

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 с 60-х годов XX века и до наших дней НРП получали разные названия: класс 0, 200 и 400; класс I, II и III; параметры А, Б и В, а также 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 на эту тему 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 неперевышения), 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:

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

- заданные гигиенические и технологические отклонения параметров воздушной среды помещений ($\Delta t_{e,\text{доп}}$, $A_{t_{e,\text{доп}}}$, $\Delta d_{e,\text{доп}}$, $A_{d_{e,\text{доп}}}$, $\Delta \varphi_{e,\text{доп}}$, $A_{\varphi_{e,\text{доп}}}$);
- ход *пиковых* летних и зимних параметров наружного воздуха, их представление трендом (средним) и суточной гармоникой и др.;
- 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 ($\overline{G_n} = G_n / G_{np} = 0,1 \dots 1$);
- статические и динамические характеристики элементов (звеньев) такой системы – объектов поддержания температуры и влажности;
- описания *краев распределений* – летних максимумов температуры наружного воздуха $t_{n,\text{max}}(p)$, влагосодержания наружного воздуха $d_{n,\text{max}}(p)$ 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 смешения, 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 ($i_n \approx c_{в} t_n$). 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, характеризующей вероятностью) усредненных температур (наиболее холодной пятидневки при обеспеченности $p = 0,92$ или $p = 0,98$, наиболее холодных суток), что учитывает особенности процесса компенсации теплотеря 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.

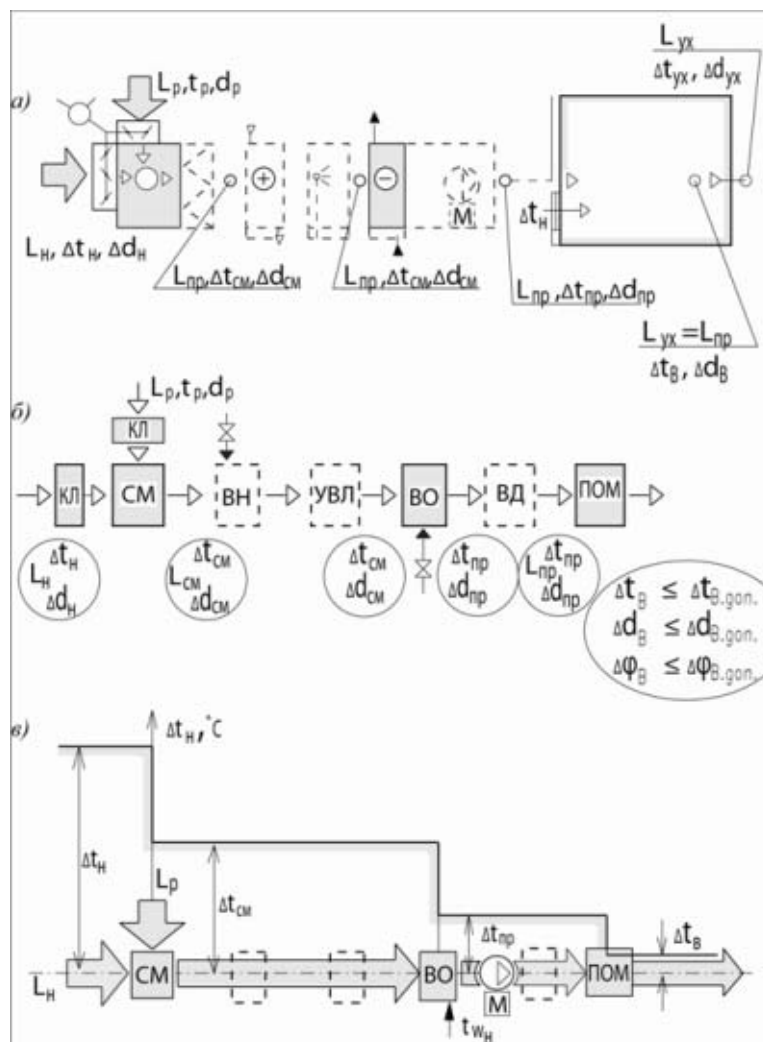


Рисунок 1. Комплекс зависимостей, используемых для теоретического обоснования методики определения НРП:

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

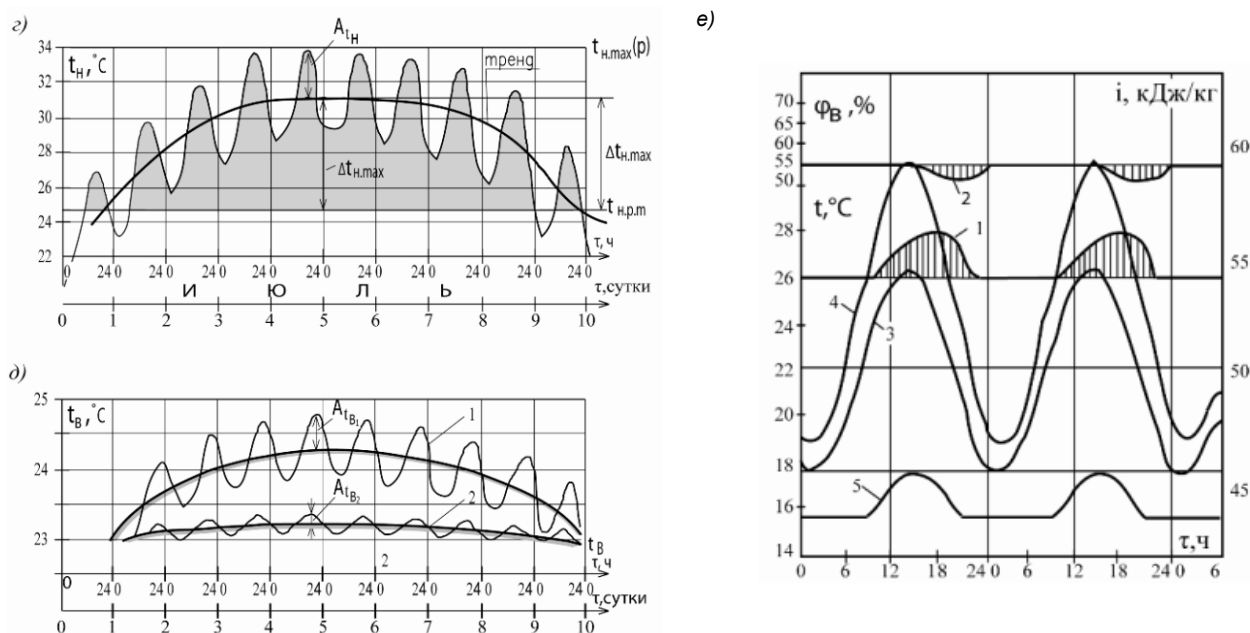


Рисунок 1. Комплекс зависимостей, используемых для теоретического обоснования методики определения НРП:

а) характерный график изменения *пиковых* летних температур, где температура представлена как сумма тренда (устойчивого среднего) и суточной гармоники ее колебания;
б) 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 $t_{в}$ отклонение влажности $\Delta \varphi_{в, доп}$ можно заменить соответствующей величиной отклонения влагосодержания $\Delta d_{в, доп}$. Так, например, при $t_{в} = 20$ °C, $\varphi_{в} = 50$ % 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 $t_{н, max}(p)$ и $d_{н, max}(p)$. 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).

