к жидкостным и иммерсионным технологиям: обзоры и прикладные исследования фиксируют необходимость прямого отвода тепла с кристалла (direct-to-chip), внедрения теплообменных дверей заднего типа и одно-/двухфазной иммерсии как ответ на рост удельных тепловых нагрузок, а также как средство стабилизации режимов при высоких плотностях ИИ-стоек [1–6]. Показано, что такие схемы не только расширяют допустимые диапазоны эксплуатации, но и создают предпосылки к повторному использованию тепла, что важно для формирования целевых показателей эффективности на стадии предпроектной подготовки и увязки с градо- и природоохранными ограничениями [7, 8].

Параллельно возрастает значимость водного следа и водно-энергетических компромиссов, что напрямую влияет на выбор площадки и компоновку систем охлаждения. Исследования подчеркивают, что величина водопотребления варьирует в широких пределах в зависимости от климатических условий и выбранной технологии (адиабатические, «сухие» и гибридные решения), что требует учитывать метрики водной эффективности наравне с энергетическими [9–11]. В условиях жаркого засушливого климата оптимальные режимы охлаждения неизбежно сопряжены с компромиссами между снижением энергопотребления и ростом водопользования, а потому проектные решения должны включать объемно-балансовые расчеты, системы водоподготовки и подпитки, а также сценарии сезонной перенастройки режимов [10, 11]. Отмечается и влияние профиля рабочих нагрузок: ИИ-задачи, отличаясь по длительности и интенсивности использования ускорителей, формируют иной паттерн тепловыделения и, следовательно, меняют требования к водному контуру и алгоритмам его управления [11, 12].

Существенное внимание уделяется утилизации низкопотенциального тепла ЦОД и его интеграции в системы теплоснабжения. Серия работ показывает как инвестиционную состоятельность таких проектов, так и инженерные предпосылки их успешности: температурные графики сетей, применение тепловых насосов (включая каскадные решения), а также использование циклов органического Ренкина (ORC) для повышения термодинамического потенциала возвратного тепла [13–17]. Конструктивно-планировочные решения при этом должны предусматривать размещение насосно-теплообменных групп, транспортные коридоры для крупногабаритного оборудования, коррозионностойкие материалы и возможность обслуживания без останов-

ки критических зон — требования, которые необходимо закладывать на стадиях концепции и проекта, поскольку они определяют и архитектуру зданий, и календарные планы строительства [15–17].

Выбор площадки для строительства ЦОД, рассчитанных на ИИ-нагрузки, рассматривается как многокритериальная задача, в которой ключевыми становятся доступность и сроки технологического присоединения к электросетям, мезоклиматические характеристики территории, водный стресс, градостроительные и природоохранные режимы, а также геотехнические и гидрогеологические факторы. Показано, что даже внутри сравнительно компактных территорий мезоклимат может оказывать заметное влияние на энергопотребление через потенциально доступные режимы свободного и адиабатического охлаждения, что отражается на совокупной стоимости владения [17]. В городских агломерациях к этому добавляются риски непрерывности бизнеса и особенности локальной регуляторной среды, требующие от девелопера раннего согласования инженерных интерфейсов и логистики строительства [14]. Геопространственные модели пригодности (GIS/MCDA) подтверждают возможность формализованной оценки «окна возможностей» площадки — от близости источников и подстанций до транспортной доступности и санитарно-защитных зон — и служат основой для обоснования организационно-технологических решений уже на предынвестиционной фазе [18–23].

Отдельный пласт исследований посвящен взаимодействию ЦОД с энергосистемой в условиях высоких и динамичных нагрузок, свойственных ИИ-кластеру. Представлены модели распределения мощности и эмуляторы, учитывающие работу мощной силовой электроники (ИБП, выпрямители, преобразователи) и переходные процессы, что позволяет планировать конфигурации резервирования (N+1/2N), обеспечивать селективность защиты и качество электроэнергии на шинах критической нагрузки [19–20]. Для строительной практики это означает необходимость корректного задания трасс и сечений шинопроводов, параметров заземления и оперативной надежности распределительного устройства (РУ), а также включения в программы пусконаладочных работ сценариев, имитирующих реальные профили ИИ-нагрузок и сопутствующие гармонические искажения.

Интенсивно развивается направление алгоритмического управления охлаждением и сопутствующей метрологией эффективности. Систематизации стратегий оптимизационного управления, предложенные в профильной литературе, опираются на расширенные наборы метрик, включающие не только традиционные показатели энергетической эффективности, но и индикаторы повторного использования энергии и водной эффективности; подчеркивается важность настройки систем автоматизации и датчиковых подсистем под климатические и техно-

логические сценарии конкретной площадки [21, 22]. Это подтверждает тезис о необходимости «инженерной управляемости» проектируемых систем с момента закладки их в строительную документацию, включая требования к резервированию, байпасированию и секционированию коллекторов для поддержания ремонтпригодности без деградации вычислительной готовности объекта.

Наконец, на уровне узлов и компоновки демонстрируется потенциал инженерных инноваций, направленных на снижение суммарного термического сопротивления между источниками тепла и контуром его отвода: от конструкций с теплоотводящими «спинками» до оптимизации гидравлических режимов и контактных поверхностей в блоках распределения охлаждающей жидкости [8]. В сочетании с практикой внедрения direct-to-chip и иммерсионных решений это подводит к важному организационно-технологическому выводу: архитектура AI-ready ЦОД требует не только выбора принципиальной схемы охлаждения и электроснабжения, но и проектирования маршрутов монтажа, секций для обслуживания, а также широкого применения модульности и изделий заводской готовности в составе MEP-подсистем (Mechanical, Electrical, and Plumbing) для снижения рисков пусконаладки и сокращения времени до ввода расчетных вычислительных мощностей [3, 4, 6, 7].

Суммарно проанализированное поле источников позволяет заключить, что «готовность к ИИ» является интегральной характеристикой строительного проекта ЦОД, возникающей из согласованности решений по теплотехнике, электроснабжению, водопользованию и тепловой интеграции с городской инфраструктурой. Научные результаты последних лет предоставляют методическую основу для перевода технологических требований ИИ в инженерно-строительные регламенты и календарные планы: через ранний многокритериальный выбор площадки, нормирование целевых показателей эффективности, формирование программ испытаний и эксплуатационных режимов, а также закрепление модульности и префабрикации как базовых организационно-технологических принципов реализации проекта [1–23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научная работа носит комплексный подход и опирается на данные в формате конвергентного аналитического обзора с нормативной верификацией и проектно-технологической декомпозицией. В исследовании рассматривались научные работы, содержащие инженерные параметры и методики расчета, а также документы стандартов и руководства, релевантные строительным решениям. Исключались работы сугубо информационно-технологического профиля без инфраструктурной компоненты,

непроверяемые обзоры и дублирующие публикации.

