

Аналитическая методика определения наружных расчетных параметров в системах микроклимата зданий

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

Ключевые слова: параметры воздуха; наружная температура; кривая изменения; амплитуда; тренд; квантиль; объект; отклонение.

Наружные расчетные параметры (НРП) весьма важны для проектирования систем кондиционирования воздуха (СКВ), систем вентиляции (СВ) и систем отопления (СО) зданий разного назначения. Они являются основой для определения расчетных холодо- и теплопроизводительности систем, типоразмера соответствующего оборудования, а также влияют на капитальные и эксплуатационные затраты. Настоящая статья предлагает аналитическую методику определения НРП, отсутствующую в отечественной и зарубежной литературе.

Состояние вопроса и постановка задачи

Данная статья посвящена конкретной методике определения расчетной наружной температуры в теплое время года. Методики определения других параметров будут освещены в последующих статьях автора.

Обоснованная методика определения НРП – единственная отсутствующая аналитическая методика в вентиляционной технике, и ее разработка имеет большое экономическое значение как для России, так и для других стран. Такая методика, усовершенствованная в последующем, была представлена в работах автора [1 – п. 4.9, 2, 3]. Однако в таком виде методика противоречила СНиП, и автор предложил решение обратной задачи – о величине отклонений параметров в помещении при существующей методике нормирования [4]. Оценку этой методики можно найти в обзорной статье Е.В. Стефанова и В.Д. Коркина [5]: «Значительно улучшить не только энергетические, но и другие показатели СВ и КВ позволяет выбор рациональных режимов на базе научно обоснованных расчетных параметров наружного воздуха и требований к воздушной среде помещений. Известно, что трактовка расчетного состояния наружного воздуха современными нормами недостаточно совершенна. Ныне уже есть опыт, дающий возможность не только обоснованно подходить к выбору расчетного состояния наружного воздуха, но и учитывать теплофизические и технологические характеристики объектов и систем. Работы по совершенствованию нормирования наружного климата продолжаются в ЛТИХП совместно с ГГО им. А.И. Воейкова».

Основным толчком к разработке методики нормирования НРП послужило начало серийного производства центральных кондиционеров на крупнейшем Харьковском заводе «Кондиционер» в конце 50-х гг. XX века. Тогда же появилась первая официальная информация в отечественной литературе об этой проблеме [6], хотя публикации на эту тему можно найти еще раньше, в работах 1930-х гг.

Во всех ведущих странах уже многие десятилетия НРП находят, исходя из произвольно (а не расчетно) выбираемой обеспеченности (вероятности непревышения) наружной температуры по сухому и мокрому термометрам*. Подчеркнем тот факт, что величина отклонения и вероятность его превышения пропорционально связаны. Например, в комфортных системах обе величины имеют большие значения, а в специальных технологических – меньшие. В нашей стране в теплое время года принимают обеспеченность $p=0,95$ (так называемые параметры «А» для систем вентиляции), чему соответствует средняя продолжительность превышения $(1-0,95) \cdot 8766 \approx 440$ ч/год. Для систем комфортного кондиционирования принимают параметры «Б» $p=0,98$, этому соответствует средняя продолжительность превышения $(1-0,98) \cdot 8766 \approx 176$ ч/год.

* Подробные данные о наружных температурах при необеспеченности 0,4; 1 и 2% для городов США и других стран мира можно найти в справочнике ASHRAE, 2001, Fundamentals, CHAPTER 27 «Климатическая информация», табл. 1А и 1В, с. 27.6...27.53.

Для специальных систем технологического кондиционирования и особо ответственных объектов, где отклонения параметров могут привести к браку весьма дорогостоящей продукции, принимают более высокие параметры, вплоть до абсолютно максимальных при $p=1,0$ (бывшие параметры «В»). Так, например, было в прецизионных СКВ для оптики (дифракционные решетки), для точного машиностроения (делительные линейки), для выделки дорогих мехов, когда допустимые отклонения температуры составляли десятые и даже сотые доли градуса, а отклонения влажности – 1–2%. Эффект нормирования параметров определяет качество продукции и количество в ней брака.

В период 60-х годов XX века НРП получали разные названия: класс 0, 200 и 400; класс I, II и III; параметры А, Б и В и небольшие уточнения.

Отечественный необоснованный и неаналитический принцип определения НРП, естественно, вызывал критику со стороны многих отечественных ученых на протяжении всего XX века. Следует отметить работы Г.И. Волкова (1938); К.Н. Варенцова (1939); В.А. Розена (1939); Л.Б. Успенской и Л.Е. Анапольской (1957) [7, 8]; Л.Б. Успенской и Б.Н. Юрманова (1959) [9]; Я.С. Гречаника (1961); В.А. Бараца (1961); П.И. Андреева и В.И. Мошкина (1961); А.Я. Креслянина (1964, [10]); Н.Н. Разумова, Ф.В. Ушкова и И.С. Шаповалова (1965); М.А. Михайлянца (1969); М.Н. Тертерова (1969); А.В. Пузырева (1969) [11]; В.Н. Богословского совместно с В.П. Титовым (1969) [12], Е.Г. Гречушниковой (1969), Е.Г. Малявиной (1975) [13], Ю.Я. Кувшиновым (1982); Р.Д. Октябрьского (1976) [14]; С.Н. Ефремова (1976); А.Г. Сотникова (1982); Н.В. Кобышевой и В.Э. Нициса (1983); Е.В. Стефанова и В.Д. Коркина (1985); А.А. Рымкевича (1990); А.Д. Кривошеина (1990) и других¹. После 90-х гг. XX века, как и во всей технической науке, число публикаций резко уменьшилось, а их уровень заметно снизился.