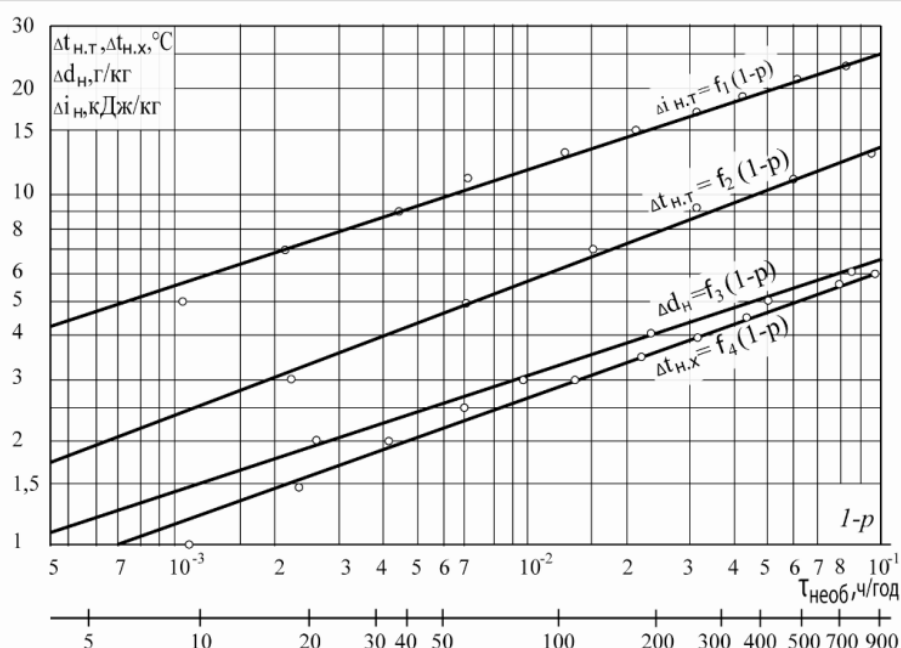


Рисунок 2. Зависимости, описывающие суммарную повторяемость краев распределений температуры наружного воздуха в теплый (индекс Т) и холодный (индекс Х) периоды года, его влагосодержания и энтальпии в функции от необеспеченности (1-p)

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 влаговыделений, а влагосодержание – от тепловыделений.

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:

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

состоящее из тренда (устойчивого среднего) $\Delta t_{н,тр}(\tau)$ и амплитуды суточной гармоника $A_{t_{н}}$, с учетом их уменьшения (затухания) во всех существенных звеньях системы (рис. 1, в) приведет к повышению температуры воздуха в помещении $\Delta t_{в}(\tau)$, 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 $t_{в}(\tau)$, в общем меняющаяся упорядоченно, так и ее отклонение $\Delta t_{в}(\tau)$ от заданного значения зависят от случайных величин $t_{н,макс}(p)$ и $A_{t_{н}}(p)$ 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.

Воспользуемся 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 $\bar{L}_n = L_n / L_{np} = 0 \dots 1$. 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 этих двух отклонений на объект, находящийся в помещении (человека, деталь, изделие и др.), будет эквивалентным при условии их сложения по соотношению:

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

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:

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

где $\Delta t_{н.р} = t_{н.макс}(p) - A_{t_n} - t_{нрт}$ – расчетная разность температур вносимого трендом и не компенсируемого холодом температурного возмущения.

Например, при существующем нормировании для Санкт-Петербурга² при $t_{н.макс}(p=1)=34^\circ\text{C}$, $A_{t_n}^* = 8,7/2 = 4,35^\circ\text{C}$ и $t_{нрт} = 24,6^\circ\text{C}$ превышение температуры $\Delta t_{н.р} = 34 - 4,35 - 24,6 = 5^\circ\text{C}$; $\mathcal{K}_{см} = \Delta t_{см}/\Delta t_{н} = L_{н}/L_{пр} = 0 \dots 1$ – 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:

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

После замены $L_{пр} = k_p V_{пом}$ и $\sum F_{огр} = V_{пом} / l_{пом}$ и подстановки $c_{в} = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ и $\rho_{в} = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ в окончательном виде можно записать:

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

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

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

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:

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

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

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

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, $\omega_{сут} = 2\pi/24 = 0,262 \text{ ч}^{-1} = 0,73 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. 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.

