



Выбор расчётной температуры внутреннего воздуха для многозональных систем кондиционирования

«Комфорт — условия жизни, пребывания, обстановка, обеспечивающие удобство, спокойствие, уют»

Словарь русского языка С.И. Ожегова.

Рецензия эксперта на статью получена 27.06.2018 [Expert review on the article was received on June 27, 2018].

Понятие комфорта является одним из основных в терминологии систем кондиционирования воздуха. Влияние данного фактора, а точнее, смыслового содержания, которое мы вкладываем в понятие «комфорт», в значительной степени формирует все показатели систем кондиционирования воздуха (СКВ). Достаточно отметить, что изменение одного из показателей комфорта — температуры внутреннего воздуха — на 1 °С изменяет расчётную мощность системы кондиционирования на 10–20 %.

Определение комфорта, вынесенное в эпиграф, показывает широту данного понятия и зависимость от трёх факторов: удобство, спокойствие, уют. Удобный — приятный при пользовании. Уют — удобный порядок, приятная устроенность быта, обстановки. Спокойствие — отсутствие движения, забот, тревог.

Отсюда следует, что определяющим в понятии «комфорт» является субъективный фактор — восприятие человеком окружающей среды, то есть индивидуальный для каждого человека и затрагивающий как внутреннее состояние человека (первая составляющая комфорта), так и параметры окружающей среды (вторая составляющая). Понятие «комфорт» многогранно и включает в себя многие факторы: строительный дизайн помещений, вид из окна, цветовую гамму окружающей мебели, эргономичность используе-

мого оборудования, отношения в рабочем коллективе, параметры окружающего микроклимата и т.д.

Поскольку по своему назначению системы кондиционирования воздуха могут изменять только термодинамические и гигиенические параметры воздушной среды помещения, то логично использовать понятие «комфортный микроклимат помещения», которое входит в общую категорию «комфорт» и оперирует такими параметрами микроклимата, как температура, влажность, подвижность и газовый состав окружающего воздуха.

Задаче определения численных значений параметров комфортного микроклимата посвящено большое количество исследований. В отечественной литературе существует понятие условий комфортности [1].

В понятии «комфорт» определяющим является субъективный фактор — восприятие человеком окружающей среды, то есть индивидуальный для каждого человека и затрагивающий как внутреннее состояние человека, так и параметры окружающей среды. Понятие «комфорт» многогранно и включает в себя многие факторы

УДК 697.911

Выбор расчётной температуры внутреннего воздуха для многозональных систем кондиционирования

С. В. Брух, технический директор ООО «Компания МЭЛ», технический редактор журнала С.О.К.

Рассмотрены существующие методики выбора расчётной внутренней температуры для многозональных систем кондиционирования воздуха. Сделан вывод о необходимости учёта индивидуальных особенностей пользователей. Сформулировано третье условие комфортности. Проведено исследование вероятности выбора определённой температуры внутреннего воздуха для офисных зданий. Разработана методика выбора расчётной внутренней температуры с учётом статистических характеристик и степени обеспеченности требуемых параметров.

Ключевые слова: многозональные системы, температура внутреннего воздуха, вероятность выбора внутренней температуры.

UDC 697.911

The selection of the calculated internal air temperature for multi-zone air conditioning systems

S. V. Brukh, technical director of "Company "MEL", LLC, technical editor of the Zhurnal Santehnika, otopenie, kondicionirovanie (S.O.K.) [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]

Existing methods for selecting the design internal temperature for multi-zone air conditioning systems are considered. It was concluded that it is necessary to take into account the individual characteristics of users. The third condition of comfort is formulated. A study was made of the probability of choosing a certain internal air temperature for office buildings. The method of choosing the calculated internal temperature is developed taking into account the statistical characteristics and the degree of availability of the required parameters.

Keywords: multi-zone systems, internal air temperature, probability of internal temperature selection.

