

# ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ И УПРАВЛЕНИЯ ИМИ **КАК ОПТИМИЗАЦИЯ ИНВЕСТИЦИЙ В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕШЕНИЯ**

Е. Н. Болотов, генеральный директор ООО «ВАК-инжиниринг», председатель комитета НП «АВОК» по музейным и историческим зданиям

Внедрение энергоэффективного оборудования и технологий часто подразумевает дополнительные финансовые вложения. Однако использование цифровых технологий при проектировании позволяет экономить и при выборе дорогих энергосберегающих решений. Покажем это на примере современного многофункционального общественного центра.

Открывая форточку для проветривания помещения, мы реализуем самый простой и дешевый, но не самый энергоэффективный (затратный) метод организации воздухообмена. Применение механических приточно-вытяжных систем делает «погоду в доме», безусловно, более устойчивой, но за это надо платить, и немало.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

энергоэффективность,  
инfiltrация,  
управление воздушным режимом,  
CFG-моделирование,  
общественные и офисно-  
административные здания,  
холодоснабжение

Применение энергоэффективного оборудования и технологий для экономии энергоресурсов часто подразумевает дополнительные финансовые вложения. Отсюда возникает естественная необходимость в технико-экономическом обосновании. Но, как правило, необходимо сначала что-то вложить, прежде чем получить компенсацию (а если удастся, то и экономии на текущих затратах). Существует ли альтернатива такой ситуации, при которой можно не тратить свои или бюджетные деньги? Да, существует. Например, когда для реализации поставленной задачи по всем аналогам мы должны потратить 1 млн руб. (или дол. и т. п.), а потребуются только половина от этой суммы. Как этого достичь? Как вариант, применить инновационные (поскольку это отступление от классики), в нашем случае технические, решения. Если говорить о системах обеспечения микроклимата, в конечном итоге мы должны получить качественный продукт, технический уровень которого будет не только не ниже, а даже выше ожидаемого.

Наличие оптимального решения, безусловно, важно для всех категорий зданий. Однако в большей степени это актуально для многофункциональных общественных центров, в полной мере оборудованных дорогостоящими инженерными системами обеспечения комфортного внутреннего микроклимата, потребляющими значительный объем энергетических ресурсов.

### Многофункциональный трансформируемый зал

На территории Московского международного делового центра «Москва-Сити» в стадии реализации находится уникальный объект – многофункциональный комплекс. На площади 45 тыс. м<sup>2</sup> будут размещены развлекательные и спортивный бассейны, тренажерные залы, номера пятизвездочной гостиницы, ресторан авторской кухни и другие предприятия общественного питания, косметический салон, выставочный зал и конгресс-холл, офисы управляющей компании и другие зоны различного назначения.

