

Мониторинг микроклимата – основа создания эффективных систем и здания с минимальным энергопотреблением

Д.т.н., проф. А.Г. Сотников*,
НП «АВОК Северо-Запад»

Мониторинг микроклимата общественных и промышленных зданий – не только основной, но и единственный способ определения фактических нагрузок, обычно далеких от расчетных величин, и параметров воздушной среды. При проектировании новых зданий он неприемлем, кроме объектов-аналогов, зато для действующих или реконструируемых сооружений, оснащаемых системами микроклимата, очень эффективен. Метод тепло-, влаго-, паро- и газозвушных балансов мало известен проектировщикам и поэтому пока еще мало востребован. Однако та информация, которая может быть получена, является объективной характеристикой параметров и нагрузок и является основой проектирования самодостаточных в энергетическом отношении зданий. Этой статьей и большой главой из подготовленной книги¹ автор хотел ознакомить инженерную общественность с методикой использования мониторинга, поясненной характерными примерами, основанными на фактических замерах.

Главная современная мировая тенденция проектирования – разработка и создание самодостаточных в энергетическом отношении зданий при учете совместного действия внешних климатических факторов (температуры наружного воздуха, его влажности, солнечной радиации, облачности, естественной освещенности, ветра и др.). Это достигается архитектурно-планировочными решениями здания (его формой, ориентацией по сторонам света, площадью светопроемов, термическим сопротивлением и влагонепроницаемостью наружных ограждений) и их способностью самостоятельно поддерживать параметры воздуха (t_B , φ_B), газовый и озон-ионный состав воздуха (содержание частиц аэрозолей, концентрацию CO_2 и др.), уровень шума при минимальном «вмешательстве» традиционных инженерных систем отопления, вентиляции, кондиционирования и ионизации.

Самодостаточный в энергетическом отношении объект – жилое, общественное, производственное помещение или здание с относительно небольшими удельными теплоизбытками $q_F=20-40 \text{ Вт/м}^2$ можно представить графиком годовых режимов работы (рис. 1 а,б) с поддержанием температуры на разном уровне, включая нерабочее время. Весь годовой цикл работы вентиляционных систем такого объекта состоит из трех периодов:

- холодный (режим I), когда без использования теплоты даже при наличии утилизаторов не удается поддержать температуру воздуха не ниже $t_{B,min}$, а в нерабочее время – $t_{B,нераб}$; (обычно этот режим в умеренном климате продолжается 5–10% годового времени);
- переходный (режим II), когда за счет естественных возможностей здания и воздействия климатологических факторов поддерживается температура воздуха в интервале $t_{B,min}-t_{B,max}$ без или с минимальным потреблением теплоты и холода, использованием утилизации и нетрадиционных источников теплоты (этот режим может продолжаться 80–85% годового времени);
- теплый (режим III), при наружной температуре выше значения в интервале $t_{np}-t_{B,max}$, когда без применения холода в помещениях с теплоизбытками не обойтись (этот режим может продолжаться 5–10% годового времени). В холодном и теплом режиме года используют предлагаемую методику.

Еще один пример подобных разработок мы находим в статье [3], где описываются энергоэффективные решения СКВ офисного здания Commerzbank в г. Франкфурт на Майне (Германия). Предложенные системы кондиционирования при низких наружных температурах от -5°C до 10°C используют теплоутилизацию и механическую вентиляцию, а при температурах $10-24^\circ\text{C}$ – естественную вентиляцию для снятия теплоизбытков, а при более высоких температурах – водоохлаждающие машины для охлаждения наружного воздуха. По нашему мнению, однако, верхний предел наружной температуры 24°C явно завышен, этой границей должна быть температура $15-17^\circ\text{C}$, что позволит поддерживать в теплое время года температуру $t_B=22-24^\circ\text{C}$. Можно привести и другие примеры энергоэффективных режимов функционирования СКВ и СВ различных зданий.

Аналогичные режимы для энергоэффективных животноводческих зданий описаны в статьях [1, 2]. Авторы, рассматривая совместно при разных наружных температурах теплотери помещения Q_{mn} , явные и полные тепловыделения животных $Q_{ж}$, минимальный воздухообмен из условия подачи кислорода и удаления углекислого газа, возможности естественного воздухообмена $G_{еств}$, авторы выделяют четыре возможных режима обеспечения микроклимата в таком здании (рис. 1,б).