Основные и наиболее существенные признаки применяемой методики нормирования НРП:

- нормирование двух параметров (t_n , i_n или t_b , $t_{b,m}$) как независимых, хотя один из них аналитически связан с другим (энтальпия наружного воздуха зависит от его температуры и влагосодержания);
- разный принцип нормирования НРП в теплое и холодное время года;
- неучет взаимосвязи совместного суточного хода температуры и энтальпии наружного воздуха в летних расчетных условиях;
- неучет разной доли расхода наружного воздуха в приточном, как наиболее существенного фактора, влияющего на нормирование, см. формулы (5)–(9);
- отсутствие методики нормирования влагосодержания наружного воздуха в теплый период года как основного параметра для расчета вентиляции водных объектов, катков и спортивных арен в режиме льда;
- учет разной обеспеченности p (вероятности превышения), отнесенной к году или зимним месяцам, одному жаркому месяцу, наиболее холодной пятидневке и т.п.

Аналогичные принципы нормирования НРП традиционно применяют уже долгое время в Европе и Америке [15 – 21].

Краткая оценка и анализ публикаций по совершенствованию выбора НРП

Эффективно обобщить имеющиеся публикации по этой проблеме удастся только в том случае, если использовать системный подход: тогда высказанные предложения окажутся не случайными, а системно обоснованными. Важно отметить, что ни в одной из работ, критикующих те или иные особенности выбора НРП, не предложено альтернативной методики, лишенной недостатков существующей. В представленных работах не обнаружено аналитических зависимостей для НРП, комплексно учитывающих ряд факторов и параметров, в том числе:

- заданные гигиенические и технологические отклонения параметров воздушной среды помещений ($\Delta t_{в,доп}$, $A_{в,доп}$, $\Delta d_{в,доп}$, $A_{d,доп}$, $\Delta \phi_{в,доп}$, $A_{\phi,доп}$);
- ход *пиковых* летних и зимних параметров наружного воздуха, их представление трендом (средним) и суточной гармоникой и др.;

¹ Названия упомянутых статей и журнальную адресацию можно найти в библиографии гл. 3 т. I книги автора [2].

- суммарную или же непрерывную продолжительность летних нарушений (многочисленные, но короткие отклонения за ряд суток неравноценны по своему воздействию длительным непрерывным отклонениям, которые наблюдались, например, летом 2010 года);
- технологическую схему системы; аппараты, используемые для тепловлажностной обработки воздуха в теплое и холодное время года;
- долю наружного воздуха, используемую в системе в *пиковых* летних и зимних условиях ($\bar{G}_n = G_n / G_{np} = 0,1 \dots 1$);
- статические и динамические характеристики элементов (звеньев) такой системы – объектов поддержания температуры и влажности;
- описания *краев распределений* – летних максимумов температуры наружного воздуха $t_{n,max}(p)$, влагосодержания наружного воздуха $d_{n,max}(p)$ в зависимости от обеспеченности p в разных городах (см. далее рис. 2).

Аналитическое решение задачи можно получить при наличии всех этих данных и составлении соответствующих уравнений. Для решения такой задачи потребовалось провести специальные исследования и собрать недостающий материал. В частности, сведения о видах и способах определения статических и амплитудных отклонений параметров, допустимых для жизнедеятельности человека и протекания различных технологических процессов, хотя и известны, но в значительной степени отрывочны, и поэтому требуют систематизации и обобщения. Также требуют сбора и систематизации аналитические зависимости для статических и динамических характеристик всех звеньев (элементов) СКВ, например, помещения, воздухонагревателя и воздухоохладителя-осушителя, увлажнителя, камеры смещения, протяженного неизолированного воздуховода и др. Существенны частоты (периоды), с которыми происходят изменения наружных параметров, обычно это сутки. В ходе общей постановки задачи необходимо найти, обработать и обобщить климатологическую информацию, которая описывает пиковый ход наружных параметров летом и зимой.

По нашему мнению, существующая методика имеет, помимо указанных, ряд других недостатков. Так, например, выбор энтальпии воздуха в качестве второго нормируемого параметра является неудачным, т. к. это сложный параметр, зависящий от двух простых абсолютных параметров – температуры и влагосодержания. Кроме того, для энтальпии не может быть задано допустимое отклонение. В методике должно быть строго обосновано, какая пара параметров должна нормироваться. Нормирование энтальпии наружного воздуха в холодное время года для северных регионов представляется избыточным, т.к. при малом влагосодержании наружного воздуха его энтальпия численно близка температуре ($i_n \approx c_v t_n$). Не во всех случаях можно получить в доступной форме статическую характеристику такого аппарата, как охладитель-осушитель воздуха, при разном соотношении холода на эти совместно происходящие процессы и с учетом способа управления: расходом или температурой холодной воды, байпасированием воздуха.