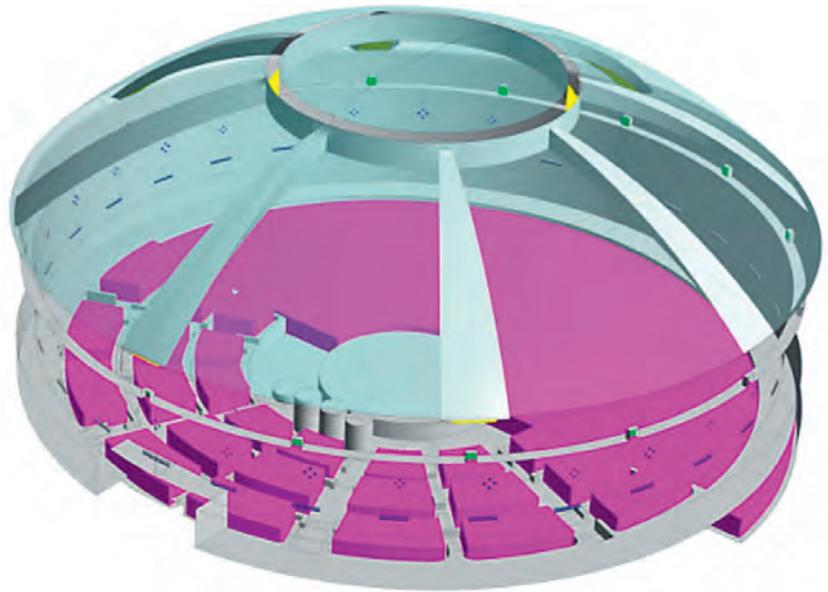


Рис. 1. Объемные источники тепла для концертного формата I (танцевальный партер)

Центральным элементом данного комплекса является многофункциональный трансформируемый зал (далее – МТЗ) на 8 тыс. посетителей. МТЗ оборудован раздвижным куполом для проведения концертов, а также уникальных музыкальных шоу, в течение которых будут показываться водные аттрак-

### Использование инструментов математического моделирования

При разработке технической концепции МТЗ использован и применен уникальный зарубежный опыт решения аналогичных задач. CFD-моделирование воздушного режима для различных режимов выполнено американской компанией Price Industries Ltd с получением полей температуры, влажности, подвижности внутреннего воздуха и расчетом индекса комфортности PMV по методике Фангера<sup>1</sup>. Данный показатель определяет среднее восприятие тепла<sup>2</sup> большой группой людей. Он объединяет различные условия окружающей среды, включая температуру, влажность, скорость воздуха и среднюю радиационную температуру, с человеческими факторами, такими как одежда и выделение метаболического тепла, в результате чего создается единый параметр комфортности. Допустимые предельные значения, установленные ASHRAE для данного индекса, находятся в оптимальном диапазоне  $-0,5 < PMV < 0,5$ .

Зал имеет возможность трансформации за счет различных вариантов размещения передвижных платформ в соответствии с требуемыми

#### #терминология

**Математическое моделирование (CFD)** – это современный инструмент, который используется для проверки проектных инженерных решений на соответствие их функциональной задаче

цены; это стало возможным благодаря наличию развлекательных бассейнов, закрываемых при максимальном заполнении посетителями зала передвижными платформами. Предусмотрено более 20 режимов эксплуатации зала: от активного пляжного отдыха до концертных выступлений. Это, естественно, требует поддержания различной интенсивности тепло- и влагопоступлений и, как следствие, организации переменного воздухообмена, учитывающего степень заполняемости зала посетителями.

<sup>1</sup> Подробнее см. статью Olesen B. W. Критерии теплового комфорта при проектировании систем отопления. // АВОК. 2009. № 5, электронная версия [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=4355](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4355). – Прим. ред.

<sup>2</sup> По семибалльной шкале восприятия тепла ASHRAE (стандарт ASHRAE 55–2010).



**Рис. 2.** Организация воздухообмена в зале МТЗ

эксплуатационными форматами: концертные режимы с переменным числом посетителей, дискотека, пляжный клуб и др. Раздача приточного воздуха решена соплами и щелевыми диффузорами по радиусу пространства с вытяжкой, расположенной ниже основания купола. В расчетах учитывались конвективные и радиационные тепловые нагрузки от людей и окружающей среды.

По итогам CFD-моделирования выбрана оптимальная организация подачи и удаления воздуха из зала (рис. 2). Для различных режимов функционирования определены расход приточного воздуха и его параметры, алгоритмы управления и сформирована первичная программа производства натуральных испытаний с симуляцией тепловлажностного режима.

### Определение тепловых и холодильных нагрузок

Концертные мероприятия с численностью до 8 тыс. зрителей проводятся нечасто: 4 раза летом и 4 раза зимой. Соответственно, пиковое потребление тепловой и холодильной мощности климатическим оборудованием составляет 4 цикла «тепло–холод» за год.