¹ автором статьи подготовлена книга «Проектирование и расчёт систем вентиляции и кондиционирования воздуха»

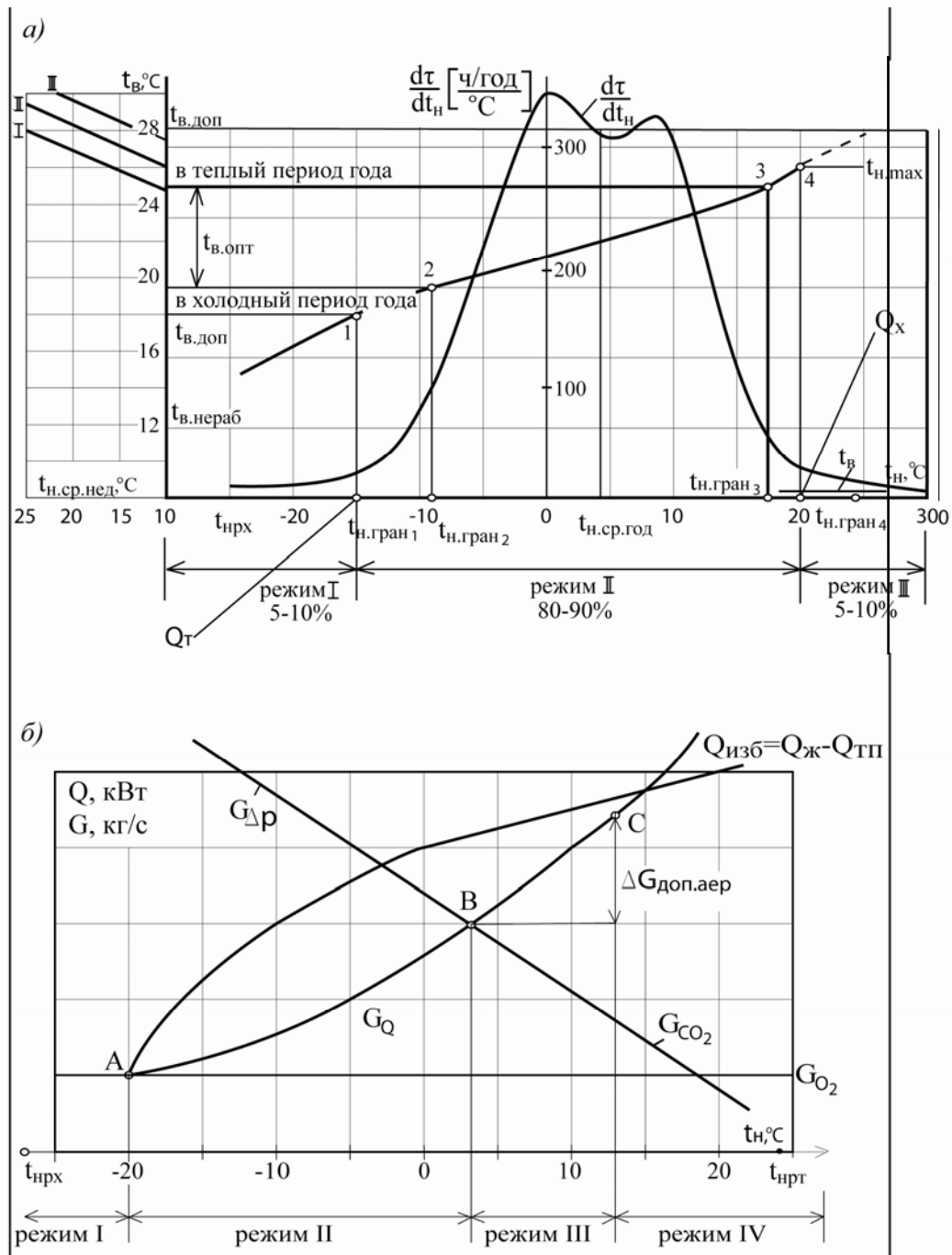


Рисунок 1, а. Условный график годовых режимов работы системы вентиляции (правый квадрант) при проектировании самодостаточного здания на основе комплекса энергосберегающих мероприятий, климатических воздействий и инерционных свойств объекта: режим I – холодный, режим II – переходный, режим III – теплый. Обозначения граничных точек: 1 – при поддержании в помещении минимально допустимой температуры $t_{B,доп.X}$; 2 – то же, при поддержании $t_{B,опт.X}$; 3 – то же, при поддержании $t_{B,опт.T}$; 4 – то же, при поддержании температуры в помещении в интервале между оптимальной и допустимой в теплый период года $t_{B} = t_{B,опт.T} - t_{B,доп.T}$. Левый квадрант – зависимость расчетной температуры воздуха в помещении в теплый период года без кондиционирования от средней еженедельной температуры наружного воздуха по данным [7]: линия I – при проценте неудовлетворенных PPD=10%; линия II – при PPD=20%; линия III – при PPD=35%

Рисунок 1, б. График годовых режимов работы системы вентиляции энергоэффективного животноводческого здания по данным [2]. На графике указаны четыре возможных режима поддержания микроклимата: I – режим необходимого нагрева при $t_{н} < -22°C$; II – режим естественной вентиляции в интервале температур $t_{н} = -22...3°C$; III – режим интенсивной вентиляции (аэрации) помещения в интервале температур $t_{н} = 3...13°C$; IV – режим искусственного охлаждения наружного воздуха при $t_{н} > 13°C$

Большое внимание новым тенденциям проектирования, основанным на изучении фактических режимов объектов и допустимом изменении параметров воздушной среды, уделено в статье В.А. Бросалина, Е.А. Колмаковой и В.Д. Коркина [4]. Основой этой работы послужили обследования реконструируемых музейно-исторических зданий. Для лучшего понимания дальнейшего изложения мы приведем наиболее важные высказывания авторов:

«Для большинства реконструируемых зданий проектированию систем поддержания микроклимата должны предшествовать расчетно-теоретические и натурные исследования, объем и масштаб которых определяется многими причинами, но одной из них должна быть обязательно историческая и культурная ценность здания, его интерьеров и произведений искусства. В результате исследований <...