Разный принцип определения НРП: в теплый период года принят по обеспеченности (вероятности неперевышения), а в холодный – по квантилю (физической величине, характеризуемой вероятностью) усредненных температур (наиболее холодной пятидневки при обеспеченности $p=0,92$ или $p=0,98$, наиболее холодных суток), что учитывает особенности процесса компенсации теплопотерь здания системой отопления, в частности, его инерционность. При одинаковой производительности системы, но разных расходах наружного воздуха (от 10% до 100%) с увеличением этого процента линейно возрастает влияние наружной среды на возникающее отклонение температуры в помещении, что должно быть учтено, так как это приводит к существенно разным НРП по температуре воздуха и его влагосодержанию.

О возможности оптимизации НРП

В общей постановке этой задачи как оптимизационной нужно учитывать минимум приведенных затрат по основному технологическому процессу, требующему определенных параметров воздушной среды, и системе кондиционирования, которая обеспечивает эти параметры. Однако в настоящее время трудно найти надежные данные о продукции, ее качестве и количестве брака в зависимости от отклонений параметров в помещении и их обеспеченности. Поэтому будем полагать, что технологический процесс или комфортные условия регламентируют параметры, их отклонения и обеспеченность (вероятность неперевышения). В дальнейшем, при наличии подобных данных относительно различных производств, можно ставить и более общую задачу определения оптимальных НРП.

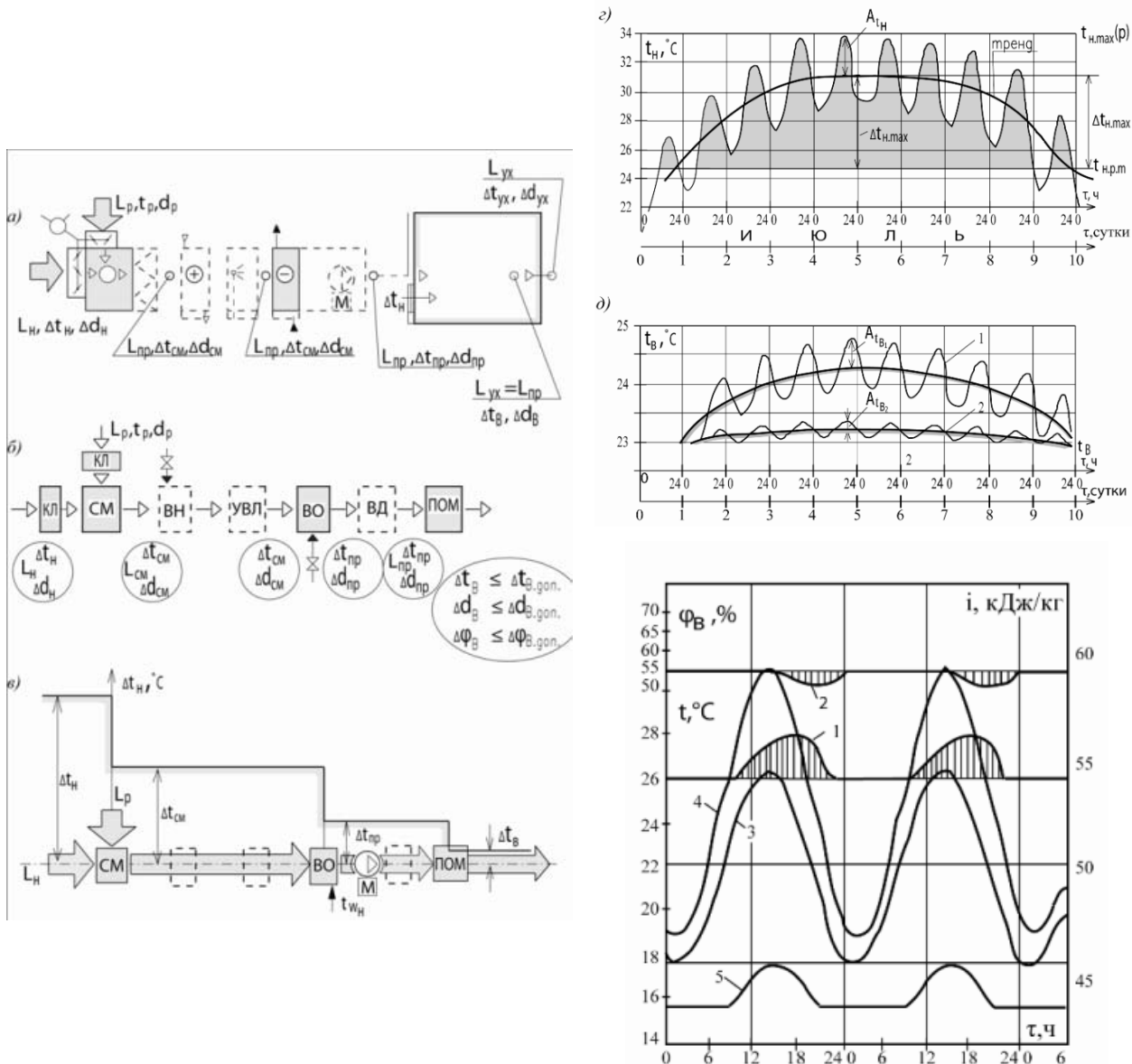


Рисунок 1. Комплекс зависимостей, используемых для теоретического обоснования методики определения НРП:

- а) технологическая (функциональная) схема системы кондиционирования с указанием аппаратов, используемых в теплое время года (сплошные) и аппаратов, используемых в холодное время года (пунктир);**
- б) структурная схема системы кондиционирования, соответствующая ее технологической схеме на рис. 1, а; система автоматизации не показана, т.к. управляющее воздействие при пиковых наружных параметрах выше НРП исчерпано;**
- в) график уменьшения начального превышения температуры наружного воздуха над расчетным значением после камеры смешения, воздухоохладителя и в помещении;**
- г) характерный график изменения пиковых летних температур, где температура представлена как сумма тренда (устойчивого среднего) и суточной гармоники ее колебания;**
- д) характерный график изменения пиковых летних температур в помещении:**
 - 1 – при относительном расходе наружного воздуха $\bar{L}_H = 1$;**
 - 2 – при относительном расходе наружного воздуха $\bar{L}_H = 0,1$;**
- е) график взаимосвязанного изменения температуры (1), относительной влажности воздуха (2) в производственном помещении при периодическом суточном изменении температуры (3) и энтальпии (4) наружного воздуха, а также температуры приточного воздуха (5) в случае, когда наружные температура и энтальпия превышают значения, принятые за расчетные (по данным А.В. Пузырева [11])**

Вывод аналитических зависимостей

Рассмотрим вывод аналитических зависимостей на основе технологической (функциональной) схемы некоторой СКВ (рис. 1, а) и соответствующей ей структурной схемы (рис. 1, б), как это принято в теории автоматического регулирования.

Рассмотрим технологическую схему некоторой СКВ (рис. 1, а, б). В *пиковых* условиях теплого времени года используют только воздухоохладитель, но количество холода выше расчетного получить нельзя. Аналогично в холодный период года используют воздухонагреватель и увлажнитель, при этом количество теплоты увеличить нельзя.

Известны параметры воздуха в помещении, кроме того, известно допустимое статическое (т.е. в установившемся процессе) и амплитудное отклонение температуры и относительной влажности. Заметим, что при известной температуре воздуха t_b отклонение влажности $\Delta\varphi_{в,доп}$ можно заменить соответствующей величиной отклонения влагосодержания $\Delta d_{в,доп}$. Так, например, при $t_b=20$ °С, $\varphi_b=50$ % и $\Delta\varphi_{в,доп}=7$ % по диаграмме $i-d$ или таблицам определяем, что $\Delta d_{в,доп}=1$ г/кг.

Предполагаем, что известна обеспеченность p отклонений параметров в помещении на основе допустимого брака технологической продукции или по гигиеническим требованиям. Этой обеспеченности приписываем выбираемые наружные экстремальные параметры $t_{н,макс}(p)$ и $d_{н,макс}(p)$. Как пример такой зависимости на рис. 2 приведены графики, описывающие степенной зависимостью *края распределений* температуры наружного воздуха в теплый (индекс Т) и холодный (индекс Х) периоды года, его влагосодержания и энтальпии в функции от обеспеченности p (по данным, полученным в ГГО им. А.И. Воейкова).

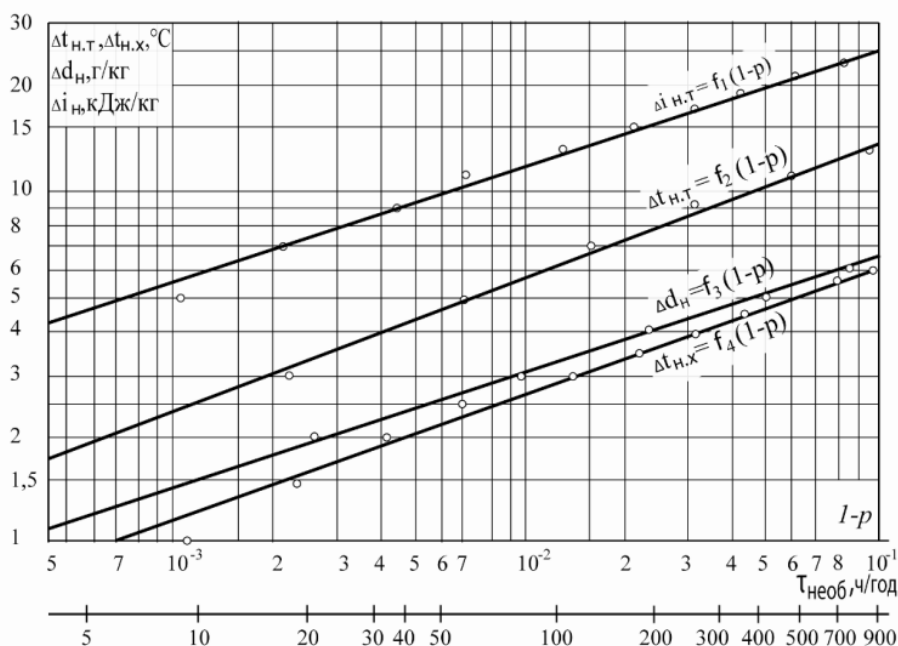


Рисунок 2. Зависимости, описывающие суммарную повторяемость краев распределений температуры наружного воздуха в теплый (индекс Т) и холодный (индекс Х) периоды года, его влагосодержания и энтальпии в функции от необеспеченности $(1-p)$