Прочие режимы функционирования МТЗ характеризуются энергопотреблением меньше максимального расчетного в 2 и более раз. Поиск совместно с заказчиком оптимального алгоритма функционирования остальных помещений многофункционального комплекса с целью минимизации нагрузок на краткосрочный концертный период работы МТЗ является пред-

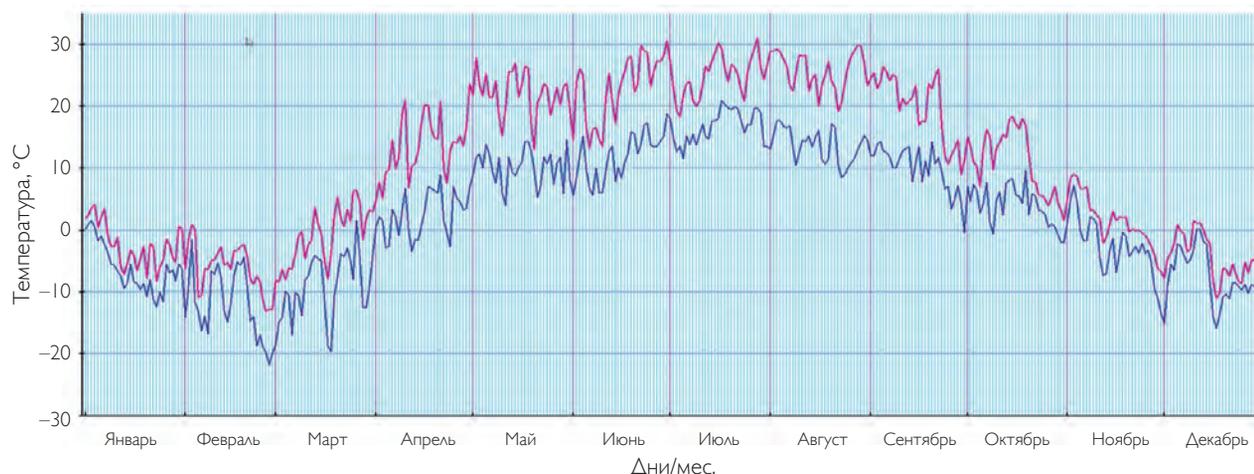
посылкой эффективного сокращения суммарных тепловых, холодильных, а значит, и электрических установленных мощностей.

Тепловые и холодильные нагрузки определяются прежде всего расходом приточного наружного воздуха, исходя из количества посетителей и режима функционирования. При этом учитывается допустимый (согласно санитарным нормам) минимальный объем наружного воздуха, зависящий от активности посетителей (танцевальный формат, пляжный клуб в развлекательных бассейнах или спокойное состояние зрителей в концертном формате) и обоснованный исходными расчетными параметрами как первичного (наружного), так и конечного (внутреннего) воздуха в рабочей зоне и удаляемого воздуха. Снижение на 2 °С расчетной температуры (28 °С) при охлаждении приточного воздуха до 18 °С дает экономию около 20 %.

### Анализ изменений температуры наружного воздуха

Для обоснования расчетных параметров наружного воздуха для МТЗ был выполнен анализ значений и частоты повторяемости предельных температур (максимальных для определения холодильной нагрузки и минимальной – для тепловой) за последние несколько лет для условий Москвы.