> производят выбор принципиальных путей обеспечения требуемых параметров микроклимата **при условии максимального использования климатообразующих свойств самого сооружения**. При расчете воздухообменов сравнительно небольшие допустимые колебания температуры вряд ли позволят использовать теплоаккумулирующие свойства оборудования, материалов и конструкций, хотя формирование динамического режима температуры может привести к снижению количества воздуха в расчетный (как правило, дневной) период. Нам представляется, что величина Δt_B может быть увеличена в 2–3 раза при условии соблюдения допустимых колебаний φ_B ».

Ниже будет показано, как фактически наблюдаемые временные ряды изменения наружных и внутренних параметров в помещении без воздухообмена характеризуют *естественную сопротивляемость* помещений и здания в целом изменению микроклимата при минимальном вмешательстве инженерных систем. В ряде объектов на протяжении больших интервалов времени наблюдают (замеряют) температуру и влажность внутреннего воздуха и, соответственно – наружного. Эти наблюдения могут проводиться в разные временные интервалы (отопительный период, теплый период, осенне-весенний период) в разных объектах (музейных, исторических, культовых, правительственных, гостиничных номерах для VIP-персон, архивах, фондах, складах и других ответственных с точки зрения требований к микроклимату помещения). Наиболее интересны случаи, когда из инженерных систем работает только отопление, а тепловлажностные параметры формируются стихийно под влиянием внешней среды и свойств ограждений. Известные данные такого типа, к сожалению, не подвергаются серьезному анализу, что позволило бы *оценить самодостаточность* данного объекта.

Приведем характерный пример обработки временных рядов совместного изменения параметров в музейных помещениях для разработки самодостаточных СКВ. В подобных объектах обычно производят регулярные измерения температурно-влажностных параметров для оценки их соответствия как требованиям здания, так и объектов экспозиции. Покажем, что результаты измеренных временных рядов $t_B(\tau)$, $\varphi_B(\tau)$, $d_B(\tau)$ совместно с соответствующими рядами измерений наружных параметров $t_H(\tau)$, $\varphi_H(\tau)$ можно использовать для предлагаемого нами подхода к проектированию. При этом можно избежать избыточных решений и соответствующих расходов холода на охлаждение или охлаждение-осушение воздуха, влаги на увлажнение воздуха, используя известную *самодостаточность* объекта, его тепло- и влагуустойчивость к возмущениям.

