

Критерии теплового комфорта при проектировании систем отопления

Bjarne W. Olesen, директор Международного центра микроклимата и энергии Датского технического университета (*International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark*)

Для расчета и проектирования систем отопления, как правило, используются национальные стандарты, а при их отсутствии международные стандарты, такие как EN12828 [1], ISO EN7730 [2] или EN15251 [3], в которых сформулированы общие требования к тепловому комфорту. Рекомендуемые критерии для общего теплового комфорта, предложенные О. Фангером, выражаются в индексе комфортности (PMV) и в ожидаемом проценте неудовлетворенных степеней комфорта (PPD). Кроме того, должна учитываться расчетная температура комфорта, а также факторы локального теплового комфорта: разность температуры воздуха по высоте зоны обслуживания, асимметрия эквивалентной температуры излучения, подвижность воздуха (сквозняки) и температура окружающих поверхностей.

Критерии общего теплового комфорта

При проектировании зданий и расчете систем климатизации критерии теплового комфорта (минимальная комнатная температура в зимнее время, максимальная комнатная температура в летнее время) и требуемая интенсивность вентиляции для приемлемого качества внутреннего воздуха используются как исходные данные для расчета тепловых нагрузок (EN12831 [4]). Это гарантирует, что расчетные условия наружной среды и расчетные внутренние нагрузки позволят добиться минимально приемлемой комнатной температуры. Основа для установления критериев задается стандартом ISO EN7730 [2] и индексами комфортности (по О. Фангеру), как показано в табл. 1.

Таблица 1

Примеры рекомендуемых категорий помещений для проектирования систем отопления и охлаждения зданий

Тип здания или помещения	Категория	PPD (%)	PMV	Температурный диапазон для отопления, °С Одежда ~ 1,0 кло	Температурный диапазон для охлаждения, °С Одежда ~ 0,5 кло
Офисы и помещения со схожим уровнем активности (кабинеты, офисы открытой планировки, конференц-залы, аудитории, столовые, рестораны, классы (активность ~ 1,2 мет))	I	<6	-0,2<PMV, +0,2	21,0–23,0	23,5–25,5
	II	<10	-0,5<PMV, +0,5	20,0–24,0	23,0–26,0
	III	<15	-0,7<PMV, +0,7	19,0–25,0	22,0–27,0

Исходя из заданного или предполагаемого типа одежды и уровня активности людей можно рассчитать соответствующие комфортные температуры. В качестве примера в табл. 1 представлены критерии теплового комфорта для различных типов помещений, где люди обычно находятся в сидячем положении в типичной зимней одежде.

При проектировании (расчете) системы отопления следует использовать данные из табл. 1 с учетом категории выбранного внутреннего микроклимата. Использование завышенной категории с более жесткими критериями приведет к более высоким расчетным нагрузкам и выбору более мощных систем и оборудования. При эксплуатации систем отопления следует опираться на среднее значение температурного диапазона, но внутренняя температура может изменяться внутри этого диапазона за счет мер энергосбережения и используемых алгоритмов управления.

Системы отопления должны обеспечивать достаточную равномерность температуры в обслуживаемой зоне (неравномерность не более 3–5 °С). Такое условие особенно актуально в очень больших помещениях с полностью остекленными фасадами.

Упрощенный метод проектирования (Olesen, 1983) показывает, что максимальная разница температуры в помещении при наружной температуре $t_b = -12$ °С может быть рассчитана по следующей формуле:

$$t_{01} - t_{02} = \leq 0,96 K_w, \text{ °С},$$

где t_{01} – комфортная температура в самом холодном месте обслуживаемой зоны, °С;

t_{02} – комфортная температура в самом теплом месте обслуживаемой зоны, °С;

K_w – среднее значение коэффициента теплопередачи фасада, Вт/м² • °С.

Таким образом, если фасад имеет стандартное двойное остекление, $K_w = 2,9$ Вт/м² • °С, разность температуры будет менее 3 °С, что удовлетворяет критериям даже для категории I. Для типичного современного окна, $K_w = 1,5$ Вт/м² • °С, разность температуры будет менее 1,5 °С. Важно, чтобы разность была ниже допустимой, так как дополнительные колебания температуры вносятся за счет системы управления. Если разница окажется слишком большой, необходимо будет установить отопительный прибор на фасаде (радиатор, напольное отопление, конвектор) или изменить конструкцию фасада, усилив его теплоизоляцию (окно, стена).