В структурную схему системы кондиционирования входит и управляющая часть. Однако в решаемой задаче при параметрах наружного воздуха, превышающих расчетные (выше летом и ниже зимой), величина управляющего воздействия – расхода или температуры хладо- или теплоносителя – увеличена быть не может. Поэтому в решаемой задаче управляющее воздействие есть, однако в *пиковых* условиях оно *исчерпано*, и система автоматического регулирования *разомкнута*.

Для решения поставленной задачи в расчетных условиях теплого времени года следует нормировать два параметра, удовлетворяющие нескольким требованиям, – температуру и влагосодержание. Во-первых, они простые, абсолютные и аналитически независимые друг от друга, имеющие *свои* уравнения баланса теплоты или массы. Во-вторых, эти параметры не зависят от *перекрестных* нагрузок: температура не зависит от влаговывделений, а влагосодержание – от тепловывделений.

Расчетная наружная температура в теплое время года

Выбрать расчетную наружную температуру (НРТ) в теплое время года – это значит найти такое значение $t_{нрт}$, превышение которого:

$$\Delta t_n(\tau) = \Delta t_{н.тр}(\tau) + A_{t_n} = t_{н.макс}(p) - t_{нрт}, \quad (1)$$

состоящее из тренда (устойчивого среднего) $\Delta t_{н.тр}(\tau)$ и амплитуды суточной гармоника A_{t_n} , с учетом их уменьшения (затухания) во всех существенных звеньях системы (рис. 1, в) приведет к повышению температуры воздуха в помещении $\Delta t_b(\tau)$, согласно рис. 1, д, не более допустимого.

В качестве звеньев системы, где происходит уменьшение отклонений температуры, рассматривают камеру смешения, воздухоохладитель, воздуховод (если он длинный по калибрам l/d) и помещение. Заметим здесь, что как текущая температура воздуха $t_b(\tau)$, в общем меняющаяся упорядоченно, так и ее отклонение $\Delta t_b(\tau)$ от заданного значения зависят от случайных величин $t_{н.макс}(p)$ и $A_{t_n}(p)$, и поэтому тоже случайны. Например, при выборе в качестве максимальной температуры $t_{н.макс}$ в Санкт-Петербурге абсолютно максимального значения ($p=1$) $t_{н.абс.макс}=34^\circ\text{C}$ [22] вычисляемая расчетная температура будет содержать известный запас, что важно при жестких технологических требованиях. При комфортных условиях можно принять температуру, меньшую абсолютного максимума, например, $t_{н.макс}(p=0,9998)=30^\circ\text{C}$ по данным [23]. Различие этих температур оказывается заметным.

Вспользуемся графической интерпретацией объясняемого явления (рис. 1, в, г). Рассмотрим ход температуры наружного воздуха за несколько суток в *пиковых* летних условиях. Его характеризует сначала плавное повышение тренда, его постоянство, а через несколько суток плавное понижение средней температуры (тренда), относительно которой отмечены суточные колебания температуры, близкие к гармоническим, с амплитудой A_{t_n} . Тепловое возмущение, вносимое в систему с наружным воздухом и не компенсируемое соответствующим расходом холода, пропорционально текущей разности температур $\Delta t_{н.р}(\tau) = t_n(\tau) - t_{нрт}$ и доле наружного воздуха в смеси с рециркуляционным $\bar{L}_n = L_n / L_{тр} = 0 \dots 1$. Это возмущение при $\bar{L}_n = 1$ характеризует заштрихованная площадь на рис. 1, г. Будем искать общее изменение температуры воздуха в помещении как результат наложения этих двух составляющих – тренда, описываемого в возрастающей части приближенной экспонентой

$$\Delta t_{н.тр}(\tau) = 1 - \exp(-\tau / T_{тр}) \quad (2)$$

и суточной гармоникой

$$\Delta t_n(\tau) \approx A_{t_n} \cos[2\pi(\tau - \tau_0) / 24]. \quad (3)$$

Постоянную времени *длинного* тренда примем $T_{тр} = 1 \dots 1,5$ суток, что позволяет подъем средней температуры считать протекающим за время $\tau = 4 \dots 6$ суток, после чего она будет постоянной или будет снижаться. Воздействие на объект, находящийся в помещении (человека, деталь, изделие и др.), этих двух отклонений будет эквивалентным при условии их сложения по соотношению:

$$\Delta t_{в.экв} = \Delta t_{в.тр} + A_{t_b} / \sqrt{T_0^2 \omega^2 + 1}, \quad (4)$$

где T_0 – так называемая постоянная времени объекта, воспринимающего это отклонение температуры. Наиболее сложно эта величина определяется для человека, но при медленных (суточных) колебаниях температуры вполне допустимо приравнять амплитудное отклонение к статическому. Для других объектов стабилизации температуры (детали, изделия и т.п.) в форме пластины при двустороннем воздействии на нее принимают $T_0 = c_m \rho_m \delta_m / 2\alpha_k$, аналогично для цилиндра, когда вместо δ_m подставляют диаметр d_m .