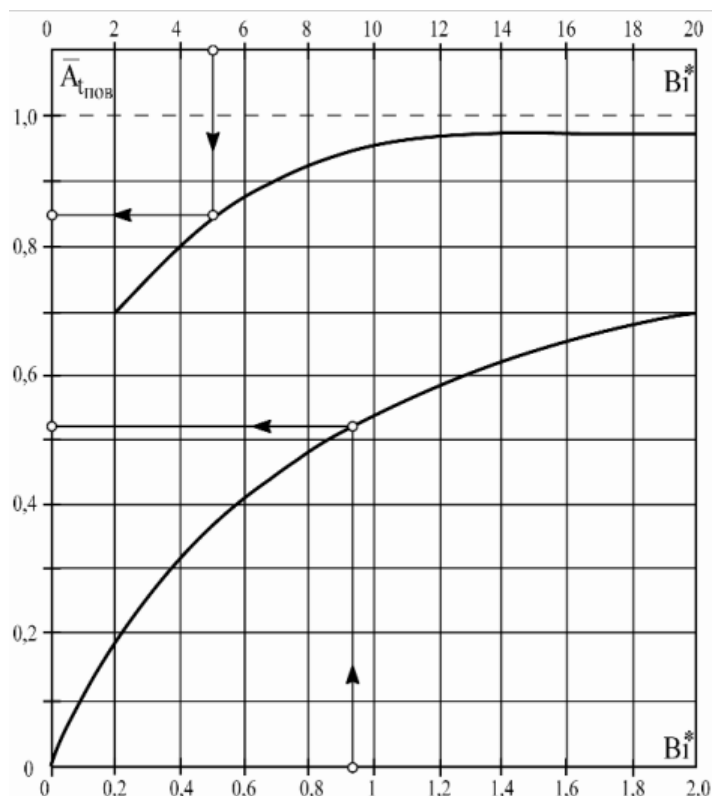


Рисунок 3. Зависимость относительного затухания температурных колебаний

$\bar{A}_{t_{пов}} = A_{t_{в.пов}} / A_{t_{в}} < 1$ 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 $\Delta t_{в.доп} = 0,5^\circ\text{C}$. 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: $t_{нрт} = (34-3) - (0,5-0,25)/0,2 \cdot 1(1+3 \cdot 2 \cdot 0,26/4 \cdot 1,5)^{-1} = 28,4^\circ\text{C}$. 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 потребуются 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 НРТ 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.: Береста, 2013. В 2 т.: 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. Кресль 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*

© Сотников А.Г., 2013

doi: 10.5862/MCE.37.1

Analytic method of determination of the external design parameters in the microclimate systems of buildings

A.G. Sotnikov,*Nonprofit partnership "AVOK – Severo-Zapad", Saint-Petersburg, Russia
+7(921)347-33-92; эл. почта: asotnikov2005@yandex.ru*

Key words

air conditions; outside temperature; temperature curve; amplitude; trend; fractile; object; deviation

Abstract

It is known that the external design parameters are quite important for designing heating, ventilation and air conditioning systems, because they determine design discharge of the building: cold (in summer) and heat (in winter). Thus they substantially influence the capital and maintenance expenditure. Until recently in many countries the external design parameters are determined quite equally, exactly by arbitrarily given provision (probability of non-exceedance). Such way of determination of the external design parameters is the one in heating facilities and ventilating equipment that does not have any system-reasonable analytic methodology.

The author of this paper, using the number of researches, suggests the appropriate method, referring to outside design temperature in the frost-free season. At a later date there will be proposed another methods for design moisture content – in summer and design temperature – in winter.