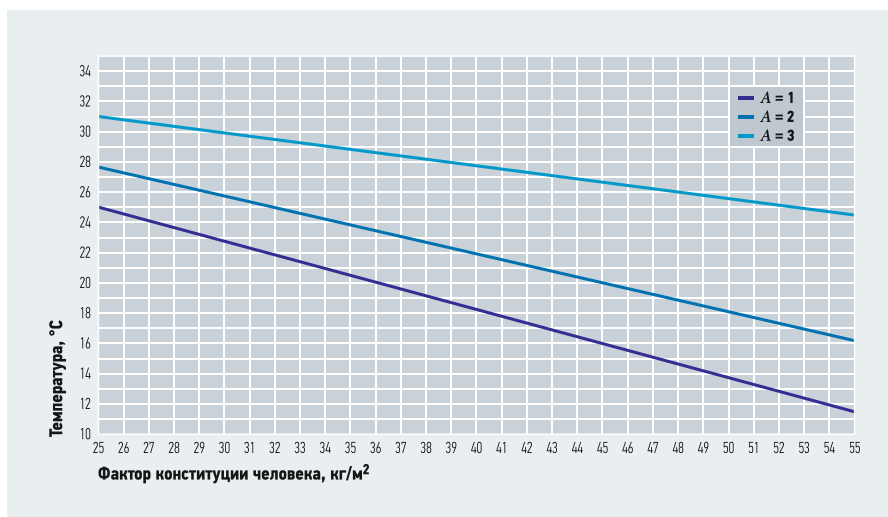


Рис. 1. Зависимость комфортной температуры внутреннего воздуха от «фактора конституции» человека и степени тяжести выполняемой работы

Первое условие комфортности температурной обстановки определяет такую область сочетаний температуры внутреннего воздуха t_v и радиационной температуры помещения t_R , при которых человек, находясь в центре рабочей зоны, не испытывает ни перегрева, ни переохлаждения.

Таким образом, первое условие комфортности оперирует понятиями температуры внутреннего воздуха t_v и радиационной температуры помещения t_R . Остальные параметры внутреннего воздуха и индивидуальные характеристики человека не учитываются. По своему логическому содержанию первое условие комфортности является уравнением энергетического баланса организма человека и окружающей среды и определяет такие сочетания параметров окружающей среды, при которых количество тепловой энергии, вырабатываемой организмом, равно количеству теплоты, отдаваемой в окружающую среду:

$$M(1 - \eta) = Q_{\text{окр}}, \quad (1)$$

где M — энергия метаболизма организма, Вт; η — КПД механической работы; $Q_{\text{окр}}$ — теплоотдача организма в окружающую среду, Вт.

Датский профессор Оле Фангер в результате исследований получил формулу энергетического баланса организма человека, которая учитывает значительное количество параметров окружающего микроклимата и индивидуальные характеристики человека [2]:

$$\begin{aligned} & \frac{M}{A}(1 - \eta) - 0,35(1,92t_s - 25,3 - p_a) - \frac{E}{A} - \\ & - 0,0023 \frac{M}{A}(44 - p_a) - 0,0014 \frac{M}{A}(34 - t_a) = \\ & = \frac{t_s - t_{cl}}{0,18 I_{cl}} = 3,4 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - \\ & - (t_{mrt} + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a), \quad (2) \end{aligned}$$

где M — уровень теплопродукции; A — площадь поверхности тела; η — коэффициент полезной деятельности механиче-

ской работы мышц; t_s — средневзвешенная температура кожи; p_a — парциальное давление водяных паров в окружающем воздухе; E — теплопотери вследствие испарения пота; I_{cl} — термическое сопротивление одежды; f_{cl} — отношение поверхности одетого человека к поверхности того же обнаженного человека; t_a — температура воздуха; t_{mrt} — средняя радиационная температура; η_c — коэффициент конвективного переноса тепла; t_{cl} — средняя температура наружной поверхности одетого человека.

Японские стандарты температуры внутреннего воздуха

Интересно, что в Японии стандарт температуры внутреннего воздуха значительно выше и составляет +27 °C, именно при такой температуре рассчитываются все системы кондиционирования. Тем не менее, в жаркие дни (+35 °C и выше) на государственном уровне принимаются решения об увеличении температуры использования кондиционеров до +28 °C. Это, с одной стороны, уменьшает нагрузку на систему терморегуляции организма человека при входе с улицы в помещения. Но главное — уменьшает потребление электроэнергии в масштабах всей страны.

Второе условие комфортности определяет допустимые температуры нагретых и охлажденных поверхностей при нахождении человека в непосредственной близости от них.