Выведем выражение для искомого отклонения температуры воздуха в помещении при возмущении, вносимом наружным воздухом. Максимальное статическое отклонение температуры воздуха можно получить из уравнения теплового баланса при времени, когда средняя температура (тренд) устанавливается:

$$\Delta t_{н.р} \mathcal{K}_{см} \mathcal{K}_{во} L_{пр} c_{в.р} \left[1 - \exp(-\tau / T_{тр}) \right] = \Delta t_{в.макс} \left[\alpha_{к.сп} \sum F_{огр} (1 - \theta_{пов}) + k_p V_{пом} c_{в.р} / 3600 \right], \quad (5)$$

Сотников А.Г. Аналитическая методика определения наружных расчетных параметров в системах микроклимата зданий

где $\Delta t_{н.р} = t_{н.маx}(p) - A_{t_n} - t_{нрт}$ – расчетная разность температур вносимого трендом и не компенсируемого холодом температурного возмущения. Например, при существующем нормировании для Санкт-Петербурга² при $t_{н.маx}(p)=34^\circ\text{C}$, $A_{t_n}^* = 8,7/2 = 4,35^\circ\text{C}$ и $t_{нрт}=24,6^\circ\text{C}$ превышение температуры $\Delta t_{н.р}=34-4,35-24,6=5^\circ\text{C}$; $\mathcal{K}_{см} = \Delta t_{см}/\Delta t_{н} = L_{н}/L_{пр} = 0...1$ – коэффициент передачи, иначе статическая характеристика камеры смешения, как звена САР; $\mathcal{K}_{во} = \mathcal{K}_{вн} = \Delta t_{к}/\Delta t_{см}$ – коэффициент передачи, иначе статическая характеристика воздухоохладителя или воздухонагревателя, как звена САР, определяемая через эффективность процесса в аппарате; например, $\mathcal{K}_{во} = 1 - \theta_{во}$, где $\theta_{во} = (t_{н} - t_{к}) / (t_{н} - t_{вн}) < 1$; $T_{тр}$ – постоянная времени приближенно-экспоненциального положительного (растущего) тренда, $\theta_{пов} = \Delta t_{в.пов} / \Delta t_{в} = f(\text{Bi}^2 \text{Fo})$ – относительное изменение температуры поверхности.

Относительное повышение температуры воздуха в помещении в долях от начального температурного возмущения, вносимого в систему и в помещение наружным воздухом, после несложных преобразований можно представить в виде:

$$\frac{\Delta t_{в.маx}}{t_{н.маx}(p) - t_{нрт} - A_{t_n}} = \mathcal{K}_{см} \mathcal{K}_{во} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T_{тр}}\right) \right] \left[1 + \frac{3600 \alpha_k \sum F_{огр} (1 - \theta_{пов})}{L_{пр} c_v \rho_v} \right]^{-1}. \quad (6)$$

После замены $L_{пр} = k_p V_{пом}$ и $\sum F_{огр} = V_{пом} / l_{пом}$ и подстановки $c_v = 1000$ Дж/(кг·°C) и $\rho_v = 1,2$ кг/м³ в окончательном виде можно записать:

$$\frac{\Delta t_{в.маx}}{t_{н.маx}(p) - t_{нрт} - A_{t_n}} = \mathcal{K}_{см} \mathcal{K}_{во} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T_{тр}}\right) \right] \left[1 + \frac{3 \alpha_k (1 - \theta_{пов})}{k_p l_{пом}} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Искомая наружная расчетная температура за время подъема тренда при $\tau = 4...5$ суток и $\exp(-\tau/T_{тр}) = 0$ определяется по зависимости:

$$t_{нрт} = t_{н.маx}(p) - A_{t_n} - (\Delta t_{в.доп} - A_{t_v}) \left[1 + \frac{3 \alpha_k (1 - \theta_{пов})}{k_p l_{пом}} \right] / \mathcal{K}_{см} \mathcal{K}_{во}. \quad (8)$$

Если учитывать амплитуду суточных колебаний температуры наружного воздуха A_{t_n} , безинерционность камеры смешения и малую инерционность поверхностного аппарата (воздухоохладителя) по сравнению с периодом суток, то амплитуду суточных колебаний температуры воздуха в помещении можно определить по зависимости:

$$A_{t_v} = \mathcal{K}_{см} \mathcal{K}_{во} \bar{A}_{t_{пом}} A_{t_n}, \quad (9)$$

где $\bar{A}_{t_{пом}}$ – относительное затухание суточных температурных колебаний в помещении по отношению к амплитуде колебаний температуры приточного воздуха $A_{t_{пр}}$, определяется по формуле, аналогичной последнему множителю формулы (8):

$$\bar{A}_{t_{пом}} = \frac{A_{t_v}}{A_{t_{пр}}} = \left[1 + \frac{3 \alpha_k (1 - \bar{A}_{t_{пов}})}{k_p l_{пом}} \right]^{-1}, \quad (10)$$

и вычисляется по методике А.В. Лыкова [24] на основе обобщенного аргумента – критерия Био для стационарно-периодического процесса:

$$\text{Bi}^* = \alpha_k / \sqrt{\lambda_m c_m \rho_m \omega_{сут}}, \quad (11)$$

где $\omega_{сут}$ – круговая частота суточных колебаний, $\omega_{сут} = 2\pi/24 = 0,262$ ч⁻¹ = $0,73 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹. Эта зависимость показана на рис. 3.