Из каждого источника извлекались характеристики контекста:

- климат;
- технология;
- количественные показатели (тепловые/гидравлические/электрические параметры).

Далее проводилось тематическое кодирование по пяти критериям:

1. Охлаждение и теплосъем.
2. Электроснабжение и качество электроэнергии.
3. Водопользование и экологические ограничения.
4. Выбор площадки, компоновка и логистика.
5. Регуляtorика и метрики эффективности.

Синтез осуществлялся через логико-структурное сопоставление «требование ИИ → строительное решение → проверяемый параметр», с построением схемы «риск → мероприятие → КРІ → метод приемки» и матрицы соответствия стандартам.

Верификация заключалась в перекрестной проверке выводов по независимым источникам и в согласовании проектных параметров с нормируемыми допусками и процедурами испытаний, описанными в стандартах. Ограничения подхода связаны с ограниченной доступностью полноформатных эксплуатационных данных по иммерсионным системам, неоднородностью описаний решений и вариативностью национальной нормативной базы. Тем не менее выбранная методика обеспечивает воспроизводимую трассируемость от литературных данных к формализованным строительным решениям и контрольным процедурам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ подтверждает, что «готовность к ИИ» является не производной от выбора серверов и ускорителей, а интегральным свойством строительного проекта ЦОД. На практике профиль требований формируется задолго до поставки ИТ-оборудования — через решения о схеме теплосъема и электроснабжения, водной инфраструктуре, компоновке, резервировании и сценариях пусконаладочных работ. Сопоставление выявленных в литературе тенденций с реализуемыми проектами показывает разрыв между текущей практикой и целевой моделью: многие объекты все еще проектируются в парадигме «воздух по умолчанию» с поздним добавлением жидкостных контуров и локальных усилений по электропитанию, тогда как требуемая для ИИ архитектура должна предполагать жидкостное охлаждение как базовую предпосылку и учитывать динамику мощной силовой электроники уже на концептуальной стадии.

В части требований наибольшее расхождение наблюдается в области теплосъема и электрообеспе-

чения. Распространенная практика — корректировка схем охлаждения на стадии рабочей документации (РД) или даже в процессе строительства — ограничивает компоновку, повышает нагрузку на конструктив и усложняет сервис. Целевая конфигурация, напротив, требует раннего решения в пользу direct-to-chip и/или иммерсионных схем с резервированием по секциям, с предусмотренными коллекторными группами, байпасированием, местами под CDU (Coolant Distribution Unit) и тепловыми насосами, а также с возможностью безостановочного обслуживания. Электроснабжение должно проектироваться не только с резервированием N+1/2N, но и с подтвержденной устойчивостью к переходным процессам и гармоническим искажениям, характерным для ИИ-кластеров; это требует расчетов и полевых испытаний, имитирующих реальные профили нагрузок. Водно-химические параметры теплоносителя и водный баланс — самостоятельные ограничители: проект обязан содержать объемно-балансовые расчеты, требования к качеству воды, сезонные режимы и сценарии подпитки, а также предусматривать утилизацию низкопотенциального тепла как часть проектного задания, а не факультативную опцию. Организационно-технологически означает приоритизацию модульности и изделий заводской готовности (prefab) в МЕР-подсистемах, каскадный ввод мощностей и цифровые управляемые пусконаладочные работы (ПНР) с термическими и электрическими стресс-прогонами.

Профиль рисков подтверждает необходимость перехода от разрозненного управления к интегрированной карте рисков. Традиционно энергетические риски закрываются резервированием и «запасами» по мощности, теплотехнические — повышением производительности охладителей, водные — локальными резервуарами, а регуляторные — корректировками на стадии экспертизы. Такой подход не обеспечивает воспроизводимости результатов в ИИ-кластерах. Целевая практика должна связывать каждый риск с конкретным проектным мероприятием, измеримым показателем и методикой приемочного испытания: для электроснабжения — подтверждение селективности и качества электроэнергии при «ИИ-профилях»; для теплотехники — секционирование и гидравлическое развязывание контуров с возможностью изолированного обслуживания, вибро- и шумозащита насосных станций, контроль коррозии и чистоты теплообменных поверхностей; для водопользования — сценарный баланс с КРІ WUE, технологические схемы подготовки и дозирования; для площадки — GIS/MCDA-оценка мезоклимата, гидрогеологии и природных опасностей с переносом ограничений в планировочные решения и календарные графики. Результативность такого подхода возрастает при использовании цифрового двойника строительства, обеспечивающего трассируемость от исходных ограничений до актов ПНР.