С математической точки зрения второе условие комфортности определяет границы изменения переменных, входящих в первое условие комфортности.

Действительно, не все сочетания параметров окружающего воздуха, удовлетворяющих первому условию комфортности, являются комфортными для человека. Например, можно так подобрать температуру внутреннего воздуха и радиационную температуру помещения, при которых организм человека будет находиться в тепловом балансе с окружающей средой, но большие значения радиационной

температуры будут вызывать дискомфорт и перегрев отдельных участков тела.

Не вдаваясь в особенности изменения предельных значений, можно выделить границы параметров первого условия комфортности (одежда — от 0,5 до 1,0 Clo; лёгкая работа; масса человека — от 40 до 110 кг):

1. Температура внутреннего воздуха — 14–27 °C.
2. Относительная влажность внутреннего воздуха — 30–70 %.
3. Скорость движения воздуха — от 0 до 0,6 м/с.

Третье условие комфортности. В начале данной статьи было определено, что понятие комфорта является в первую очередь субъективным и зависящим от индивидуальных характеристик человека. С.И. Бурцевым и Ю.Н. Цветковым [3] получена зависимость комфортной температуры окружающего воздуха от индивидуальных характеристик человека.

На рис. 1 комфортная температура меняется при изменении фактора конституции человека, который численно равен его массе, делённой на площадь поверхности тела. При увеличении фактора конституции человека комфортная температура окружающего воздуха уменьшается. Как правило, людям с большой массой

тела комфортна более прохладная среда, чем высоким и худощавым. Это объясняется необходимостью увеличения теплообмена с окружающей средой при одинаковой площади тела, но больших теплоизбытках. За счёт понижения температуры окружающего воздуха достигается тепловой баланс организма человека.

Также тепловой комфорт зависит от степени тяжести физической работы A :

- для лёгкой работы $1 < A < 2$;
- для работы средней тяжести $2 < A < 4$;
- для тяжёлой работы $4 < A < 8$.

В офисных помещениях характерны численные значения коэффициента A от 1 до 3 (рис. 1). Также на комфортную для организма температуру внутреннего воздуха влияют тип одежды и величина метаболизма [4].

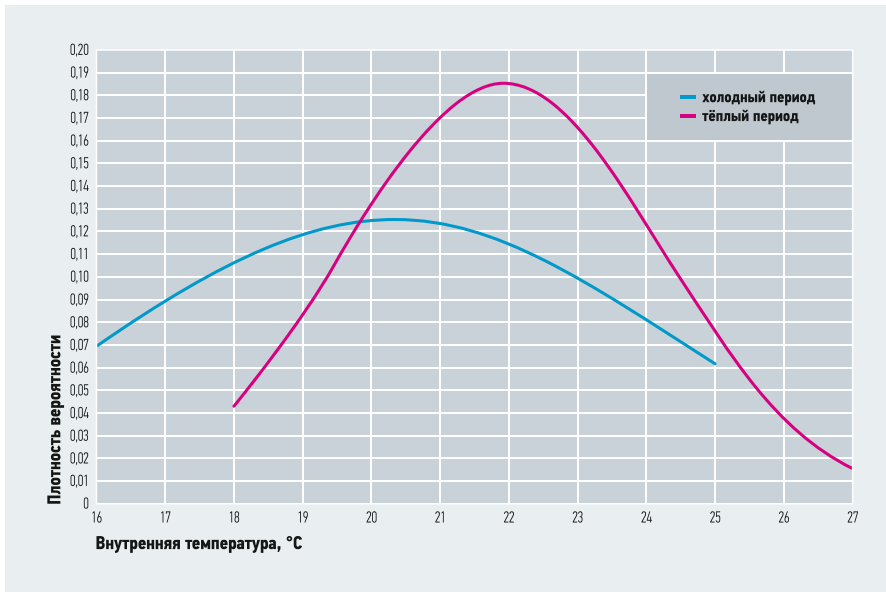


Рис. 2. Выбор потребителями офисного здания температуры воздуха на пульте управления летом (охлаждение) и зимой (обогрев)

Величина метаболизма человека зависит от многих факторов: активности, массы, роста, питания, возраста и т.д. Поэтому при проектировании систем кондиционирования определение точного значения этой величины для конкретного человека с медицинской точки зрения невозможно. Также невозможно заранее определить, какой тип одежды выберет человек, какой у него будет рост, вес и фактор конституции. Следовательно, при проектировании систем кондиционирования определить комфортную температуру для конкретного человека невозможно. Но согласно первому условию комфортности такая температура существует. Согласно второму условию комфортности, такая температура лежит в определённых пределах (рис. 2).