Ход движения температур наружного воздуха за 2018 год представлен



**Рис. 3.** Дневные (верхний график) и ночные (нижний график) температуры воздуха за 2018 год

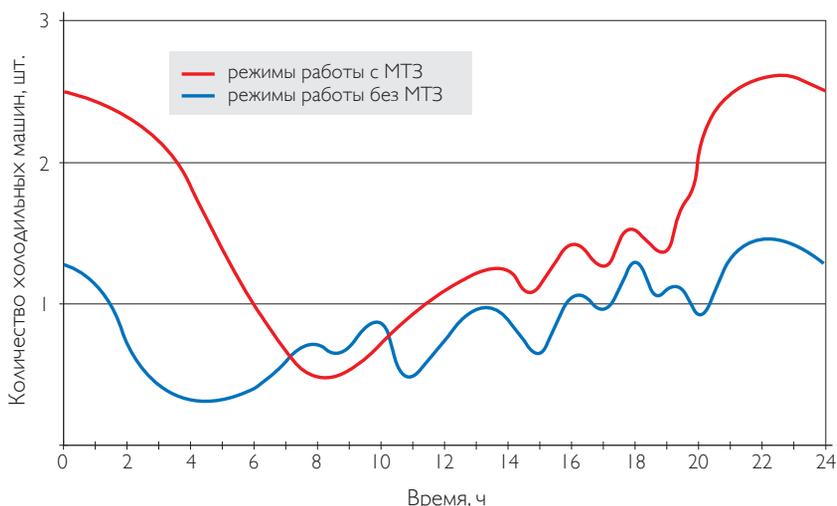


Рис. 4. Изменение холодопотребления в течение суток

на рис. 3. Для большинства дней перепад дневной и ночной температуры в теплый период года составляет до 10 °С. В результате анализа данных климатологии за прошедшие годы и с учетом того, что время начала концерта 19:00, а коэффициент обеспеченности равен 0,98, была снижена на 4 °С расчетная температура наружного воздуха. Это привело к дополнительному обоснованному снижению расчетной нагрузки на холодильный центр.

### Холодильный центр

Основным потребителем электроэнергии комплекса, естественно, является система холодоснабжения – холодильный центр. Расчетная холодильная нагрузка составила 5,5 МВт и была получена в результате расчетов, выполненных по стандартной методике с составлением воздушно-тепловых балансов в соответствии с действующими нормативами, включая СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», т. к. проектная документация проходила согласование в Государственной экспертизе. Расчет был основан на принятых для технического задания расчетных климатических параметрах наружного и внутреннего воздуха, функциональном назначении помещений и расчетной численности людей. Итоговая нагрузка складывалась из показателей по отдельным помещениям с введением дежурного коэффициента одновременности (обычно 0,85) без его дальнейшего обоснования.

### Оптимизация холодо- и теплоснабжения

Рассмотрим отдельные дополнительные составляющие оптимизации (снижения) холодильных нагрузок.

Следует обратить внимание, что предельная численность посетителей в здании, согласно требованиям пожарной и общей безопасности, ограничена и, как правило, меньше суммарной численности по расчетной таблице балансов. Поэтому, сохраняя расчетную мощность конечных охлаждающих элементов (фанкойлов или балок), решено ограничить максимальные расчетные холодильные (и тепловые) нагрузки предельной численностью людей и перейти на систему холодоснабжения (теплоснабжения) с управляемым (контролируемым) переменным расходом (как контролировать, рассмотрено далее по тексту).

В многофункциональном комплексе, в отличие, например, от классического офисного здания, численность находящихся в нем посетителей – величина всегда переменная, зависящая от времени суток, дней недели (выходные), времени года, проведения выставок и прочих факторов. При этом многофункциональный центр объединяет помещения различного назначения с различными режимами функционирования.

Технические помещения, такие как кроссовые, функционируют круглосуточно. Арт-галерея имеет пиковые режимы в зависимости от программы выставок. Рестораны, тренажерные залы

и т. п., в отличие от офисных зон, имеют четко выраженные режимы работы: утренний, дневной и вечерний (пиковый). Численность посетителей варьируется в зависимости от дней недели: рабочие, выходные и праздничные дни. Количество посетителей во входной зоне, раздевалках и непосредственно в тренажерных залах различается.

Возникает обоснованный вопрос: как определить суммарную охлаждающую мощность для данной связки помещений с учетом наличия у большинства посетителей постоянных абонементов? Необоснованно принимать расчетную нагрузку на систему холодоснабжения или общую расчетную численность посетителей как сумму отдельных нагрузок (числа посетителей) во входной зоне (холлах и коридора) + раздевалках + собственно тренажерных залах.