Матрица нормативного соответствия

Требование/источник	Проектный параметр/ раздел	Целевое значение/ допуск	Метод проверки/ испытания	Критерий приемки	Ответственный	Стадия
EN 50600 (класс доступности, электроснабжение)	Резервирование ИБП/дизель-генераторной установки (ДГУ), конфигурация шинпроводов и РУ	Архитектура N+1 или 2N; класс доступности — целевой (установить в техническом задании (ТЗ))	FAT (Factory Acceptance Test)/SAT (Site Acceptance Test) ИБП/ДГУ; IST (Intelligent Stress Testing) с имитацией ИИ-профиля нагрузки	Работа в целевом классе без потери нагрузки при отказе одного элемента	Генпроектировщик, подрядчик МЕР, ПНР-организация	Проектирование (П), рабочая документация (РД), ПНР
ASHRAE TC 9.9 (жидкостное/иммерсионное охлаждение)	Температура/давление/качество теплоносителя, узлы CDU/коллекторы	Температурный класс систем; допуски по давлению и химсоставу (по ТЗ)	Гидроиспытания; термостресс-прогон с имитацией тепловыделения	Поддержание параметров в допусках при $\geq 75\%$ ИТ-нагрузки без утечек	Подрядчик МЕР, ПНР-организация	РД, строительство, ПНР
ISO/IEC 30134-2 (PUE)	Энергоэффективность по подсистемам (охлаждение, распределение)	Проектный бюджет PUE (целевое значение — установить)	IST; замер мощности ИТ и вспомогательных систем при стабильной нагрузке	Расчетный/измеренный PUE \leq проектного бюджета	Генпроектировщик, эксплуатация, ПНР	П, РД, ПНР, ввод
ISO/IEC 30134-9 (WUE)	Водный баланс (подпитка, испарение, продувка, сброс)	Проектный бюджет WUE (целевое значение — установить)	Балансовые измерения; журналы подпитки/сбросов; сезонные режимы	Измеренный WUE \leq проектного бюджета при заданных условиях	Генпроектировщик, эколог, эксплуатация	П, РД, ПНР, ввод
ISO/IEC 30134-6/7 (ERE/ERF — повторное использование энергии)	Интерфейсы утилизации тепла: тепловой насос (ТН)/теплогенератор (Т)/охладитель (О), подключение к тепловой сети (ТС)/центральному тепловому пункту (ЦТП)	Проектные бюджеты ERE/ERF (целевые значения — установить)	Тепловой баланс; нагрузочные испытания тепловых насосов/обменников	Достижение целевых ERE/ERF в расчетных режимах	Подрядчик МЕР, генпроектировщик, теплосеть	П, РД, ПНР
Качество электроэнергии (ГОСТ/IEC, требования сетевой организации)	Параметры качества: THD (Total Harmonic Distortion), просадки/перенапряжения, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтров	В пределах норм ГОСТ/IEC и условий технологического присоединения (ТП)	Измерения логгерами PQ (Performance Qualification) в IST (Intelligent Stress Testing) с «ИИ-профилями» нагрузки	Показатели PQ в допусках при номинальной/переходной работе	Электроподрядчик, ПНР, сетевая организация	РД, ПНР, ввод
Экологические нормы (шум, сбросы, водопользование)	Акустика насосных/ДГУ; параметры сброса; водопользование	Градостроительные и природоохранные лимиты (по разрешительной документации)	Акустические замеры; протоколы водоанализа; журналы баланса	Соответствие лимитам и условиям спецразрешений	Эколог, подрядчик МЕР, генподрядчик	П, РД, ПНР, ввод
Выбор площадки (GIS/MCDA, градостроительные регламенты)	Энергетическая/водная обеспеченность, мезоклимат, логистика	Минимальные пороги пригодности (по матрице весов MCDA)	Отчет GIS/MCDA; согласования с сетями; теусловия	Достижение порогов и наличие технических условий (ТУ)/согласлений	Девелопер, генпроектировщик	Предынвестиционная, П

Регуляторная составляющая остается критически важной и в значительной степени определяет исполнимость проектных решений. Наблюдается тенденция формального упоминания EN 50600, рекомендаций ASHRAE TC 9.9 и метрик ISO/IEC 30134 (PUE, WUE, ERE/ERF) без их прямой трансляции в параметры проекта, допуски, спецификации материалов и процедуры испытаний. Доказательная практика требует иного: матрицы соответствия, в которой каждое требование стандарта связано с конкретным параметром раздела «Проект», контролируемым допуском, методикой проверки и документом приемки. Внутри этой матрицы KPI перестают быть «эксплуатационными отчетными цифрами» и становятся проектными бюджетами, распределенными по системам: допускаемая гидравлическая потеря на участок, тепловой бюджет на узел, классы доступности и режимы резервирования на электрических шинах. Экологические критерии — шум, сбросы, тепловой след — переносятся в разряд проектных ограничений, влияющих на компоновку, материалы и сроки.

Прогноз на ближайшие пять лет указывает на консолидацию жидкостных и иммерсионных технологий как отраслевого стандарта для высокоплотных ИИ-нагрузок и на формирование совместимых интерфейсов узлов (коллекторы, фитинги, материалы), что упростит проектирование и монтаж. Водные и тепловые показатели эффективности будут институционализированы в заданиях на проектирование, а утилизация тепла становится условием согласований в городских и кампусных проектах. Масштабы префабрикации возрастут, что сократит time-to-compute и снизит риски ПНР; цифровые двойники строительства станут нормой для управления соответствием и рисками. Ожидается ужесточение экологических требований и смещение географии проектов в пользу территорий с благоприятным мезоклиматом, доступной мощностью присоединения и водными ресурсами; параллельно усилится запрос сетевых организаций на предиктивные модели спроса и полевые испытания с «ИИ-профилями» нагрузки. В совокупности это закрепит за строительной отраслью роль координатора, превращающего инженерные и регуляторные требования в реализуемые компоновочные и технологические решения.

Суммируя, результаты исследования демонстрируют, что достижение целевых показателей ИИ-ЦОД — по плотности, энерго- и водной эффективности, ремонтпригодности и срокам ввода — определяется качеством организационно-технологической модели строительства. Эффективная модель включает ранний выбор и «запирание» схем охлаждения и утилизации тепла с отражением в конструктиве, формализованную карту рисков и матрицу нормативного соответствия, бюджеты KPI на этапе проектирования, план префабрикации и каскадного ввода мощностей, а также программу ПНР, воспроиз-

изводящую реальные режимы ИИ-нагрузок. Такое построение обеспечивает причинно-следственную связь между решениями на площадке и эксплуатационной готовностью ЦОД, снижает совокупный риск и ускоряет достижение проектной вычислительной мощности. В рамках исследования была сформирована матрица, представленная в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило исходный тезис о том, что «готовность к ИИ» является интегральным свойством строительного проекта ЦОД и формируется на стадии организационно-технологических решений. Сопоставление современных разработок по теплотехнике, электроснабжению, водопользованию и тепловой интеграции с практикой проектирования и строительства показывает: устойчивое и эффективное размещение высокоплотных ИИ-кластеров определяется не выбором вычислительных стоек, а согласованностью решений по выбору площадки, архитектурно-планировочной компоновке, конфигурации систем охлаждения и электропитания, организации пусконаладочных работ и управлению жизненным циклом.