Поэтому, выбрав в качестве расчётной любую температуру внутреннего воздуха в помещении (например, 24 °C), можно установить систему кондиционирования, которая будет её поддерживать. Данный микроклимат в помещении будет удовлетворять первому и второму условию комфортности. Но если метаболизм человека будет по каким-либо причинам отличаться от расчётного (или он оденет костюм с большей плотностью, или его физическая активность будет несколько больше, чем обычно, или его коэффициент конституции будет отличаться от стандартного) — всё это приведёт к тому, что температура в помещении не будет комфортной. Несмотря на выполнение первого и второго условия комфортности.

Поэтому для удовлетворения потребностей каждого конкретного человека, чтобы индивидуальный уровень тепло-

Оптимальные параметры внутреннего микроклимата

табл. 1

Температура воздуха, °C	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
20–22	60–30	≤ 0,20
23–25	60–30	≤ 0,15

продукции соответствовал теплотермам в окружающую среду, температура внутреннего воздуха должна устанавливаться индивидуально. Отсюда можно сформулировать **третье условие комфортности**: параметры внутреннего микроклимата должны иметь возможность индивидуального регулирования с целью соответствия субъективным ощущением комфорта потребителя.

Основным параметром, влияющим на теплообмен человека с окружающей средой, является температура внутреннего воздуха. Поэтому, в первую очередь, возможностью регулирования должен обладать данный параметр внутреннего микроклимата (что и реализуется в современных системах кондиционирования).

При расчётах систем кондиционирования пользуются так называемой «опти-

мальной» температурой внутреннего воздуха, которая для жилых, общественных и административно-бытовых помещений меняется в диапазоне от 20 до 25 °C в зависимости от периода года [6].

В пределах данного диапазона проектировщик выбирает расчётную температуру внутреннего воздуха, по которой определяет тепловой баланс помещения в тёплый, переходный и холодный периоды года. Причём с целью энергосбережения в тёплый период года принимается максимальная температура (25 °C), а в холодный — минимальная температура внутреннего воздуха (20 °C) из этого диапазона (табл. 1).

С точки зрения существующей нормативной документации данный выбор расчётной температуры внутреннего воздуха абсолютно адекватен и широко используется при проектировании систем конди-

ционирования. Однако для многозональных систем (VRF систем «чиллер-фанкойлы», в некоторых случаях сплит-систем) такой выбор расчётной температуры приводит к невозможности поддерживать оптимальные параметры внутреннего воздуха в обслуживаемых помещениях.

Дело в том, что в руках потребителя есть «волшебный» прибор, который с лёгкостью разрушает все расчёты проектировщиков. Этот прибор называется пульт управления, с помощью которого можно установить другую (не расчётную) температуру в помещении. Диапазон выбора внутренней температуры достаточно широк и составляет (в большинстве систем) от 18 до 30 °C. Выбор температуры случаен и зависит от индивидуальных особенностей терморегуляции организма. Зачастую выбранная температура не





попадает в диапазон нормируемых оптимальных параметров внутреннего воздуха, что обуславливается и самим определением оптимальных параметров микроклимата, которые оптимальны только для 80 % людей. Использование нормативных показателей, которые ориентированы на «среднего» человека, допустимо при проектировании помещений с большим количеством людей, например, кинотеатры, залы совещаний, спортивные комплексы. Многозональные системы кондиционирования, обеспечивающие комфорт конкретного человека, который, в свою очередь, может выбрать комфортную для себя температуру с помощью пульта, необходимо проектировать с учётом его субъективных характеристик.

В системах кондиционирования воздуха, подобранных без учёта данного фактора, наблюдается перерасход хладоносителя (относительно расчётного) на участках с меньшими гидравлическими или аэродинамическими сопротивлениями и, соответственно, сложность поддержания требуемой температуры внутреннего воздуха на наиболее удалённых участках. Данная проблема возникает преимущественно в тёплый период года, так как в холодный период данные системы, как правило, не функционируют и требуемая мощность охлаждения обычно значительно больше требуемой мощности нагрева.

