



Музей Великого канала в Янчжоу

СОВРЕМЕННЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ МУЗЕЙНЫХ ЗДАНИЙ КИТАЯ

ЧАСТЬ 1. ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ¹

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: музейные здания, инженерные системы, микроклимат, энергоэффективность, информационное моделирование зданий (BIM), интеллектуальные системы управления зданием, единая технологическая система (ETC)

Е. Н. Болотов, генеральный директор ООО «ВАК-инжиниринг», председатель комитета НП «АВОК» по историческим и музейным зданиям; **М. М. Бродач**, канд. техн. наук, профессор Московского архитектурного института (Государственной академии), президент НП «АВОК»

Сегодня возможности цифровизации широко используются для создания эффективных инженерных систем зданий. Так инженеры-проектировщики, разрабатывая 3D-модели систем жизнеобеспечения, дистанционно общаются с архитекторами и конструкторами в режиме онлайн, используют DeepSeek и ChatGPT для получения дополнительной информации, применяют CFD²-моделирование для решения сложных задач и т. п. Цифровые технологии наиболее актуальны для объектов, требующих определенных параметров микроклимата, высокой энергетической эффективности и эксплуатационной надежности, например музеев. И здесь особо интересны достижения китайских коллег, проектирующих музейные здания на основе искусственного интеллекта и информационного моделирования, что позволяет успешно объединить в одно целое архитектурную концепцию и инженерную инфраструктуру.

¹ Список использованных в статье литературных источников приведен в ее интернет-версии: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=9478

² CFD (сокращение от англ. Computational Fluid Dynamics) – вычислительная гидрогазодинамика.

Если в XX веке инженерные системы музеев рассматривались преимущественно как средство поддержания нормативных параметров (температуры и относительной влажности) воздуха, то в настоящее время их задачи значительно расширились. Современный музей представляет собой сложный многофункциональный общественный объект, реализующий, помимо прочего, учебно-образовательную и научно-исследовательскую деятельность. Поэтому инженерная инфраструктура такого музея должна обеспечивать не только сохранность музейных коллекций, но и создавать условия для выполнения реставрационных работ, поддерживать комфортную среду для сотрудников и посетителей, способствовать эффективной эксплуатации здания и т. п. Передовые инженерные решения и цифровое сопровождение позволяют это сделать. То есть возможно объединить архитектурную концепцию здания с комплексным управлением внутренней средой, одновременно снижая эксплуатационные затраты и повышая энергетическую эффективность на всем жизненном цикле объекта.

Почему интересен именно китайский опыт строительства современных музеев?

Анализ современных инженерных возможностей, апробированных на объектах в других странах, позволяет определить наиболее перспективные направления развития проектирования музейных зданий и оценить целесообразность их применения в российских условиях. Китай, реализуя в последние годы масштабные государственные программы в области культуры, стал одним из мировых лидеров в области музейного строительства. Созданы десятки новых музеев, отличающихся не только выразительной архитектурой, но и высочайшим уровнем инженерного обеспечения. Многие из этих объектов стали экспериментальными площадками для внедрения современных инструментов проектирования, автоматизации и эксплуатации инженерных систем.

Также важно, что используемые китайскими специалистами решения учитывают все три составляющие, необходимые для получения качественного продукта, а именно: плодородную почву (базис), современные технологии и инструментарий. Это результат того, что многие китайские специалисты изучали строительную теплофизику под руководством выдающихся российских ученых³. Известны достижения Китая и в области искусственного интеллекта (ИИ), в том числе его применение к решению инженерных задач.

Интерес к китайскому опыту обусловлен не только масштабами строительства, но и внедрением комплексного подхода к созданию музейной среды. При проектировании новых музеев архитектурные, конструктивные и инженерные замыслы разрабатываются как единая система. Это позволяет достичь оптимальных условий функционирования объекта, а при изменении требований – адаптировать к ним музейное здание.