С точки зрения требований целевая архитектура AI-ready предполагает принятие жидкостного охлаждения как решения «по умолчанию» с заранее предусмотренной эволюцией к иммерсионным технологиям, подтвержденную устойчивость электропитания к переходным процессам и гармоническим искажениям, а также полноценную постановку водных и тепловых KPI наравне с энергетическими. Концепция строительства должна включать утилизацию низкопотенциального тепла и интерфейсы с внешними тепловыми сетями, модульность и префабрикацию MEP-подсистем, каскадный ввод мощностей и программируемые стресс-испытания, воспроизводящие профиль ИИ-нагрузок. В такой постановке строительные решения приобретают статус первичных детерминант эксплуатационных показателей — от PUE/WUE/ERE до ремонтпригодности.

Анализ рисков показал ограниченность разрозненных подходов и необходимость перехода к единой управленческой схеме, где каждому риску сопоставлены проектное мероприятие, измеримый показатель и процедура приемочного контроля. Практическим инструментом выступает «карта рисков» и связанная с ней матрица нормативного соответствия, обеспечивающие трассируемость от исходных ограничений площадки и сетевой инфраструктуры до актов ПНР. Включение GIS/MCDA-оценки мезоклимата, гидрогеологии и регуляторных режимов на предынвестиционной стадии позволяет транслировать внешние ограничения в планировочные решения и календарные графики, снижая вероятность поздних изменений и технологических коллизий.

Регуляторный контур требует операционализации: международные руководства (EN 50600, ре-

комендации ASHRAE TC 9.9, серия ISO/IEC 30134) должны переводиться из декларативных ссылок в проектные параметры с явными допусками, методиками испытаний и критериями приемки. Экологические требования — шум, сбросы, водный след, повторное использование энергии — целесообразно закреплять на уровне исходно-разрешительной документации, чтобы их влияние на компоновку, материалы и сроки было учтено до заключения контракта поставки длинноциклового оборудования. Такая институционализация делает проверяемыми как целевые KPI, так и предельные условия эксплуатации для высокоплотных ИИ-кластеров.

Ожидаемые отраслевые тенденции на горизонте ближайших пяти лет указывают на консолидацию жидкостных и иммерсионных технологий, рост доли изделий заводской готовности, повсеместное внедрение цифровых двойников строительства и эксплуатации, институционализацию водных и тепловых показателей эффективности и расширение практик полезного использования тепла. Параллельно усилится интеграция ЦОД с энергосистемой посредством предиктивного планирования нагрузок и полевых испытаний, а география проектов сместится в пользу площадок с благоприятным мезоклиматом, доступной мощностью присоединения и устойчивыми водными ресурсами. Эти сдвиги

закрепят за строительной отраслью роль координатора, обеспечивающего согласование инженерных, экологических и регуляторных требований в реализуемые компоновочные и технологические решения.

Ограничения исследования связаны с ограниченным объемом открытых эксплуатационных данных по длительной работе иммерсионных систем, неоднородностью нормативной базы в разных юрисдикциях и быстрым технологическим циклом аппаратных ускорителей. Дальнейшие исследования видятся в стандартизации узлов и интерфейсов жидкостных и иммерсионных систем на строительном уровне, в разработке унифицированных программ стресс-испытаний с типовыми «ИИ-профилями», в ко-оптимизации энерго- и водной эффективности с учетом мезоклимата и в накоплении эмпирики по экономике утилизации тепла в различных городских и кампусных сценариях.

В совокупности полученные результаты формируют целостную организационно-технологическую рамку проектирования и строительства AI-ready ЦОД. Ее применение позволяет уменьшить совокупный риск, обеспечить воспроизводимость требуемых эксплуатационных показателей и ускорить достижение проектной вычислительной мощности, а значит — превратить ИИ-требования из источника ограничений в управляемые параметры строительного решения.

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Роман Олегович Самсонов — доктор технических наук, профессор, научный руководитель лаборатории организационно-технологических систем использования искусственного интеллекта в строительстве (ОТС); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SamsonovRO@mgsu.ru;

Виктор Станиславович Лоткин — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; victorlotkin@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The rapid spread of applied and generative artificial intelligence (AI) technologies has significantly transformed the requirements for data centres. Unlike traditional computing complexes, AI clusters are characterized by high computing load density, increased sensitivity to temperature and electrical conditions, and strict requirements for fault tolerance and scalability. These properties are determined not only by the choice of IT equipment, but above all by the architecture and quality of organizational and technological solutions in

construction (OTS) at the pre-investment and design and construction stages of the facility's life cycle (LC). Consequently, the ability of a data centre to reliably and efficiently serve AI loads is a function of correctly adopted and consistently implemented construction solutions.

A key feature of AI-ready data centres is the change in limiting factors. While traditional design was dominated by the geometry of machine rooms and air-cooling capabilities, for AI clusters, the available electrical connection power, thermal load and required heat removal modes become decisive. This predetermines the transition to liquid cooling technologies (including direct-to-chip and

rear-type heat exchange doors) and immersion systems, as well as the development of low-potential heat utilization through heat pumps and connections to heat supply systems. The corresponding solutions have direct construction implications: requirements for structural elements (load-bearing capacity of floors, foundations, input nodes), layout (technological heights, piping and busbar routing), vibration and noise protection for pump units, corrosion resistance of materials, and installation technology for cooling and water treatment circuits.

The selection of a site and the standardization of a project under AI loads are becoming multi-criteria in nature, with the construction industry playing a decisive role. Priority factors include: terms and conditions for technological connection to electrical grids, availability and quality of water resources, mesoclimatic parameters (affecting free and adiabatic cooling modes), environmental and urban planning restrictions, as well as geotechnical and hydrogeological risks. The decisions made at this stage determine the target efficiency indicators — power usage effectiveness (PUE), water usage efficiency (WUE), energy reuse (ERE/ERF) indicators — and critically affect the time-to-compute indicator, i.e. the time required to achieve the design computing power. Practice shows the effectiveness of modularity, the use of factory-ready products and units, early ordering of long-cycle equipment (transformers, switchgear, UPS, heat exchange and pump units) and cascaded power input.

The organizational and technological framework for the construction of an AI-oriented data centre must ensure the consistent translation of technological requirements into engineering and construction regulations and procedures.

Power supply and backup. Formation of N+1/2N configurations for uninterruptible power supplies and diesel generator sets, ensuring selectivity of protection and power quality in the presence of powerful power electronics, taking into account harmonics and transient processes.

Cooling and heat removal systems. Design of liquid circuits (including coolant distribution units, manifold groups and bypass lines), standardization of heat transfer fluid parameters (temperature, pressure, chemical composition), ensuring fault tolerance and maintainability without stopping critical areas, preparation for the use of immersion technologies.