Эту особенность отмечала, например, известный специалист по микроклимату и проблеме сохранности музейно-исторических зданий Ш. Парк [6]:

«Во многих исторических зданиях с устаревшими системами обогрева и вентиляции или даже при их отсутствии сохраняется тепловой комфорт в условиях суточных и сезонных колебаний температуры и влажности наружного воздуха: сами здания и находящиеся в них музейные коллекции не понесли какого-либо ущерба».

Как положительный пример *самодостаточности* здания, в этой статье приводится график плавного годового изменения температуры воздуха (от 16°C в январе до 23°C в июле) и соответствующий график годового изменения относительной влажности воздуха (от 33% в январе до 50% в июле) в музее «Дом и студия Фрэнка Ллойда Райта», Оук Парк, Иллинойс, США, благоприятных для сохранности как здания, так и его экспозиции. Как допустимые указываются и более широкие годовые пределы $t_B=7-27^\circ\text{C}$, $\varphi_B=30-75\%$ и одновременно отмечается недопустимость резких суточных перепадов. Например, в задании на проектирование систем микроклимата Государственного Русского Музея (ГРМ, С.-Петербург) суточные колебания параметров в залах ограничены по температуре 3°C, по влажности – 5%.

Из многочисленных материалов измерений параметров воздушной среды корпуса Бенуа ГРМ в течение 1998 г. при отсутствии СКВ нами отобраны наиболее характерные зависимости в зале 68 (рис. 2, а, б, в).