Для России, где возводятся современные музейные комплексы, ведется реконструкция действующих объектов и актуализация нормативных документов (см. справку), рег-

НП «АВОК» подготовило третью актуализированную редакцию государственного стандарта СТО НП «АВОК» 7.7-2026 «Музеи. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха». В состав экспертного совета по пересмотру стандарта вошли научные работники, архитекторы, инженеры ведущих музеев и проектных организаций, включая Государственный Эрмитаж, МАРХИ, НИИСФ РААСН, МГСУ.

Стимулом к обновлению документа стало широкое применение компьютерных технологий: для оптимизации архитектурно-планировочных решений, для расчета и управления воздушным режимом здания и т. п. Соответственно, новая редакция стандарта дополнена разделом «Воздушный режим здания музея», существенно переработан раздел «Автоматизация процесса управления и диспетчеризация инженерного оборудования», появились новые приложения: «Расчет потерь теплоты за счет инфильтрации наружного воздуха через остекленные атриума» и «Программные и технические средства для автоматизированных систем музейных зданий и комплексов». В стандарте отмечается (см. п. 1.1.16), что «разработку инженерных систем обеспечения музейного микроклимата следует выполнять с применением методов цифровизации и специализированных компьютерных технологий».

Экспертный совет отметил, что стандарт СТО НП «АВОК» 7.7-2026 нацелен на создание устойчивого музейного климата на основе реализации комплексного подхода (технология – архитектура – конструктив – инженерные системы) с применением современных компьютерных технологий, и рекомендовал включить его в перечень обязательных нормативных документов при разработке проектной документации зданий музейного назначения.

ламентирующих архитектурно-планировочные (АПР) и конструктивные решения, инженерную начинку зданий культурного назначения, китайский опыт представляет безусловную ценность. Поэтому цель настоящей статьи – оценить опыт инженерного проектирования музейных зданий Китая, выявить наиболее характерные инженерные решения, реализованные в крупнейших музейных комплексах, и оценить возможности их использования при проектировании отечественных музеев.

Основные тенденции современного инженерного проектирования музейных зданий

Развитие музейного строительства в XXI веке сопровождается принципиальным изменением в подходах к проектированию инженерной инфраструктуры. Если ранее проекти-

³ Например, профессора Богословского В. Н. – одного из основателей отечественной школы строительной теплофизики, разработавшего теорию потенциала влажности и сформулировавшего два условия комфортности в помещениях, или основоположника теории воздушного режима зданий – профессора Титова В. П.

рование инженерных систем здания в большинстве случаев являлось самостоятельной частью проекта, оцениваемой по уровню соответствия действующим нормативным требованиям, то современная практика основана на глубокой интеграции систем жизнеобеспечения с архитектурными и конструктивными решениями. Это стало возможным благодаря развитию и внедрению современных компьютерных технологий, включая ИИ.

Переход к комплексному проектированию, при котором архитектурная концепция здания формируется в симбиозе с инженерной инфраструктурой, является одной из наиболее значимых тенденций. На ранних стадиях проектирования учитывается влияние ориентации здания, естественного освещения, объемно-планировочной структуры и конструктивных решений на тепловой баланс объекта, организацию воздухообмена и эффективность функционирования инженерных систем.

Важнейшим направлением становится расширение сферы применения цифровых технологий – эффективного инструмента достижения поставленных целей. Так информационное моделирование зданий (BIM)⁴, включающее графическое и математическое моделирование непосредственно инженерных систем, по сути, создает цифрового двойника объекта, позволяющего заранее (до начала строительства) выявить системные ошибки и несоответствия между отдельными системами и конструкциями здания, поскольку BIM является основой для управления объектом на протяжении всего жизненного цикла.

Роль интеллектуальных систем управления зданием (Building Management System — BMS), объединяющих в единую информационную сеть системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, электроснабжения, освещения,

безопасности и диспетчеризации, также возрастает. Благодаря непрерывному мониторингу создается архив оптимальных алгоритмов управления инженерными системами здания и база эксплуатационных характеристик, непрерывно оптимизируются режимы работы оборудования, что позволяет снижать объемы энергопотребления и поддерживать стабильные параметры внутренней среды.