Water treatment and environmental modes. Performing volume balance calculations, organizing treatment and feed systems, complying with discharge and water footprint monitoring requirements, and including relevant measures in the permitting documentation.

Architectural and planning solutions. Ensuring load-bearing capacity for high point loads of rack rows and immersion baths, forming technological spaces and shafts for transporting large-sized equipment, separating “clean” and “dirty” installation areas.

Commissioning and start-up. Development of step-by-step thermal and electrical testing programmes,

stress testing, use of digital checklists and defect traceability systems, use of information modelling to coordinate engineering systems and installation logistics.

The regulatory and technical context is of significant importance. International and national standards (e.g., EN 50600 on the design and operation of data centres; ASHRAE TC 9.9 recommendations on temperature classes for liquid cooling; ISO/IEC 30134 series on key performance indicators: PUE, WUE, ERE/ERF) set out the framework requirements for the quality of design and construction solutions. For AI loads, it is essential that these requirements are correctly integrated into the design: from energy consumption and water use calculations to redundancy and security scenarios during construction and operation. A number of jurisdictions are introducing additional environmental criteria (water footprint, noise levels, heat utilization requirements) that have a direct impact on the architecture of the facility and the implementation schedule.

The dependence of AI loads on construction OTS solutions is causal in nature and manifests itself at all stages of the life cycle: from transport and resource provision for the site to the maintainability and upgradability of the engineering infrastructure for subsequent generations of hardware accelerators. For the customer, this translates into lower capital and operating costs, risk management, and accelerated market entry for computing power.

Contemporary scientific literature consistently demonstrates that the exponential growth in loads caused by the use of accelerators for AI is leading to a rethinking of the basic engineering paradigm of data centres and shifting the focus from “classical” architectures to solutions where heating, power supply and water use are designed as interconnected elements of a single organizational and technological construction circuit. The most noticeable trend is a steady shift from air cooling to liquid and immersion technologies: reviews and applied research highlight the need for direct-to-chip heat removal, the introduction of rear-type heat exchange doors and single/two-phase immersion as a response to the growth in specific heat loads, as well as a means of stabilizing operating modes at high AI rack densities [1–6]. It has been shown that such schemes not only expand the permissible operating ranges, but also create the conditions for heat reuse, which is important for setting performance targets at the pre-design stage and coordinating with urban and environmental restrictions [7, 8].

At the same time, the importance of water footprint and water-energy trade-offs is increasing, which directly affects the choice of site and the layout of cooling systems. Studies emphasize that water consumption varies widely depending on climatic conditions and the technology chosen (adiabatic, “dry” and hybrid solutions), which requires water efficiency metrics to be taken into account alongside energy metrics [9–11]. In hot, arid climates, optimal cooling modes inevitably

involve compromises between reducing energy consumption and increasing water use, and therefore design solutions must include volume balance calculations, water treatment and replenishment systems, as well as scenarios for seasonal mode adjustments [10, 11]. The influence of the workload profile is also noted: AI tasks, differing in the duration and intensity of accelerator use, form a different heat dissipation pattern and, consequently, change the requirements for the water circuit and its control algorithms [11, 12].

Significant attention is paid to the utilization of low-potential heat from data centres and its integration into heating systems. A series of studies demonstrates both the investment viability of such projects and the engineering prerequisites for their success: temperature graphs of networks, the use of heat pumps (including cascade solutions), and the use of organic Rankine cycles (ORC) to increase the thermodynamic potential of return heat [13–17]. Design and planning solutions must provide for the placement of pump-heat exchange units, transport corridors for large-sized equipment, corrosion-resistant materials, and the possibility of servicing critical areas without shutdown — requirements that must be laid down at the concept and design stages, as they determine both the architecture of buildings and construction schedules [15–17].

The selection of a site for the construction of data centres designed for AI loads is considered a multi-criteria task, in which the key factors are the availability and timing of technological connection to power grids, mesoclimate characteristics of the territory, water stress, urban planning and environmental protection regimes, as well as geotechnical and hydrogeological factors. It has been shown that even within relatively compact areas, the mesoclimate can have a significant impact on energy consumption through potentially available free and adiabatic cooling modes, which affects the total cost of ownership [17]. In urban agglomerations, this is compounded by business continuity risks and the peculiarities of the local regulatory environment, which require developers to agree on engineering interfaces and construction logistics at an early stage [14]. Geospatial suitability models (GIS/MCDA) confirm the possibility of a formalized assessment of a site's "window of opportunity" — from proximity to sources and substations to transport accessibility and sanitary protection zones — and serve as the basis for justifying OTS decisions as early as the pre-investment phase [18–23].

A separate area of research is devoted to the interaction of data centres with the power grid under high and dynamic loads characteristic of AI clusters. Power distribution models and emulators are presented that take into account the operation of powerful power electronics (UPS, rectifiers, converters) and transient processes, which allows planning backup configurations (N+1/2N), ensuring selective protection and power quality on critical load buses [19, 20]. For construction practice, this means the need to correctly specify busbar routes and

cross-sections, grounding parameters and operational reliability of switchgear, as well as to include scenarios in commissioning programmes that simulate real AI load profiles and associated harmonic distortions.

The field of algorithmic cooling control and related efficiency metrology is developing rapidly. The systematization of optimization control strategies proposed in the relevant literature is based on extended sets of metrics that include not only traditional energy efficiency indicators, but also indicators of energy reuse and water efficiency. The importance of configuring automation systems and sensor subsystems for the climatic and technological scenarios of a specific site is emphasized [21, 22]. This confirms the thesis of the need for "engineering controllability" of the designed systems from the moment they are included in the construction documentation, including requirements for redundancy, bypassing and sectioning of manifolds to maintain maintainability without degrading the computational readiness of the facility.

Finally, at the node and layout level, the potential of engineering innovations aimed at reducing the total thermal resistance between heat sources and the heat removal circuit is demonstrated: from designs with heat-dissipating "backs" to the optimization of hydraulic modes and contact surfaces in coolant distribution blocks [8]. Combined with the practice of implementing direct-to-chip and immersion solutions, this leads to an important organizational and technological conclusion: AI-ready data centre architecture requires not only the selection of a basic cooling and power supply scheme, but also the design of installation routes, maintenance sections, and the widespread use of modularity and factory-ready products in MEP subsystems to reduce commissioning risks and shorten the time to achieve design computing power [3, 4, 6, 7].