### Схема с переменным расходом холодоносителя

Основными вредностями для здания общественного назначения являются поступление тепла и влаги от находящихся в нем людей и охлаждение (нагрев) наружного приточного воздуха. С учетом постоянно меняющегося общего числа посетителей в различных зонах комплекса соответственно меняется и текущее холодопотребление (рис. 4).

Как видно из рис. 4, основной период времени холодильная нагрузка не превышает 30 % от расчетной величины. При неполном заполнении посетителями зрительного зала МТЗ достаточно работы двух из трех установленных холодильных машин. Максимальная расчетная холодильная мощность требуется только при проведении мероприятий в летний день с максимальной расчетной температурой наружного воздуха и с предельной численностью (8 тыс. посетителей), что бывает нечасто.

Поэтому оптимальная схема функционирования холодильного центра предполагает постоянную работу одной установки, в т. ч. и в ночной период, для поддержания заданных параметров воздуха в помещениях для размещения электрооборудования, серверных, прачечных, номерах гостиницы. Соответственно, в проекте реализована схема с переменным расходом холодоноси-

теля с последовательным включением/выключением холодильных установок и циркуляционных насосов.

### О допустимой необеспеченности расчетных параметров внутреннего воздуха

В состав строительного комплекса входят кондиционируемые помещения с различными требованиями, в том числе по допустимой необеспеченности расчетных параметров внутреннего воздуха:

- для многофункционального зала, элитных номеров гостиницы, VIP-помещений приняты системы кондиционирования первого класса со средней необеспеченностью 100 ч/год при круглосуточной работе или 70 ч/год при односменной работе в дневное время;
- для прочих помещений с системами кондиционирования второго клас-

са коэффициент необеспеченности составляет в среднем 250 ч/год при круглосуточной работе.

При этом учитывается различие в расчетных параметрах наружного воздуха для разных классов систем кондиционирования. Соответственно, построение системы холодоснабжения реализует алгоритм перераспределения холодильной мощности в пользу потребителей первой категории, включая и 100-процентное резервирование, с мониторингом текущей холодильной нагрузки для остальных в пределах установленного класса.

Понятно, что и для помещений второго класса параметры внутреннего воздуха не должны выходить за допустимые пределы. Определение коэффициента обеспеченности для данного типа общественного здания является функцией заказчика. Выбор коэффициента в диапазоне 0,996–0,920 в значительной степени определяет и

расчетные нагрузки, и, соответственно, стоимость реализации инженерных систем.