Особое значение для музейных зданий, требующих особого микроклимата, имеет применение современных методов математического моделирования. Использование вычислительной гидродинамики (CFD) позволяет оценить распределение температуры и влажности воздуха по зонам, определить направление воздушных потоков в помещениях сложной конфигурации, оптимизировать схемы воздухораспределения и выбрать наилучшие технические решения еще на стадии проектирования.

Важнейшей составляющей в достижении цели создания устойчивого микроклимата музейных помещений является воздушный режим здания, который необходимо рассматривать как единую технологическую систему (ЕТС). Музейные здания, как исторические, так и современные, как правило, имеют анфилады открытых экспозиционных залов, парадные лестницы, внутренние дворики и атриумы. Правильная организация управления их воздушным режимом, включая регулирование перетекания потоков воздуха, позволяет не только обеспечить устойчивый микроклимат, но и значительно сократить потребление энергии и уменьшить площадь, необходимую для размещения коммуникаций. Эта задача оптимально решается архитектором на ранней стадии при разработке первичных архитектурно-планировочных решений. Из-за сложности процесса для этого применяют цифровые технологии, в том числе ИИ.



⁴ Информационное моделирование зданий в международной практике обозначается как BIM (Building Information Modeling). В России иногда используют термин ТИМ – технология информационного моделирования.



Музей Искусств в Пудуне

Особенностью современного музейного строительства является переход на принципы устойчивого развития. То есть при проектировании предусматривается использование высокоэффективных систем вентиляции с рекуперацией теплоты, интеллектуального управления освещением, энергоэффективных ограждающих конструкций, солнцезащитных устройств, пассивных методов регулирования теплового режима здания и т. д. При этом мероприятия по повышению энергоэффективности рассматриваются не изолированно, а как составная часть общей инженерной концепции объекта.

Таким образом, современное инженерное проектирование музейных зданий находится в процессе трансформации от разработки отдельных инженерных систем к созданию единой архитектурно-инженерной среды, обеспечивающей сохранность музейных коллекций, комфорт и безопасность посетителей, рациональное использование энергетических ресурсов и эффективную эксплуатацию здания.

Примеры успешных инженерных решений, реализованных в современных музеях Китая

В Китае в течение последних двух десятилетий реализуются масштабные архитектурные проекты многофункциональных музейных комплексов. Новые музеи объединяют выставочные пространства, образовательные центры, конференц-залы, общественные зоны и современные фондохранилища. Поэтому не удивительно, что для инженерной инфраструктуры этих объектов применены уникальные технологии и оборудование, формирующие качественную среду обитания и обеспечивающие высокую эффективность эксплуатации здания. Кроме того, современные китайские музеи демонстрируют тесную интеграцию инженерных систем с архитектурной концепцией объекта.

Шанхайский астрономический музей

Одним из наиболее ярких примеров интеграции архитектуры и инженерии является Шанхайский астрономический музей (Shanghai Astronomy Museum)⁵, открытый в 2021 году. Архитектурная концепция музея основана на принципах небесной механики: в композиции здания отсутствуют прямые линии, а основные объемы символизируют движение небесных тел.

Инженерные системы разрабатывались с использованием информационного моделирования, что позволило оптимизировать размещение инженерных коммуникаций в условиях сложной геометрии здания. Особое внимание было уделено организации микроклимата в крупных атриумных пространствах, где важно обеспечить равномерное распределение температуры и воздушных потоков при значительной высоте помещений.

Архитектурная форма активно участвует в формировании внутренней среды здания. Организация естественного освещения, ориентация отдельных объемов и конструкция световых проемов позволяют снизить нагрузку на системы искусственного освещения и одновременно исключить неблагоприятное воздействие прямой солнечной радиации на экспозиции.

Инженерная инфраструктура объединена интеллектуальной системой управления зданием, обеспечивающей автоматическое регулирование параметров микроклимата в зависимости от режима эксплуатации помещений и количества посетителей.