A comprehensive analysis of the sources allows us to conclude that "AI readiness" is an integral characteristic of a data centre construction project, arising from the coordination of decisions on heating, power supply, water use and thermal integration with urban infrastructure. Scientific results from recent years provide a methodological basis for translating AI technological requirements into engineering and construction regulations and schedules: through early multi-criteria site selection, standardization of target performance indicators, development of testing programmes and operating modes, and the establishment of modularity and prefabrication as basic organizational and technological principles for project implementation [1–23].

MATERIALS AND METHODS

The scientific work takes a comprehensive approach and is based on data in the format of a convergent analytical review with normative verification and design and technological decomposition. The study considered scientific works containing engineering parameters and calculation methods, as well as standard documents and

guidelines relevant to construction solutions. Works of a purely informational and technological nature without an infrastructure component, unverifiable reviews and duplicate publications were excluded.

Contextual characteristics were extracted from each source:

- climate;
- technology;
- quantitative indicators (thermal/hydraulic/electrical parameters).

Thematic coding was then carried out according to five criteria:

1. Cooling and heat removal.
2. Power supply and power quality.
3. Water use and environmental constraints.
4. Site selection, layout and logistics.
5. Regulations and performance metrics.

The synthesis was carried out through a logical and structural comparison of “AI requirement → construction solution → verifiable parameter”, with the creation of a “risk → measure → KPI → acceptance method” diagram and a standards compliance matrix.

Verification consisted of cross-checking conclusions against independent sources and aligning design parameters with the standardized tolerances and testing procedures described in the standards. The limitations of the approach are related to the limited availability of full-format operational data on immersion systems, the heterogeneity of solution descriptions, and the variability of the national regulatory framework. Nevertheless, the chosen methodology provides reproducible traceability from literature data to formalized construction solutions and control procedures.

RESEARCH RESULTS

The analysis confirms that “AI readiness” is not derived from the choice of servers and accelerators, but is an integral property of the data centre construction project. In practice, the requirements profile is formed long before the IT equipment is delivered — through decisions on heat removal and power supply schemes, water infrastructure, layout, redundancy, and commissioning scenarios. A comparison of the trends identified in the literature with actual projects reveals a gap between current practice and the target model: many facilities are still designed in the “air by default” paradigm with the late addition of liquid circuits and local power supply amplifications, whereas the architecture required for AI should assume liquid cooling as a basic prerequisite and take into account the dynamics of powerful power electronics already at the conceptual stage.

In terms of requirements, the greatest discrepancy is observed in the areas of heat removal and power supply. The common practice of adjusting cooling schemes at the design stage or even during construction limits the layout, increases the load on the structure, and complicates servicing. The target configuration, on the contrary, requires an early decision in favour of direct-to-chip and/or immersion circuits with sec-

onditional redundancy, with provision for collector groups, bypassing, space for CDU and heat pumps, as well as the possibility of non-stop maintenance. The power supply must be designed not only with N+1/2N redundancy, but also with proven resistance to transient processes and harmonic distortions characteristic of AI clusters; this requires calculations and field tests simulating real load profiles. The water-chemical parameters of the coolant and the water balance are independent constraints: the design must include volume balance calculations, water quality requirements, seasonal modes and make-up scenarios, and provide for the utilization of low-potential heat as part of the design brief, rather than an optional extra. In organizational and technological terms, this means prioritizing modularity and prefabricated products in MEP subsystems, cascaded commissioning of capacities, and digitally controlled CW with thermal and electrical stress tests.

The risk profile confirms the need to move from fragmented management to an integrated risk map. Traditionally, energy risks are covered by reserves and capacity “stocks”, thermal risks by overestimating the performance of coolers, water risks by local reservoirs, and regulatory risks by adjustments at the examination stage. This approach does not ensure the reproducibility of results in AI clusters. Target practice should link each risk to a specific project activity, a measurable indicator, and an acceptance test methodology: for power supply — confirmation of the selectivity and quality of electricity in “AI profiles”; for heating engineering — sectioning and hydraulic decoupling of circuits with the possibility of isolated maintenance, vibration and noise protection of pumps, corrosion and cleanliness control of heat exchange surfaces; for water use — scenario balance with KPI WUE, technological schemes for preparation and dosing; for the site — GIS/MCDA assessment of mesoclimate, hydrogeology and natural hazards with the transfer of restrictions to planning decisions and schedules. The effectiveness of this approach increases when using a digital twin of the construction, which ensures traceability from the initial restrictions to the CW acts.

The regulatory component remains critically important and largely determines the feasibility of design solutions. There is a tendency to formally mention EN 50600, ASHRAE TC 9.9 recommendations, and ISO/IEC 30134 metrics (PUE, WUE, ERE/ERF) without directly translating them into project parameters, tolerances, material specifications, and testing procedures. Proven practice requires something else: a compliance matrix in which each standard requirement is linked to a specific parameter in the “Project” section, a controlled tolerance, a verification method, and an acceptance document. Within this matrix, KPI cease to be “operational reporting figures” and become project budgets distributed across systems: permissible hydraulic loss per section, thermal budget per node, availability classes and redundancy modes on electrical buses. Environmental criteria — noise, emissions, thermal