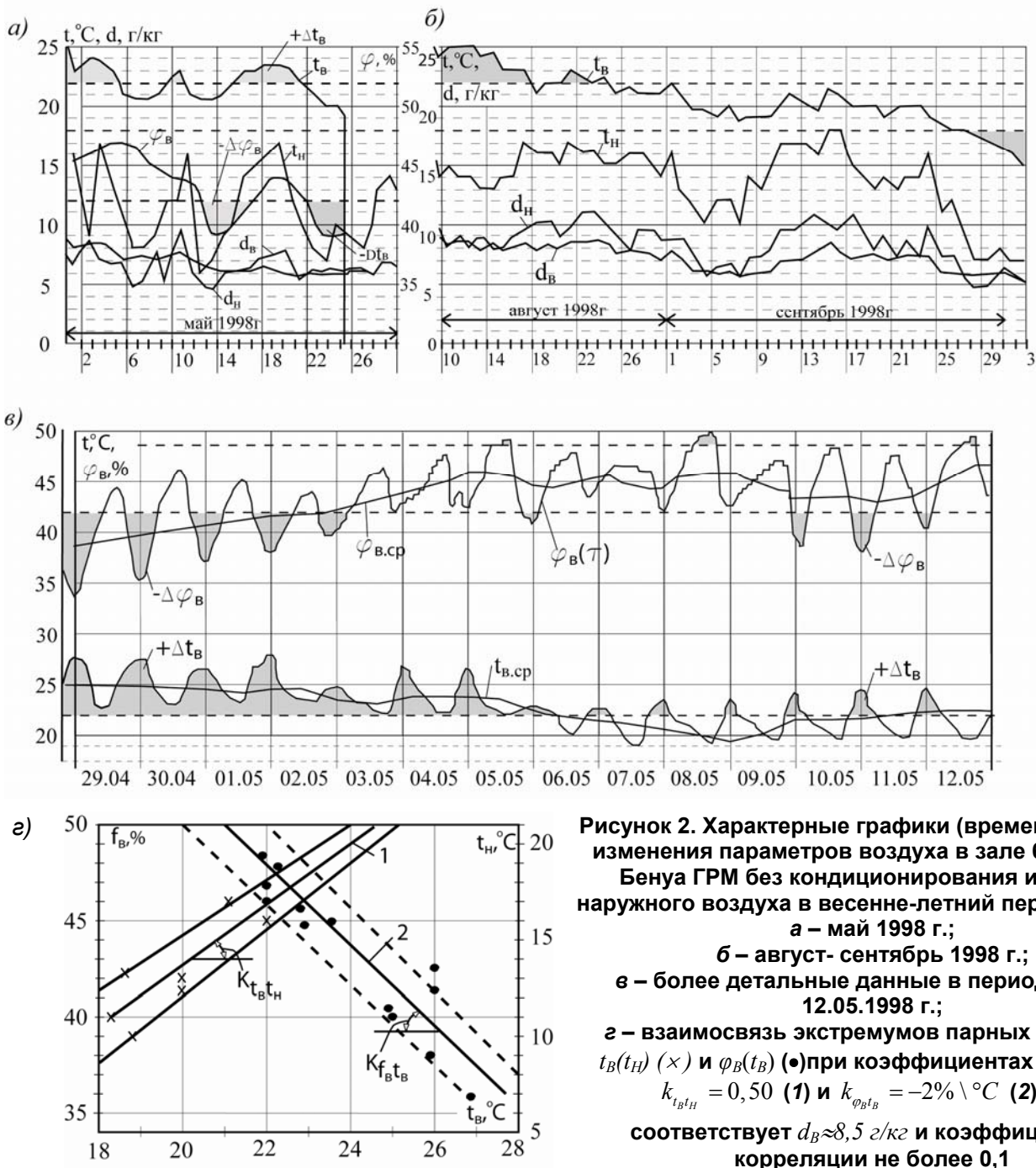


Рисунок 2. Характерные графики (временные ряды) изменения параметров воздуха в зале 68 корпуса Бенуа ГРМ без кондиционирования и подачи наружного воздуха в весенне-летний период 1998 г.:
а – май 1998 г.;
б – август- сентябрь 1998 г.;
в – более детальные данные в период 29.04 – 12.05.1998 г.;
г – взаимосвязь экстремумов парных значений $t_B(t_H)$ (\times) и $\varphi_B(t_B)$ (\bullet) при коэффициентах передачи $k_{t_B t_H} = 0,50$ (1) и $k_{\varphi_B t_B} = -2\% \setminus ^\circ\text{C}$ (2), что соответствует $d_B \approx 8,5 \text{ г/кг}$ и коэффициентах корреляции не более 0,1

При анализе временных рядов обнаружена положительная связь экстремальных значений в паре $t_B(\tau) - t_H(\tau)$ с коэффициентом передачи $k_{t_B t_H} = 0,50$ и отрицательная связь в паре $\varphi_B(\tau) - t_B(\tau)$ с коэффициентом передачи $k_{\varphi_B t_B} = -2\% \setminus ^\circ\text{C}$. Для дальнейшего анализа на рис. 2, б, в нанесены заданные параметры воздушной среды и их отклонения: $t_{B, \text{ном}} = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ и $\varphi_{B, \text{ном}} = 45 \pm 3\%$. Повышение или понижение фактически наблюдаемых параметров от заданных значений оттенены. Вполне очевидно, что при правильном управлении системой отопления в холодный период года можно ожидать в помещении пониженной влажности воздуха, а в летних, особенно *пиковых* условиях, – превышения температурой и влажностью воздуха максимально допустимых значений.

При наличии подобных экспериментальных данных и при учете естественной теплоустойчивости здания недостающее количество холода для поддержания температуры при полной рециркуляции и без использования наружного воздуха можно определить из выражения:

$$\Delta Q_{\text{х.охл}} = (t_{H, \text{max}} - t_{H, 0}) k_{t_B t_H} (q_{\text{ок}} + q_{\text{опр}} + q_B) = (t_{H, \text{max}} - t_{H, 0}) k_{t_B t_H} [k_{\text{ок}} F_{\text{ок}} + \alpha_{K, \text{cp}} (1 - \theta_{\text{нов}}) \Sigma F_{\text{опр}} + L_{\text{рец}} c_B \rho_B], \quad (1)$$

Сотников А.Г. Мониторинг микроклимата – основа создания эффективных систем и здания с минимальным энергопотреблением