² Согласно табл. 2* (столбец 7 СНиП 23-01-99*) за амплитуду суточных колебаний в климатологии принята разность между средним максимумом и средним минимумом температуры наиболее теплого месяца года, что в два раза больше, чем амплитуда, принятая в математике и механике. Строго говоря, амплитуда в математике описывает гармоническую функцию, а не наибольшее отклонение от среднего для произвольной периодической кривой.

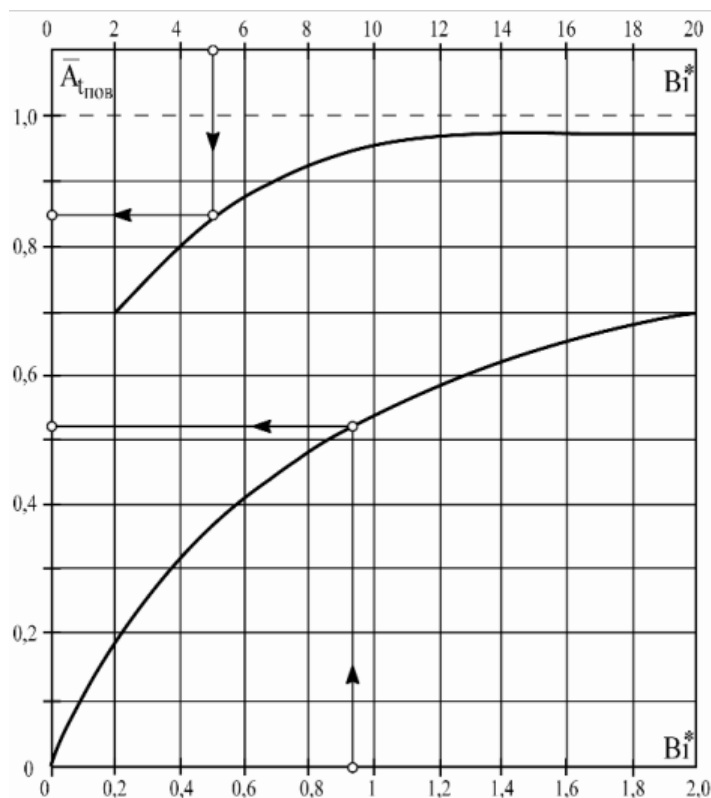


Рисунок 3. Зависимость относительного затухания температурных колебаний

$\bar{A}_{t_{пов}} = A_{t_{в.пов}} / A_{t_{в}} < 1$ от обобщенного критерия Bi^* по методике А.В. Лыкова [24]

Из-за ограниченности объема статьи из всех возможных приведем только один пример расчета НРТ.

Расчетный пример

Определить НРТ в теплый период года на основе аналитической методики для условий Санкт-Петербурга, если допустимое повышение температуры в комфортной прямоточной СКВ для офиса класса «А» составляет $\Delta t_{в.дол} = 0,5^\circ\text{C}$. Допустимую необеспеченность принять $1-p=0$, чему соответствует наружная температура $t_{н.абс\ max}(p=1) = 34^\circ\text{C}$, амплитуда наружной температуры $A_{t_{н}} = 3^\circ\text{C}$. Амплитуда по формуле (9) $A_{t_{в}} = 0,25^\circ\text{C}$, $\theta_{пов} = 0,26$, коэффициент передачи воздухоохладителя $\mathcal{K}_{во} = 0,2$, камеры смешения – $\mathcal{K}_{см} = 1$. Другие величины: $k_p = 4\ \text{ч}^{-1}$, $l_{пом} = h_{пом}/2 = 1,5\ \text{м}$, $\alpha_{к.ср} = 2\ \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Искомая наружная расчетная температура, определенная по формуле (8) при $p=1$, будет равна: $t_{нрт} = (34-3) - (0,5-0,25)/0,2 \cdot 1 \cdot (1+3 \cdot 2 \cdot 0,26/4 \cdot 1,5)^{-1} = 28,4^\circ\text{C}$. Как видно из этого примера, методика расчета учитывает многие параметры системы, разную обеспеченность, допустимое повышение температуры и может приводить к результату, существенно отличающемуся от нормируемой СНиП 23-01-99* температуры $t_{нрт} = 24,6^\circ\text{C}$ в ту или иную сторону. В результате потребуется другой – больший или меньший расчетный расход холода.

Окончание данного исследования будет опубликовано в последующих статьях автора.