Regulatory compliance matrix

Requirement/source	Design parameter/section	Target value/tolerance	Verification/testing method	Acceptance criterion	Responsible	Stage
EN 50600 (accessibility class, power supply)	UPS/DGS reservation, busbar configuration and SG	N+1 or 2N architecture; availability class — target (to be specified in technical specifications)	FAT (Factory Acceptance Test)/ SAT (Site Acceptance Test) UPS/DGS; IST (Intelligent Stress Testing) with AI load profile simulation	Working in a target class without loss of load when one element fails	General designer, MEP contractor, CW organization	Planning (P), WD, CW
ASHRAE TC 9.9 (liquid/immersion cooling)	Temperature/pressure/quality of heat transfer fluid, CDU units/collectors	Temperature class of systems; tolerances for pressure and chemical composition (according to technical specifications)	Hydrostatic testing; thermal stress run with simulated heat release	Maintaining parameters within tolerances at $\geq 75\%$ IT load without leaks	MEP contractor, CW organization	WD, Construction, CW
ISO/IEC 30134-2 (PUE)	Energy efficiency by subsystem (cooling, distribution)	Project budget PUE (target value — to be set)	IST; measurement of IT and auxiliary systems power consumption under stable load	Estimated/measured PUE \leq design budget	Chief designer, operation, CW	P, WD, CW, input
ISO/IEC 30134-9 (WUE)	Water balance (replenishment, evaporation, blowdown, discharge)	WUE project budget (target value — to be set)	Balance measurements; feed/discharge logs; seasonal modes	Measured WUE \leq design budget under specified conditions	Chief designer, environmentalist, operations	P, WD, CW, input
ISO/IEC 30134 6/7 (ERE/ERF — energy reuse)	Heat utilization interfaces heat pump (HP)/heat exchanger (HE)/cooler (C), connection to the Heating network (HN)/central heating substation (CHS)	ERE/ERF project budgets (target values — to be set)	Heat balance; load testing of heat pumps/exchangers	Achievement of target ERE/ERF in design modes	MEP contractor, general designer, heating network	P, WD, CW
Power quality (GOST/IEC, network organization requirements)	Quality parameters: THD (Total Harmonic Distortion), sag/overvoltage, amplitude-frequency response (AFR) of filters	Within the limits of GOST/IEC standards and connection conditions (TC)	Measurements by PQ loggers in IST with load “AI profiles”	PQ indicators within tolerances at nominal/transient operation	Electrical contractor, CW, network organization	WD, CW, input
Environmental standards (noise, discharges, water use)	Acoustics of pumps/diesel generator sets; discharge parameters; water use	Urban and nature conservation limits (according to permits)	Acoustic measurements; water analysis reports; balance logs	Compliance with limits and conditions of special permits	Environmentalist, MEP contractor; general contractor	P, WD, CW, input
Site selection (GIS/MCDA, urban planning regulations)	Energy/water supply, mesoclimate, logistics	Minimum suitability thresholds (based on the MCDA weight matrix)	GIS/MCDA report; network approvals; technical conditions	Achievement of thresholds and availability of technical specifications (TS)/agreements	Developer, general designer	Pre-investment, P

footprint — are transferred to the category of design constraints that affect layout, materials, and deadlines.

The forecast for the next five years points to the consolidation of liquid and immersion technologies as the industry standard for high-density AI loads and the formation of compatible node interfaces (manifolds, fittings, materials), which will simplify design and installation. Water and thermal efficiency metrics will be institutionalized in design specifications, and heat recovery will become a condition for approval in urban and campus projects. The scale of prefabrication will increase, reducing time-to-compute and mitigating CW risks; digital twins of construction will become the norm for compliance and risk management. Environmental requirements are expected to become more stringent and the geography of projects will shift in favour of areas with a favourable mesoclimate, accessible connection capacity and water resources; at the same time, network organizations will increase their demand for predictive demand models and field tests with AI load profiles. Taken together, this will cement the construction industry's role as a coordinator, transforming engineering and regulatory requirements into feasible layout and technological solutions.

In summary, the results of the study demonstrate that achieving the target indicators for AI-data centres — in terms of density, energy and water efficiency, maintainability and commissioning times — is determined by the quality of the organizational and technological model of construction. An effective model includes early selection and “locking in” of cooling and heat recovery schemes reflected in the design, a formalized risk map and regulatory compliance matrix, KPI budgets at the design stage, a prefabrication and cascading capacity commissioning plan, and a CW programme that reproduces real AI load modes. This structure provides a cause-and-effect relationship between on-site decisions and data centre operational readiness, reduces overall risk, and accelerates the achievement of design computing power. As part of the study, a matrix was formed, which is presented in the Table.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The study confirmed the initial thesis that “AI readiness” is an integral property of a data centre construction project and is formed at the stage of organizational and technological decisions. A comparison of modern developments in heating engineering, power supply, water use and thermal integration with design and construction practices shows that the sustainable and effective placement of high-density AI clusters is determined not by the choice of computer racks, but by the consistency of decisions on site selection, architectural and planning layout, configuration of cooling and power supply systems, organization of commissioning works and life cycle management.

In terms of requirements, the target AI-ready architecture assumes the adoption of liquid cooling as the default solution with a pre-planned evolution to immersion technologies, confirmed power supply stability

against transient processes and harmonic distortions, as well as full-fledged water and heat KPI on par with energy KPI. The construction concept should include the utilization of low-potential heat and interfaces with external heating networks, modularity and prefabrication of MEP subsystems, cascaded power input, and programmable stress tests that reproduce the AI load profile. In this scenario, construction solutions become the primary determinants of operational performance indicators, from PUE/WUE/ERE to maintainability.

Risk analysis has revealed the limitations of fragmented approaches and the need to transition to a unified management scheme, where each risk is matched with a project activity, a measurable indicator, and an acceptance control procedure. A practical tool is the “risk map” and the associated regulatory compliance matrix, which ensure traceability from the initial site and network infrastructure constraints to the CW acts. The inclusion of GIS/MCDA assessments of mesoclimate, hydrogeology and regulatory regimes at the pre-investment stage allows external constraints to be translated into planning decisions and schedules, reducing the likelihood of late changes and technological conflicts.

The regulatory framework requires operationalization: international guidelines (EN 50600, ASHRAE TC 9.9 recommendations, ISO/IEC 30134 series) must be translated from declarative references into design parameters with explicit tolerances, test methods and acceptance criteria. Environmental requirements — noise, emissions, water footprint, energy reuse — should be enshrined in the initial permitting documentation so that their impact on layout, materials, and timelines is taken into account before contracts for long-cycle equipment are signed. Such institutionalization makes both target KPI and operating limits for high-density AI clusters verifiable.

Expected industry trends over the next five years point to the consolidation of liquid and immersion technologies, an increase in the share of factory-ready products, the widespread introduction of digital twins for construction and operation, the institutionalization of water and heat efficiency indicators, and the expansion of heat utilization practices. At the same time, the integration of data centres with the energy system will be strengthened through predictive load planning and field testing, and the geography of projects will shift in favour of sites with a favourable mesoclimate, accessible connection capacity and sustainable water resources. These shifts will cement the construction industry's role as a coordinator, ensuring that engineering, environmental, and regulatory requirements are aligned with the layout and technological solutions implemented.