Необходимость правильного выбора расчётной температуры внутреннего воздуха при многозональном кондиционировании помещений является в первую очередь статистической задачей. Действительно, выбрав минимально возможную

температуру внутреннего воздуха за расчётную (18 °С), можно сказать, что все внутренние блоки многозональных систем будут её поддерживать. Однако вероятность того, что все потребители выберут минимально возможную температуру помещения, крайне низка. С другой стороны, в самом определении систем кондиционирования воздуха заложена степень обеспеченности параметров внутреннего воздуха в зависимости от класса систем. Следовательно, выбор расчётной температуры внутреннего воздуха должен производиться из условия расчётной степени обеспеченности внутренних параметров помещений (табл. 2).

Для решения статистической задачи определения обеспеченности внутренней температуры необходимо определить интегральную функцию распределения вероятности температур в помещении. Для этого было проведено исследование работы многозональных систем кондиционирования

Многозональные системы кондиционирования, обеспечивающие комфорт человека, могут выбрать комфортную для себя температуру с помощью пульта, необходимо проектировать с учётом его субъективных характеристик. В системах кондиционирования, подобранных без учёта этого, наблюдается перерасход хладоносителя на участках с меньшими гидравлическими или аэродинамическими сопротивлениями

Нормируемая степень обеспеченности параметров внутреннего воздуха*

табл. 2

Класс СКВ	Необеспеченность (вероятность отказа) при односменной работе, ч/год	Необеспеченность (вероятность отказа) при круглосуточной работе, ч/год
Первый	70 (0,03)	100 (0,01)
Второй	175 (0,08)	250 (0,03)
Третий	315 (0,15)	450 (0,05)

* Зависит от класса системы вентиляции и кондиционирования.

рования и собраны статистические данные по выбору пользователями температур воздуха в офисных помещениях.

В процессе исследования для получения высокой достоверности результатов проведено более 5600 наблюдений.

Архитектурно-строительные характеристики здания:

- количество этажей корпуса №1–7;
- количество этажей корпуса №2–7;
- количество этажей общего корпуса — два;
- общая площадь — 12 650 м²;
- строительный объём — 46 046 м³;
- общая площадь кондиционируемых помещений — 7520 м²;
- площадь кондиционируемых помещений — от 12 до 36 м²;
- количество кондиционируемых помещений — 398.

Метеорологические данные наружных условий:

- географическая широта местности — 56° с.ш.;
- барометрическое давление — 99 кПа.

Расчётные температуры наружного воздуха:

- в тёплый период года +24,3 °С (параметр Б — 2 °С);
- в холодный период года –35 °С (параметр Б).

Расчётное теплосодержание наружного воздуха:

- в тёплый период года (параметр Б — 2 кДж/кг) +51,2 кДж/кг;
- в холодный период года (параметр Б) –34,9 кДж/кг.

Характеристики систем кондиционирования воздуха:

- количество VRF-систем — 29 шт.;
- количество сплит-систем — 28 шт.;
- количество внутренних блоков — 398 шт.;
- тип внутренних блоков — настенный и кассетный;
- тип управления — индивидуальный с централизованным мониторингом;
- тип пультов управления — настенный проводной и инфракрасный.

Обработка данных статистическими методами показала соответствие распределения вероятности температур нормальному распределению Гаусса (что вполне логично):

$$f(t_b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t_b - m)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

Математическое ожидание температуры m :

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i N_i)}{\sum_{i=1}^n (N_i)} = 21,91 \text{ °С}. \quad (4)$$

Среднее квадратичное отклонение σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(t_i - m)^2] N_i}{\sum_{i=1}^n (N_i)}} = 2,28^\circ\text{C}, \quad (5)$$

где t_b — температура внутреннего воздуха, $^\circ\text{C}$; N_i — количество измерений с температурой t_i .

Вероятность соответствия теоретического функции фактическому распределению по критерию Пирсона составила 98 % (рис. 2).

Расчётной величиной является средняя температура в помещениях, обслуживаемых одной системой:

$$t_p^n = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i)}{n} \quad (6)$$

где n — количество внутренних блоков на одной системе.