Музей искусств в Пудуне

Интересен открытый в Шанхае в 2021 году Музей искусств в Пудуне (Museum of Art Pudong, MAP)⁶, демонстрирующий современный подход, при котором инженерная инфраструктура становится не скрытым техническим элементом, а важной составляющей архитектурной концепции здания.

⁵ Проект бюро Ennead Architects.

⁶ Проект выполнен бюро Ateliers Jean Nouvel в сотрудничестве с китайскими специалистами.



Музей современного искусства М+

Архитектурная концепция музея основана на создании универсального выставочного пространства, способного адаптироваться к экспозициям различного характера. Простота объемной композиции сочетается с высокой инженерной насыщенностью здания, обеспечивающей возможность экспонирования произведений искусства мирового уровня.

Особое внимание уделено использованию естественного освещения. Верхнее освещение выставочных залов организовано таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение дневного света без попадания прямых солнечных лучей на произведения искусства. Для отдельных помещений предусмотрена возможность полного затемнения, что позволяет экспонировать в них наиболее чувствительные музейные предметы.

Западный стеклянный фасад здания MAP выполняет одновременно архитектурную, функциональную и инженерную задачи. Двойная фасадная система способствует снижению тепловых нагрузок, улучшает энергоэффективность здания и обеспечивает комфортные условия для посетителей при сохранении визуальной связи с городской средой.

Инженерные системы музея обеспечивают высокую стабильность значений температуры и относительной влажности воздуха, необходимых для хранения и экспонирования произведений искусства. Автоматизированная система управления инженерной инфраструктурой позволяет оптимизировать режимы работы оборудования с учетом изменения внешних климатических условий и количества посетителей.

Дюнный музей искусств

Дюнный музей искусств (UCCA Dune Art Museum)⁷, являющийся филиалом Центра современного искусства UCCA, расположен на побережье Бохайского залива и представляет собой уникальный пример взаимодействия архитектуры, инженерии и природного ландшафта.

⁷ Проект бюро OPEN Architecture.

Значительная часть здания размещена непосредственно под песчаными дюнами. Такое решение позволило использовать массив грунта в качестве естественного аккумулятора тепловой энергии. Температурные колебания наружного воздуха оказывают значительно меньшее влияние на внутренний микроклимат помещений, благодаря чему снижается нагрузка на системы кондиционирования воздуха и повышается энергоэффективность здания.

Архитектура музея практически не нарушает существующий природный ландшафт. Инженерные системы проектировались с учетом необходимости минимального вмешательства в окружающую среду и сохранения естественных характеристик территории.

Применение пассивных методов регулирования теплового режима делает данный объект одним из наиболее интересных примеров устойчивого проектирования музейных зданий.

Музей Великого канала Китая

Музей Великого канала Китая (China Grand Canal Museum) в Янчжоу посвящен исторической культурной реликвии и представляет собой крупный музейный комплекс с разнообразными функциональными зонами. При проектировании объекта особое внимание уделялось функциональному разделению инженерных систем. Выставочные пространства, фондохранилища, реставрационные мастерские, административные помещения и общественные зоны обслуживаются самостоятельными инженерными подсистемами, поддерживающими в каждой отдельной зоне индивидуальный микроклимат. Такой подход позволяет осуществлять техническое обслуживание инженерного оборудования без остановки работы музея.

Централизованная система диспетчеризации ведет непрерывный мониторинг работы инженерной инфраструктуры, выявляя возможные отклонения и обеспечивая надежность эксплуатации здания.

Музей современного искусства М+

Музей М+ в Гонконге (M+ Museum)⁸ является одним из крупнейших музеев современного искусства и визуальной культуры в Азии. Основной особенностью его инженерной концепции является высокая степень цифровизации. Инженерная инфраструктура объединена единой системой управления, позволяющей осуществлять непрерывный мониторинг параметров внутренней среды, технического состояния оборудования и энергопотребления.