где $q_{ок}$, $q_{опр}$, q_B – удельный поток теплоты, поступающей к окну, к остальным ограждениям и воздуху в помещении, кВт/°С; $t_{H,max}$ – максимальная (расчетная) температура наружного воздуха, учитываемая при проектировании, °С; $t_{H,0}$ – температура наружного воздуха, при которой соответствующая температура внутреннего воздуха без использования его охлаждения находится на верхнем пределе $t_{B,max}=t_{B,ср}+\Delta t_B$. Аналогичное количество холода на осушение воздуха с целью снижения его влагосодержания на величину $\Delta d_B=d_{B,max}-d_{B,дон}$ и, соответственно, снижения относительной влажности воздуха на $\Delta\phi_B=\phi_{B,max}-\phi_{B,дон}$ определяют по уравнению:

$$\Delta Q_{x,осуш} = L_{реци} \rho_B (d_{B,max} - d_{B,дон}) i_{нара} \quad (2)$$

где $d_{B,max}-d_{B,дон}$ – максимальная разность наблюдаемого и допустимого влагосодержания воздуха в помещении, $i_{нара}=2500$ кДж/кг=2,5 кДж/г – энтальпия пара. Поясним примером методику инженерного расчета требуемого расхода холода в существующем самодостаточном здании.

Пример 1. В экспозиционном зале существующего музея размерами $l=50$ м, $b=20$ м и $h=4$ м, объемом $V_{ном}=4000$ м³, площадью всех ограждений, кроме остекления, $\sum F_{опр} = 2512$ м², площадью остекления $F_{ок}=48$ м², с коэффициентом теплопередачи остекления $k_{ок}=2,3$ Вт/(м²·°С) при расходе рециркуляционного воздуха $L_{реци}=16000$ м³/ч=4,46 м³/с и среднем коэффициенте конвективного теплообмена на поверхностях $\alpha_{к,ср}=3$ Вт/(м²·°С) в пиковых летних условиях в течение пяти часов ($\tau=5$ ч), взаимосвязь внутренней и наружной температуры описывается коэффициентом передачи $k_{t_{в,t_{н}}} = 0,50$ (рис. 2, г). Теплофизические константы материалов слоев ограждений, примыкающих к воздушной среде принять $c_M=840$ Дж/(кг·°С), $\rho_M=1000$ кг/м³, $\lambda_M=0,7$ Вт/(м·°С), теплофизический критерий М в момент $\tau=5$ ч составляет: $M=Bi^2Fo=3^2 \cdot 5 \cdot 3600 / (840 \cdot 1000 \cdot 0,7) = 0,27$, чему по формуле $1-\theta_{нов}=0,43M^{-0,20}$ соответствует $1-\theta_{нов} \approx 0,58$.

Определить расчетный расход холода в условиях пиковых летних отклонений наружной температуры $\Delta t_{H,max}=t_{H,max}-t_{H,0}=30-23=7^\circ\text{C}$ и при пиковых отклонениях влагосодержания воздуха в зале $\Delta d_{B,max}=d_{B,max}-d_{B,дон}=13-10,5=2,5$ г/кг в предположении учета теплоты, накопленной ограждениями и воздухом, и при условии, что система работает на полной рециркуляции.

Необходимый расход холода, используемый для охлаждения рециркуляционного воздуха и поддержания температуры на верхнем уровне, по формуле (1) составляет:

$$\Delta Q_{x,охл}=(30-23) \cdot 0,50 [2,3 \cdot 48 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 0,58 \cdot 2512 \cdot 10^{-3} + 4,46 \cdot 1 \cdot 1,2] \approx 35 \text{ кВт},$$