Заключение

Стохастические флуктуации температурно-влажностных параметров, тенденция потепления климата (экстремально жаркое лето 2010 г.), коммерциализация систем микроклимата, повышенные запросы частных инвесторов – все это привлекает к общей проблеме обеспеченности и нормирования наружных параметров постоянное внимание. Вместо принятого во многих странах, в том числе и в России, выбора НРП по квантилям в статье приводится другая аналитическая методика, основанная на полном комплексе климатологических, гигиенических, технологических, статических и динамических характеристик и параметров рассматриваемой системы.

Сотников А.Г. Аналитическая методика определения наружных расчетных параметров в системах микроклимата зданий

Литература

1. Сотников А.Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции. Л.: Машиностроение, 1984. 240 с.
2. Сотников А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Полный комплекс требований, исходных данных и расчетной информации для СО, СПВ, СКВ, СХС и СГВС. СПб. В 2-х томах. Береста, 2013. Т. I. 416 с. Т. II 432 с.
3. Сотников А.Г. Основные требования к расчетным наружным параметрам для систем кондиционирования воздуха // Труды симпозиума «Строительная климатология». М.: Гидрометеиздат, 1982. С. 239–245.
4. Сотников А.Г. Расчет отклонений параметров в помещении при летних и зимних нарушениях // Холодильная техника. 1986. № 8. С. 32–34.
5. Стефанов Е.В., Коркин В.Д. Пути совершенствования систем вентиляции и кондиционирования воздуха // В кн.: Повышение энергетической эффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Л.: ЛДНТП, 1985. С. 3–9.
6. Куранов И.Н. К выбору расчетных параметров наружного воздуха для систем кондиционирования воздуха // Техническая информация. Сб. 1 (11). М.: Главстройпроект, 1962. С. 15 – 25.
7. Успенская Л.Б. Расчетные наружные условия для систем кондиционирования воздуха и вентиляции // Водоснабжение и санитарная техника. 1957. № 9. С. 10 – 12.
8. Успенская Л.Б., Анапольская Л.Е. Выбор расчетных параметров наружного воздуха для систем кондиционирования и вентиляции // В кн.: Вопросы проектирования и монтажа санитарно-технических систем. Вып. 36. Л.: ВНИИГС, 1973. С. 37–48.
9. Успенская Л.Б., Юрманов Б.Н. Расчет систем кондиционирования воздуха по теплосодержанию наружного воздуха в летний период // Водоснабжение и санитарная техника. 1959. №8. С. 18–20.
10. Креслинь А.Я. Верхняя граница расчетного климата // В кн.: Кондиционирование воздуха. М.: Стройиздат, 1966. С. 201–210.
11. Пузырев А.В. Анализ работы установок кондиционирования при параметрах наружного воздуха выше расчетных // Сб. трудов ВЦНИИ охраны труда. М.: Профиздат, 1969. Вып. 61. С. 11–23.
12. Богословский В.Н., Кувшинов Ю.Я., Малявина Е.Г. Климатологическое обеспечение проектирования и эксплуатации зданий с эффективным использованием энергии // В кн.: Строительная климатология. Труды симпозиума. Ч. I. М.: 1982. С. 45–61.
13. Богословский В.Н., Малявина Е.Г., Балиньски В. Расчетные характеристики климата с учетом коэффициента обеспеченности // Водоснабжение и санитарная техника. 1980. № 3. С. 11–13.
14. Октябрьский Р.Д. Выбор расчетной температуры и энтальпии наружного воздуха для систем вентиляции и кондиционирования воздуха // Водоснабжение и санитарная техника. 1976. № 5. С. 34–35.
15. ASHRAE. 1995a. Design data for the 1%, 2½%, and 5% occurrences of extreme dew point temperature, with mean coincident dry-bulb temperature. Research Report RP-754.
16. ASHRAE. 1995b. Weather data sets for ASHRAE research. Research. Report RP-889.
17. ASHRAE. 1997c. Updating the tables of design weather conditions in the. ASHRAE Handbook of Fundamentals. Research Report RP-890.
18. Colliver D.G., Zhang H., Gates R.S., Priddy K.T. Determination of the 1%, 2.5%, and 5% occurrences of extreme dew-point temperatures and mean coincident dry-bulb temperatures // ASHRAE Transactions. 1995. No.101(2). Pp. 265-86.
19. Colliver D.G., Gates R.S., Zhang H., Priddy K.T. Sequences of extreme temperature and humidity for design calculations // ASHRAE Transactions. 1998. No.104(1a). Pp. 133-44.
20. Colliver D.G., Gates R.S., Burkes T.F., Zhang H. Development of the design climatic data for the 1997 ASHRAE Handbook–Fundamentals // ASHRAE Transactions. 2000. No.106(1). Code 57238.
21. Crawley D.B. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? // ASHRAE Transactions. 1998. No.104(2). Pp. 498-515.
22. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. М.: Госстрой России, 2003. 69 с.
23. СНиП II-A.6–72. Строительная климатология и геофизика. М.: Стройиздат, 1973. 319 с.
24. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

**Анатолий Геннадиевич Сотников, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)347-33-92; эл. почта: asotnikov2005@yandex.ru*