Математическое ожидание m суммы одинаковых функций случайных величин (температуры внутреннего воздуха) не зависит от числа функций. Соответственно, математическое ожидание при любых n равно $21,91^\circ\text{C}$.

Среднее квадратичное отклонение σ суммы одинаковых функций случайных величин (температуры внутреннего воздуха) вычисляется по формуле:

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{n\sigma_1^2}}{n}. \quad (7)$$

Функция распределения вероятности средних температур n внутренних блоков системы:

$$f(t_b) = \frac{K_n \sqrt{n}}{2,28 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_b - 21,91)^2}{2 \frac{2,28^2}{n}} \right]. \quad (8)$$

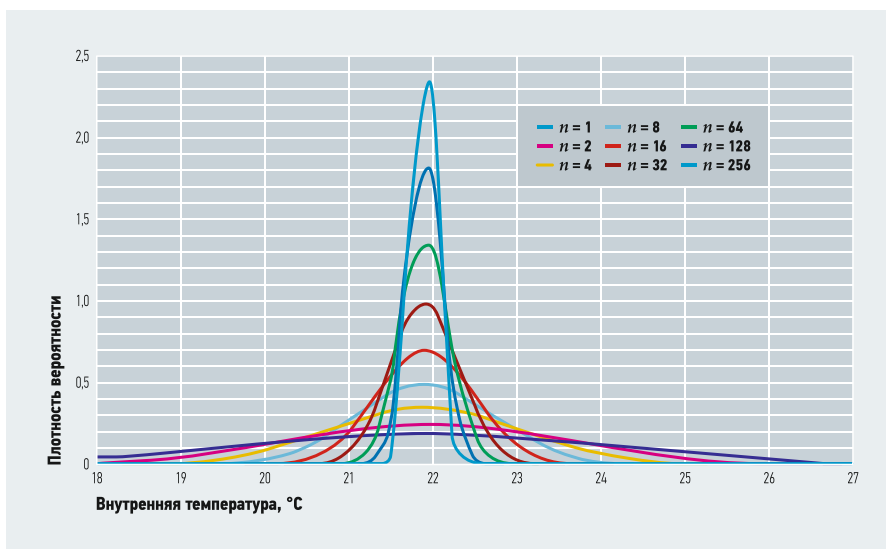


Рис. 3. Распределения плотности вероятности температур в помещениях

На рис. 3 изображены распределения плотности вероятности температур в помещениях. При увеличении количества внутренних блоков n в системе среднее квадратичное отклонение σ уменьшается, а распределение плотности приближается к математическому ожиданию.

Расчётная температура воздуха в помещениях определяется при решении дифференциального уравнения:

$$dw = \frac{K_n \sqrt{n}}{2,28 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_b - 21,91)^2}{2 \frac{2,28^2}{n}} \right] dt. \quad (9)$$

В результате решения данного уравнения и определения граничных условий получены зависимости для определения расчётной температуры внутреннего воздуха (рис. 4).

Зная коэффициент обеспеченности параметров внутренней температуры и количество внутренних блоков в системе кондиционирования, подбирается расчётная температура внутреннего воздуха.