Analytic dependences, that come from the study, take into account all the complex of characteristics: system, technological, climatological, hygienic, static, dynamic and also probabilistic. In particular it is proved, that rather essential parameter, that generally is not taken in account in computation, is outside air consumption in the compound with recirculated air. Therefore this method requires sufficient skills of the specialist, who must be well acquainted with related fields of knowledge, technics, appropriate terminology. The new method although requires the following discussion and probable improvement, but it allows determining the external design parameters more reasonable and less complicated. If it finds a broad response, it will be recommended for design standard of microclimate systems in different countries.

References

1. Sotnikov A.G. *Avtomatizatsiya sistem konditsionirovaniya vozdukha i ventilyatsii* [Automation of the conditioning system and ventilation]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1984. 240 p. (rus)
2. Sotnikov A.G. *Polnyy kompleks trebovaniy, iskhodnykh dannykh i raschetnoy informatsii dlya SO, SPV, SKV, SKhS i SGVS* [The complete complex of requirements, initial data and rated information for heating, industrial ventilation, air conditioning, cooling and hot-water supply systems]. In 2 volumes. Saint-Petersburg. Beresta, 2013. (rus)
3. Sotnikov A.G. *Trudy simpoziuma «Stroitel'naya klimatologiya»* [Proceedings of the symposium "Building climatology"]. Moscow, 1982. Pp. 239–245. (rus)
4. Sotnikov A.G. *Kholodil'naya tekhnika*. 1986. No.8. Pp. 32–34. (rus)
5. Stefanov Ye.V., Korkin V.D. *Povysheniye energeticheskoy effektivnosti sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha: Materialy kratkosroch. seminara, 18-19 apr.* [Increase of energy efficiency of ventilation and air-conditioning systems: materials of short-term seminar, 18-19 April]. Leningrad: LDNTP, 1985. Pp. 3–9. (rus)
6. Kuranov I.N. *Tekhnicheskaya informatsiya*. Sb. 1 (11) [Technical information. Digest 1(11)]. Moscow: Glavstroyproyekt, 1962. Pp. 15–25. (rus)
7. Uspenskaya L.B. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. 1957. No.9. Pp. 10–12. (rus)
8. Uspenskaya L.B., Anapolskaya L.E. *Trudy VNIIGS. Voprosy proyektirovaniya i montazha sanitarno-tekhnicheskikh sistem* [Issues of design and assembling sanitary-engineering systems]. Vol. 36. Leningrad: VNIIGS, 1973. Pp. 37–48. (rus)
9. Uspenskaya L.B., Yurmanov B.N. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. 1959. No.8. Pp. 18–20. (rus)

Sotnikov A.G. Analytic method of determination of the external design parameters in the microclimate systems of buildings

10. Kreslin A.Ya. *Konditsionirovaniye vozdukha* [Air conditioning]. Moscow: Stroyizdat, 1966. Pp. 201–210. (rus)
11. Puzyrev A.V. *Sb. trudov VTsNII okhrany truda* [Collected papers of research institute of labor protection]. Moscow: Profizdat, 1969. Vol. 61. Pp. 11–23. (rus)
12. Bogoslovskiy V.N., Kuvshinov Yu.Ya., Malyavina Ye.G. *Stroitel'naya klimatologiya. Trudy simpoziuma. Ch. I* [Building climatology. Proceedings of symposium. Part I]. Moscow: 1982. Pp. 45–61. (rus)
13. Bogoslovskiy V.N., Malyavina Ye.G., Balinski V. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. 1980. No.3. Pp. 11–13. (rus)
14. Oktyabrskiy R.D. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. 1976. No.5. Pp. 34–35. (rus)
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. SNiP 23-01-99*. *Stroitel'naya klimatologiya* [Building climatology]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2003. 69 p. (rus)
23. SNiP II-A.6–72. *Stroitel'naya klimatologiya i geofizika* [Building climatology and geophysics]. Moscow: Stroyizdat, 1973. 319 p. (rus)
24. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 599 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 3–12