The limitations of the study are related to the limited amount of publicly available operational data on the long-term operation of immersion systems, the heterogeneity of the regulatory framework in different jurisdictions, and the rapid technology cycle of hardware accelerators. Further research is envisaged in the standardization of components and interfaces of liquid and immersion systems at the construction level, in the development of unified

stress testing programmes with typical “AI profiles”, in the co-optimization of energy and water efficiency, taking into account the mesoclimate, and in the accumulation of empirical data on the economics of heat utilization in various urban and campus scenarios.

Taken together, the results form a comprehensive organizational and technological framework for the de-

sign and construction of AI-ready data centres. Its application makes it possible to reduce the overall risk, ensure the reproducibility of the required performance indicators, and accelerate the achievement of the design computing power, which means transforming AI requirements from a source of constraints into manageable parameters of the construction solution.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Azarifar M., Arik M., Chang J.Y. Liquid cooling of data centers: A necessity facing challenges. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 247:123112. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123112
2. Kong R., Zhang H., Tang M., Zou H., Tian C., Ding T. Enhancing data center cooling efficiency and ability: A comprehensive review of direct liquid cooling technologies. *Energy*. 2024; 308:132846. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132846
3. Mohammed N.M., El-Maghlany W.M., Elhelw M., Abdelaziz A.H. Performance improvement of high-density data center via two-phase liquid immersion cooling. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025; 150:6. DOI: 10.1007/s10973-025-14006-0
4. Zhang Y., Fan C., Li G. Discussions of Cold Plate Liquid Cooling Technology and Its Applications in Data Center Thermal Management. *Frontiers in Energy Research*. 2022; 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.954718
5. Chen H., Li D. Current Status and Challenges for Liquid-Cooled Data Centers. *Frontiers in Energy Research*. 2022; 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.952680
6. Haghshenas K., Setz B., Blosch Y., Aiello M. Enough hot air: the role of immersion cooling. *Energy Informatics*. 2023; 6(1). DOI: 10.1186/s42162-023-00269-0
7. Stahlhut M., Sekulla M., Großöhme P., Auweter A., Urbaneck T. Data Centers With Direct Liquid-Cooled Servers: Experimental Analysis and Modeling. *Energy Science & Engineering*. 2025; 13(7):3605-3619. DOI: 10.1002/ese3.70116
8. Lu Z., Di Y., Di H., Li X., Chen Z., Zhao C. et al. Optimization of data center thermal management performance under failure mode of rack-level heat pipe backplane system. *Building Simulation*. 2025; 18(6):1377-1392. DOI: 10.1007/s12273-025-1271-5
9. Mytton D. Data centre water consumption. *Npj Clean Water*. 2021; 4(1). DOI: 10.1038/s41545-021-00101-w
10. Karimi L., Yacuel L., Johnson J.D., Ashby J., Green M., Renner M. et al. Water-energy tradeoffs in data centers: A case study in hot-arid climates. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022; 181:106194. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106194
11. Lei N., Lu J., Shehabi A., Masanet E. The water use of data center workloads: A review and assessment of key determinants. *Resources, Conservation and Recycling*. 2025; 219:108310. DOI: 10.1016/j.resconrec.2025.108310
12. Karimi L., Shinh R., Laisure-Pool C., Green M., Yacuel L., Ashby J. et al. Energy and water dynamics in data center cooling: Insights from a modeling study in hot-arid climates. *Applied Thermal Engineering*. 2025; 276:126802. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126802
13. Pärssinen M., Wahlroos M., Manner J., Syri S. Waste heat from data centers: An investment analysis. *Sustainable Cities and Society*. 2019; 44:428-444. DOI: 10.1016/j.scs.2018.10.023
14. Antal M., Cioara T., Anghel I., Gorzenski R., Januszewski R., Oleksiak A. et al. Reuse of Data Center Waste Heat in Nearby Neighborhoods: A Neural Networks-Based Prediction Model. *Energies*. 2019; 12(5):814. DOI: 10.3390/en12050814
15. Sun J., Wang S., Wang J., Tolbert L.M. Dynamic Model and Converter-Based Emulator of a Data Center Power Distribution System. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022; 37(7):8420-8432. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3146354
16. Yuan X., Liang Y., Hu X., Xu Y., Chen Y., Kosonen R. Waste heat recoveries in data centers : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 188:113777. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113777
17. Khalid R., Wemhoff A.P., Khuc M., Nayar A.J., Schon S. Data Center Waste Heat Reuse: An Investment Analysis. *ASME Journal of Engineering for Sustainable Buildings and Cities*. 2025; 6(1). DOI: 10.1115/1.4067444
18. Gazzola V., Menoni S., Ghignatti P., Marini A., Mauri R., Oldani G. Analysis of Territorial Risks and Protection Factors for the Business Continuity of Data Centers. *Sustainability*. 2023; 15(7):6005. DOI: 10.3390/su15076005
19. Turek D., Radgen P. Optimized data center site selection — mesoclimatic effects on data center energy consumption and costs. *Energy Efficiency*. 2021; 14(3). DOI: 10.1007/s12053-021-09947-y
20. Radovanovic A., Chen B., Talukdar S., Roy B., Duarte A., Shahbazi M. Power Modeling for Effective Datacenter Planning and Compute Management. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2022; 13(2):1611-1621. DOI: 10.1109/TSG.2021.3125275
21. Corigliano O., Algieri A., Fragiaco P. Turning Data Center Waste Heat into Energy: A Guide to Organic Rankine Cycle System Design and Performance Evaluation. *Applied Sciences*. 2024; 14(14):6046. DOI: 10.3390/app14146046

22. Arzumanyan M., Calzado E.R., Lin N., Bahadur V., Das J., Ko T.L. et al. Geospatial suitability analysis for data center placement: A case study in Texas, USA. *Sustainable Cities and Society*. 2025; 131:106687. DOI: 10.1016/j.scs.2025.106687

23. Chang Q., Huang Y., Liu K., Xu X., Zhao Y., Pan S. Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Cooling Systems in Data Centers : a Review. *Sustainability*. 2024; 16(16):7222. DOI: 10.3390/su16167222

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S : **Roman O. Samsonov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Laboratory of Organizational and Technological Systems for the Use of Artificial Intelligence in Construction (OTS); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SamsonovRO@mgsu.ru;

Victor S. Lotkin — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; victorlotkin@yandex.ru.

Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.