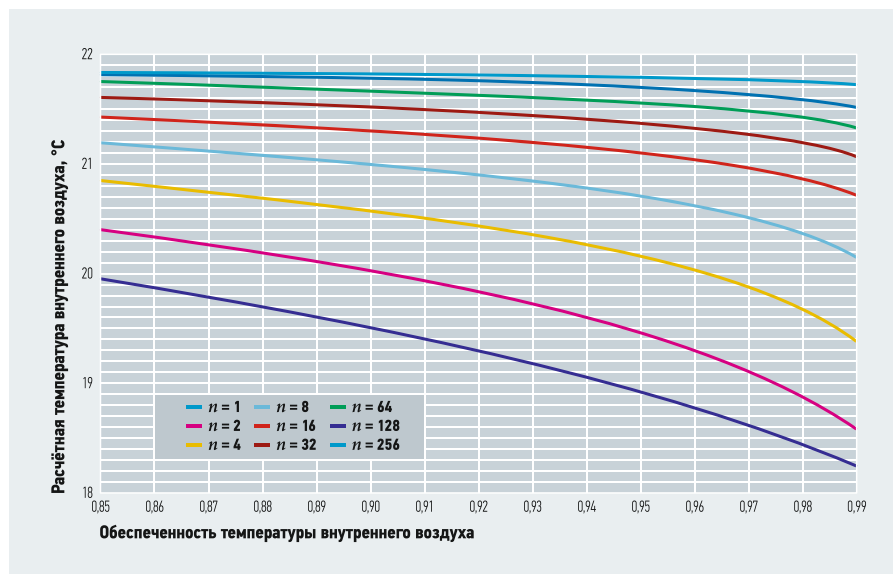


Рис. 4. График выбора расчётной внутренней температуры в помещениях при заданной степени обеспеченности внутренних параметров и числа внутренних блоков многозональной СКВ

Пример №1. Кондиционируемое здание состоит из 150 помещений. Проектное решение — VRF-системы с 16 блоками на каждой системе. Для систем кондиционирования второго класса, работающих в одну смену, коэффициент обеспеченности 0,92. Соответственно, расчётная температура внутреннего воздуха будет равна 21°C .

Выводы

1. Сформулировано третье условие комфортности, согласно которому для обеспечения состояния комфорта человека необходимо не только определённое сочетание микроклиматических параметров помещения (первое и второе условия комфортности). Параметры внутреннего микроклимата должны также иметь возможность индивидуального регулирования с целью соответствия субъективным ощущениям комфорта потребителя.
2. Сложившая практика проектирования расчётной температуры воздуха для многозональных систем кондиционирования по верхней границе оптимальных значений ($+25^\circ\text{C}$) приводит к тому, что только для части потребителей температура будет комфортна. Большая часть пользователей системы кондиционирования установят температуру на пульте управления ниже $+25^\circ\text{C}$.

1. Богословский В.Н. Тепловой режим здания: Учеб. для вузов. — М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
2. Fanger P.O. Thermal comfort: Analysis and Application in Environmental Engineering. McGraw-Hill Book Co. N.Y. 1973. 244 p.
3. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Тепловой и газовый комфорт с учётом индивидуальных особенностей человека // Теплоэнергоэффективные технологии. 2002. №1. С. 19–28.
4. Иванов К.П. Основы энергетики организма. Т. 1. Общая энергетика, теплообмен и терморегуляция. — Л.: Наука, 1990. 307 с.
5. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуал. ред. СНиП 41-01-2003.
6. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. References — see p. 95.

The selection of the calculated internal air temperature for multi-zone air conditioning systems. Pp. 62–66.

S. V. Brukh, technical director of "Company "MEL", LLC, technical editor of the Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.) [Journal of Plumbing. Heating. Ventilation]

1. Bogoslovskij V.N. *Teplovoj rezhim zdaniya: Ucheb. dlja vuzov* [Thermal mode of the building: Textbook for universities]. Moscow. Strojizdat ["Strojizdat" Publishers — Publishing house of the building industry]. 1979. 248 p.
2. Fanger P.O. Thermal comfort: Analysis and Application in Environmental Engineering. McGraw-Hill Book Co. New York. 1973. 244 p.
3. Burtsev S.I., Tsvetkov Ju.N. *Teplovoj i gazovyy komfort s uchetom individual'nyh osobennostey cheloveka* [Thermal and gas comfort, taking into account individual characteristics of a person]. *Teplojenergojeffektivnye tehnologii* ["Heat-and-energy-efficient technologies" News bulletin]. 2002. No. 1. Pp. 19–28.
4. Ivanov K.P. *Osnovy jenergetiki organizma. T. 1. Obshhaya jenergetika, teploobmen i termoreguljacija* [Fundamentals of the energy of the organism. Vol. 1. General energy, heat exchange and thermoregulation]. Leningrad. Nauka ["Science" Publishers]. 1990. 307 p.
5. SP [Code of practice on design and construction] 60.13330.2012. *Otoplenie, ventiljacija i kondicionirovanie vozduha* [Heating, ventilation and air conditioning]. Aktual. red. SNiP [Updated version of Building Norms & Regulations (National Codes and Standards of Russia)] 41-01–2003.
6. GOST [State industry standard of Russia] 30494–2011. *Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshhenijah* [The buildings are residential and public. Microclimate parameters in the premises]. Enact. data: January 01, 2013.