Большое внимание уделено гибкости инженерных решений. Экспозиционные пространства могут оперативно адаптироваться к различным выставочным проектам без существенной реконструкции инженерных коммуникаций. Это особенно важно для музея современного искусства, экспозиции которого регулярно меняются и предъявляют различные требования к микроклимату, освещению и инженерному оборудованию.

Опыт M+ Museum демонстрирует перспективность перехода к цифровой модели эксплуатации музейного здания, основанной на непрерывном мониторинге, анализе эксплуатационных данных и интеллектуальном управлении инженерной инфраструктурой. Существенное внимание уделяется вопросам энергоэффективности.

Анализируя рассмотренные в статье примеры музейных комплексов, можно отметить, что, несмотря на различие архитектурных концепций, все их объединяет единый принцип: здание как единая технологическая система. То есть и воздушный режим здания, и его инженерные системы рассматриваются как неотъемлемая часть архитектурного замысла. Кроме того, в данных проектах инженерные решения разрабатывались на базе ИИ одновременно с архитектурной частью, что позволило максимально использовать преимущества объемно-планировочных решений, солнечного освещения, естественных воздушных потоков, конструктивной схемы здания и т. п. В результате все эти музейные здания не только соответствуют современным требованиям по качеству микроклимата, но и демонстрируют высокую эксплуатационную надежность, энергоэффективность и адаптивность музейных пространств.

Кроме того новые музейные комплексы Китая проектируются с учетом требований «зеленого» строительства. На объектах применяются высокоэффективные теплообменники, системы рекуперации теплоты удаляемого воздуха, частотное регулирование вентиляторов и насосов, интеллектуальное управление освещением, используются возобновляемые источники энергии и автоматическая оптимизация режимов работы оборудования в зависимости от фактической посещаемости здания. При этом повышение энергетической эффективности рассматривается не как самостоятельная цель, а как средство обеспечения устойчивой эксплуатации объекта при сохранении высокого качества внутренней среды. ■

Продолжение статьи читайте в следующем номере журнала «Энергосбережение».

⁸ Проект разработан архитектурным бюро Herzog & de Meuron совместно с TFP Farrells.

СТАНДАРТ АВОК

СТО НП «АВОК» 7.7–2026 «МУЗЕИ. ОТОПЛЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА»



Стандарт СТО НП «АВОК» 7.7–2026 «Музеи. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха» – актуализированная редакция, разработанная Комитетом НП «АВОК» по музейным и историческим зданиям. Стандарт дополнен новыми разделами, содержащими требования к воздушному режиму здания, автоматизации процессов управления и диспетчеризации инженерного оборудования, а также приложениями по расчету потерь теплоты за счет инфильтрации наружного воздуха через остекление атриума, программными и техническими средствами для автоматизированных систем музейных зданий и комплексов.

Требованиями к способам стабилизации относительной влажности внутри экспозиционных витрин дополнено также приложение, содержащее рекомендации Государственного Эрмитажа по выбору и обоснованию оптимальных параметров микроклимата для обеспечения сохранности коллекций в зданиях музеев, выставочных галерей, библиотек и архивов.

Новые возможности в расчете воздушного режима здания, а также предложенные новые методы автоматизации процессов управления и диспетчеризации музейным зданием обусловлены развитием компьютерных технологий, роль которых невозможно не учитывать в вопросах опережающей стандартизации.

В приложении «Практические рекомендации. Инновационные технологии и оборудование для создания музейного климата» в новой редакции стандарта представлена информация ведущих компаний в области создания и обеспечения климата в музеях и музейных комплексах по применению оборудования, в первую очередь актуальная для специалистов в области климата музеев, для хранителей музейных коллекций, а также для инженеров-проектировщиков, занимающихся вопросами создания и поддержания музейного климата.

НП «АВОК» рекомендует службам эксплуатации музеев при модернизации своих объектов обращаться именно к компаниям, представленным в приложении, а значит, гарантирующим поставку качественного и инновационного оборудования и технологий, что подтверждается их многолетней и высокопрофессиональной работой.

Приобрести или заказать стандарт
можно на сайте abokbook.ru
или по электронной почте s.mironova@abok.ru