чему соответствует снижение температуры охлаждаемого рециркуляционного воздуха на $\Delta t_{реци}=\Delta Q_{x,охл} / (L_{реци} c_B \rho_B) = 35 / (4,46 \cdot 1 \cdot 1,2) = 6,5^\circ\text{C}$. Необходимый расход холода для осушения рециркуляционного воздуха и поддержания относительной влажности воздуха в помещении музея на верхнем уровне по формуле (2) равен: $\Delta Q_{осуш} = 4,46 \cdot 1,2 (13-10,5) 2,5 = 33,5$ кВт. В результате такого расчета общий расход холода на охлаждение и осушение рециркуляционного воздуха в пиковых летних условиях и при учете самодостаточности объекта составит: $Q_x = 35 + 33,5 \approx 70$ кВт. Тепловлажностное отношение процесса охлаждения–осушения рециркуляционного воздуха при пиковой холодильной нагрузке в воздухоохладителе равно: $\varepsilon_{B,0} = Q_x / G_{вл,осуш} = 70 / [4,46 \cdot 1,2 (10,5-13) 10^{-3}] = 15700$ кДж/кг. Для достижения этого процесса достаточно холодной воды с температурами 5–10°С. Для подбора автономного кондиционера вычисляем отношение $\Delta i_{B,0} = Q_x / L_{реци} \rho_B = 70 / (4,46 \cdot 1,2) = 13$ кДж/кг, что потребует выбора оборудования одного из производителей.

Выбор нагрузки системы охлаждения школьных классов по фактическим временным рядам. Предлагаемая ниже методика выбора системы охлаждения школьных классов разработана на основе использования опытных данных, опубликованных в книге Д. Крума и Б. Робертса [5], п. 1.5, о связи максимальных наблюдаемых температур воздуха в школьных классах без вентиляции $t_{B,max}$ и соответствующих им максимальных температур наружного воздуха $t_{H,max}$ (рис. 3).

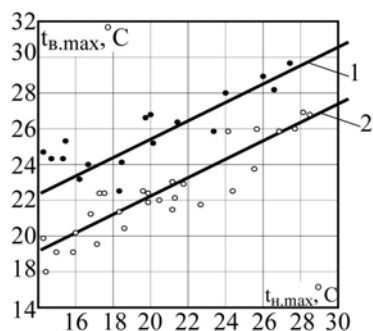


Рисунок 3. Опытные данные о связи максимальных наблюдаемых температур воздуха в школьных классах без вентиляции $t_{B,max}$ и соответствующих им максимальных температур наружного воздуха $t_{H,max}$. Обозначения: линия 1 – школьные классы с окнами, ориентированным на Ю-З и Ю-В; линия 2 – то же, ориентированными на С-З. При разной ориентации остекления по странам света усреднена зависимость максимумов исследованных температур в форме

$$\Delta t_{B,max} / \Delta t_{H,max} \approx 0,5.$$

Анализируя представленные на рис. 3 данные, обнаруживаем достаточно четкую взаимосвязь суточных максимумов этих температур. Разброс опытных точек относительно усредняющих прямых (линии 1 и 2), характеризующий корреляционную связь максимумов, можно считать небольшим. Не имея данных о помещениях классов, все же

используем эти зависимости для выбора удельного расхода холода, относя его к одному ученику, объему и площади ограждений, приходящихся на одного человека.

Пример 2. Вычислить удельный расход холода для СКВ в школьном классе, расходуемого на снижение температуры воздуха в помещении и на охлаждение подаваемого в объеме санитарной нормы наружного воздуха, используя данные рис. 3. Пусть удельная площадь пола на одного ученика составляет $F_{пл,уд}=1,5 \text{ м}^2/\text{чел}$, высота помещения $h=3 \text{ м}$, тогда удельный объем помещения $V_{пом,уд}=4,5 \text{ м}^3/\text{чел}$. Принимаем соотношение сторон класса lh и bh , в этом случае определяющий размер помещения $l_{ном}=V_{ном}/\Sigma F_{окр} \approx h/2=1,5 \text{ м}$, удельная площадь ограждений $F_{окр,уд}=V_{пом,уд}/l_{ном}=4,5/1,5=3 \text{ м}^2/\text{чел}$, из которых на окна приходится $F_{ок,уд}=0,2 \text{ м}^2/\text{чел}$, коэффициент теплопередачи окна $k_{ок}=2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Расчетную (оптимальную) температуру воздуха в помещении при использовании охлаждения воздуха в СКВ примем $t_B=24 \text{ °C}$, максимально наблюдаемую – без вентиляции класса (для линии 1 на рис. 3) примем $t_{B,max}=30 \text{ °C}$, что соответствует максимальной наружной температуре $t_{H,max}=30 \text{ °C}$. Удельный расход наружного воздуха на одного ученика примем $l_{H,уд}=30 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{чел})$. Теплофизические характеристики слоев ограждений (c_M, λ_M, ρ_M) примем теми же, что и в предыдущем примере, поэтому критерий $M=Bi^2 Fo=0,055 \tau$.