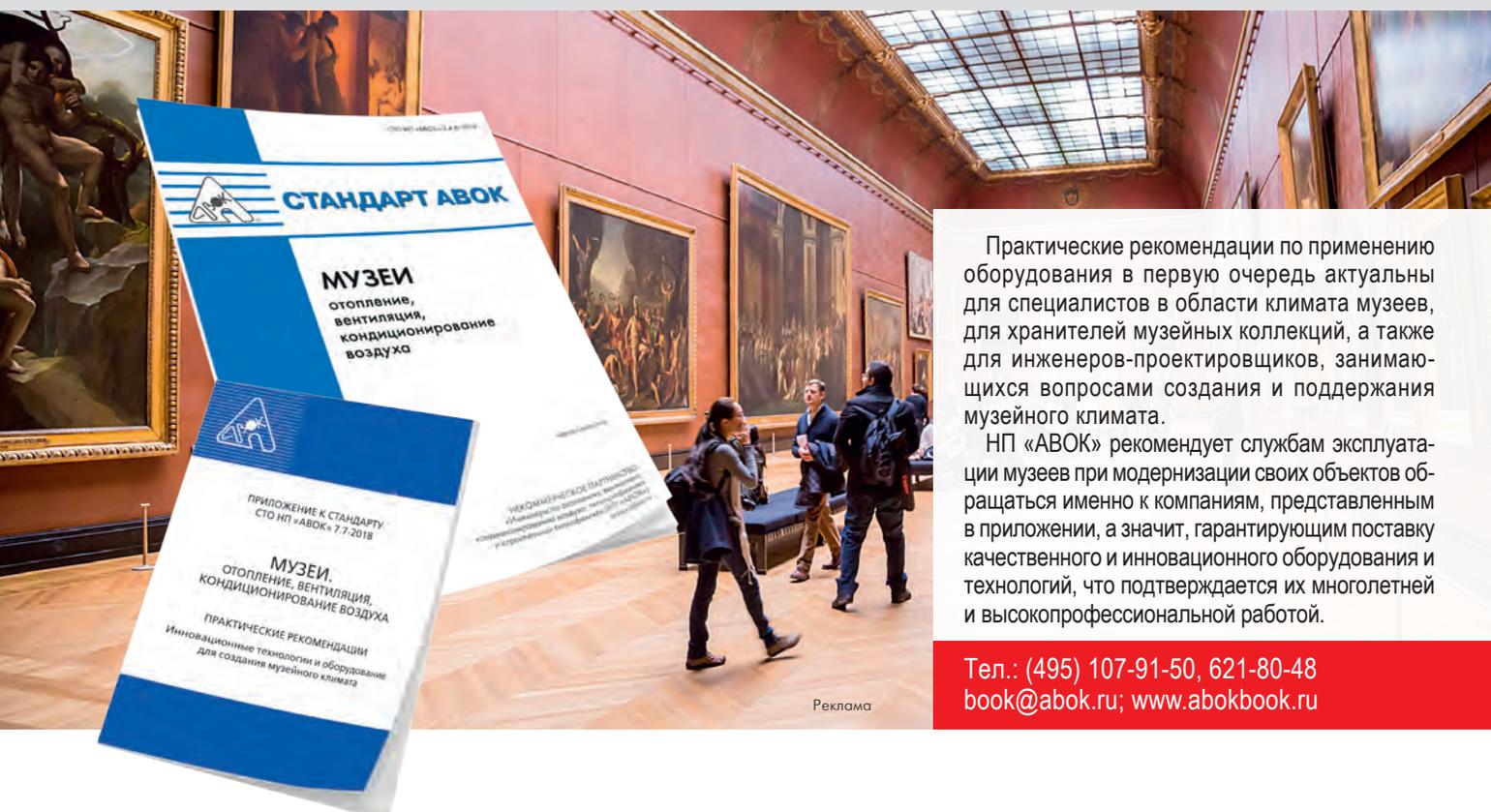
### Результаты применения современных методов решения инженерных задач

При проектировании использованы современные методы решения инженерных задач, включая CFD-моделирование, комплексное моделирование функционирования систем с получением технических показателей и обоснованием коэффициента обеспеченности для разных категорий помещений, анализ климатических параметров наружного воздуха для зон и отдельных помещений, где максимальные нагрузки достигаются в вечернее и ночное время.

Для принятия обоснованного решения по расчетной мощности холодильного центра для многофунк-

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ НП «АВОК»

### СТАНДАРТ СТО НП «АВОК» 7.7–2018 «Музеи. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха» и приложение «Практические рекомендации. Инновационные технологии и оборудование для создания музейного климата»



Практические рекомендации по применению оборудования в первую очередь актуальны 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.

Тел.: (495) 107-91-50, 621-80-48  
book@abok.ru; www.abokbook.ru

ционального комплекса, включая и резервирование оборудования для систем кондиционирования первого класса, необходимо выполнить комплексное динамическое моделирование одновременной работы всех инженерных систем с моделированием (имитацией) разных режимов функционирования комплекса в условиях критических температур (энтальпии) наружного воздуха и сочетаний вариантов численности посетителей и персонала.