Определим удельный расход холода для момента времени $\tau=3 \text{ ч}$ после начала занятий в школе при $\tau_0=9 \text{ ч}$ на охлаждение воздуха помещения и ограждающих конструкций по формуле (1), записанной через удельные величины:

$$q_{x,уд} = Q_x / n_{чел} = (t_{B,max} - t_B) \left[k_{ок} F_{ок,уд} + \alpha_{K,ср} (1 - \theta_{нов}) \Sigma F_{окр,уд} + c_B \rho_B k_p (1 + 1/\tau) / 3600 \right] = \\ = (30 - 24) [2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,62 \cdot (3 - 0,2) + 1000 \cdot 1,2 \cdot 30 (1 + 1/3) / (4,5 \cdot 3600)] = 50 \text{ Вт} / \text{чел},$$

где коэффициент конвективного теплообмена принят $\alpha_{K,ср}=3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, а комплекс $1 - \theta_{нов}=0,43 M^{-0,2}=0,43(0,055 \cdot 3)^{-0,2}=0,62$. Дополнительно учтем холод на снижение температуры наружного воздуха до оптимальной температуры в помещении по формуле:

$$\Delta q_{x,уд} = \Delta Q_x / n_{чел} = L_{H,уд} c_B \rho_B (t_{H,max} - t_B) = 30 \cdot 1000 \cdot 1,2 (30 - 24) / 3600 = 50 \text{ Вт} / \text{чел}.$$

В итоге общий удельный расход холода на снижение температуры воздуха в помещении и охлаждение наружного воздуха без его осушения составит $q_x=50+50=100 \text{ Вт}/\text{чел}$ или, относя эту величину к площади пола, получаем $q_{x,F}=q_x/F_{пл,уд}=100/1,5=67 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

В заключение следует заметить, что такой метод расчета, основанный на фактических замерах температур в неветилируемом объекте, успешно конкурирует и заменяет традиционный расчет холодильной нагрузки на основе сложения всех составляющих теплопритоков и поэтому больше соответствует реально ожидаемой ситуации на объекте. По предложенной методике и данным из разных источников определены:

- фактические конвективные тепловыделения от людей и оргтехники;
- фактическая холодильная нагрузка жилого помещения;
- динамические характеристики разных помещений, как объектов поддержания температуры;
- обобщенные характеристики конвективного теплообмена на поверхностях помещения при разной кратности воздухообмена.

Литература

1. Андрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н., Егiazаров А.Г., Оленев В.А., Павлов А.В. Режимы работы вентиляционных систем в коровниках при переменных параметрах наружного воздуха. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1967. – № 2. – С. 6–9
2. Бодров В.И., Мовчанюк О.В. Энергоэффективность животноводческих зданий с естественной вентиляцией // С.О.К. – 2006. – №11. – С. 86–87.
3. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Высотные здания // АВОК. – 2004. – №1. – С. 8–18.
4. Бросалин В.А., Колмакова Е.А., Коркин В.Д. Особенности проектирования систем кондиционирования воздуха в реконструируемых общественных зданиях // Сборник докладов II съезда АВОК. – 1992. – Т. II. – С. 62 – 66.
5. Крум Д., Робертс Б. Кондиционирование воздуха и вентиляция зданий / Пер. с англ. Под ред. Карписа Е.Е. – М. : Стройиздат. – 1980. – 399 с.
6. Парк Ш. Система микроклимата для исторических зданий // АВОК. – 2000. – №1. – С. 22–33.
7. Olesen В.W. Показатели микроклимата помещений для проектирования зданий и расчета их энергетической эффективности. EN15251 // АВОК. – 2008. – №6. – С. 62–68.

* Анатолий Геннадиевич Сотников, Санкт-Петербург
Тел. раб.: +7(812)558-48-92; эл. почта: asotnikov2005@yandex.ru

Сотников А.Г. Мониторинг микроклимата – основа создания эффективных систем и здания с минимальным энергопотреблением