Для большинства помещений (зон) коэффициент загрузки в дневное время принят равным 0,5 (при максимальном

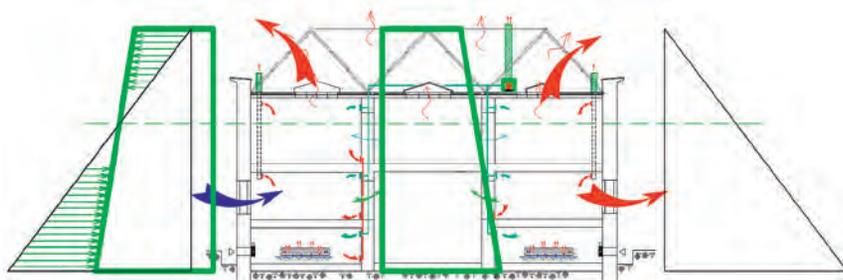
значении 1,0 в вечернее время). Отметим, что максимальные температуры наружного воздуха в Москве наблюдаются в июле, т. е. в период летних отпусков, а значит, при сезонном снижении количества посетителей комплекса.

В итоге в ходе реализации предложенных для данного проекта решений удалось снизить расчетную мощность холодильного центра с 5,5 до 2,8–3,0 МВт, сохранив первоначально заданный уровень надежности в обеспеченности расчетных условий. Применение современных методов проектирования, включая цифровые

технологии, для многофункционального комплекса показывает, что внедрение систем с переменным расходом тепло- и холодоносителя воздуха и реализация управляющих алгоритмов для механических систем позволяют существенно снизить тепловую, холодильную и электрическую нагрузку на ЦТП (ИТП), холодильный центр, венткамеры, а также минимизировать площади под технические помещения. В результате принятых решений значительно снижается и стоимость реализации проекта.

### Организация естественного воздухообмена – энергоэффективное решение

## \* ОРГАНИЗАЦИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА В ЗДАНИИ МУЗЕЯ



Использование естественных гравитационных сил для создания энергоэффективных решений крайне заманчиво. Обратимся к опыту предыдущих поколений.

В начале XX века выдающийся русский архитектор Р. И. Клейн в главном здании ГМИИ им. А. С. Пушкина (Москва, ул. Волхонка, д. 12) реализовал без применения вентиляторов, кондиционеров и прочих современных атрибутов инженерного искусства инженерную систему устойчивого обеспечения музейного микроклимата (рис. 5):

- в холодный период года наружный воздух проходил через caloriferные в цокольной части здания, где нагревался и увлажнялся от открытых поддонов;
- в теплый период функционировала летняя котельная на чердаке здания, создавая тягу с удалением воздуха из экспозиционных залов.

В настоящее время подачу наружного воздуха для жилых зданий, как и прежде (см. \*)), осуществляют воздушные клапаны с удалением внутреннего воздуха через санузлы. В проекте многофункционального офисно-делового комплекса в Москве заложено использование аналогичных воздушных клапанов Nordic.

Данное решение позволяет отказаться от дорогостоящих приточных установок и сети воздуховодов. При отсутствии людей клапан закрыт, а при присутствии снимает часть теплопоступлений. Тяга образуется благодаря тому, что офисные помещения выходят через открытый коридор в атриум, где создается контролируемое разрежение. Таким образом, мы попутно снимаем поступление тепла и вентилируем атриумное пространство.

Правда, для реализации этого безусловно экономичного с точки зрения затрат и энергетической эффективности технического решения была построена модель внутреннего режима как самого здания, так и атриумного пространства, поскольку здание представляет собой замкнутую единую технологическую систему.

Из приведенных примеров видно, как применение современных методов динамического проектирования инженерных систем и моделирования их работы, а также реализация современных алгоритмов управления оборудованием позволяют существенно снизить первоначальные инвестиционные затраты на реализацию энергосберегающих решений. ■