Факторы локального теплового комфорта

Разность температуры воздуха по высоте зоны обслуживания, асимметрия эквивалентной температуры излучения, подвижность воздуха (сквозняки) и температура окружающих поверхностей также влияют на расчет ограждающих конструкций зданий и систем климатизации. Эти факторы изложены в стандарте ISO EN7730 [2].

1. Разность температуры воздуха по высоте зоны обслуживания

Одно из основных преимуществ напольного охлаждения и отопления – равномерное распределение температуры воздуха по высоте помещения. Измерения показывают, что большие напольные излучающие панели, расположенные под окнами, формируют практически равномерное распределение температуры по высоте. Для систем с большей долей конвективной составляющей теплоотдачи (плитусные панели под окнами, системы воздушного отопления, панели обогрева в торцевой стене) или системы водяного отопления с местными отопительными приборами разность температуры воздуха по высоте будет существенной. Согласно стандарту ISO EN7730 [2], разница температур между уровнем ног и головы человека в отапливаемом помещении должна быть менее 3 °С для категории II и менее 2 °С для категории I. Рассчитать распределение температур воздуха на стадии проектирования обычно довольно трудно. Здесь можно применять методы вычислительной газодинамики (CFD-модели). В современных хорошо изолированных зданиях это не создает проблем.

В помещениях с высокими потолками, таких как промышленные здания и ангары, возможная температурная стратификация воздуха по высоте существенно увеличивает потери тепла зданием.

2. Асимметрия эквивалентной температуры излучения

Люди наиболее чувствительны к асимметрии излучения, вызванной теплыми потолками или холодными стенами, окнами. Проблемы возникают, когда асимметрия достигает 5 °С для теплых потолков и 10 °С для холодных стен (категория II, ISO EN7730 [2]). Обычно для предотвращения этой проблемы отопительные приборы размещаются под окнами. Однако с повышением качества теплоизоляции окон такая проблема не возникает. Максимальную асимметрию эквивалентной температуры излучения можно рассчитать на стадии проектирования при помощи следующего уравнения: $\Delta t_{pr} < 3,96 K_w$ °С.

Это означает, что если фасад выполнен в виде стандартного двойного остекления, $K_w = 2,9$ Вт/м² • °С, асимметрия составит 11,5 °С, что превышает требования критерия для категории II, равного 10 °С. Это соответствует критериям даже для категории I. Для типичного современного окна, $K_w = 1,5$ Вт/м² • °С, асимметрия будет менее 6 °С. Критерии асимметрии эквивалентной температуры излучения от теплого потолка накладывают ограничения на температуру поверхности потолка и, следовательно, на его теплоотдачу (см. раздел «Температура поверхности потолка»).

3. Подвижность воздуха

Нисходящий поток воздуха от холодных поверхностей (окна) является еще одним фактором, вызывающим дискомфорт и требующим размещения теплой поверхности под холодным окном (стеной). С помощью методики расчета можно определить связь между высотой окна, значением K_w для стены (окна), наружной температурой и максимальной допустимой скоростью воздушного потока (ISO EN7730-2004 [5], REHVA Guide book 7-2007 [6]). Пример показан на рис. 1. Здесь максимальная скорость воздушного потока в зоне, занятой людьми, на расстоянии 1 м от холодной вертикальной поверхности (стена, окно) показана как функция от высоты окна-стены и значения K_w при наружной температуре $-12\text{ }^\circ\text{C}$.

Скорость воздушного потока для категории II, с учетом рассчитанной минимальной температуры и турбулентности в 20 %, составляет 0,18 м/с. Это означает, что высота стандартного окна с двойным остеклением, $K_w = 2,9\text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, не должна превышать 1,5 м. Для типичного современного окна, $K_w = 1,5\text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, высота может равняться полной высоте помещения 3,5 м.

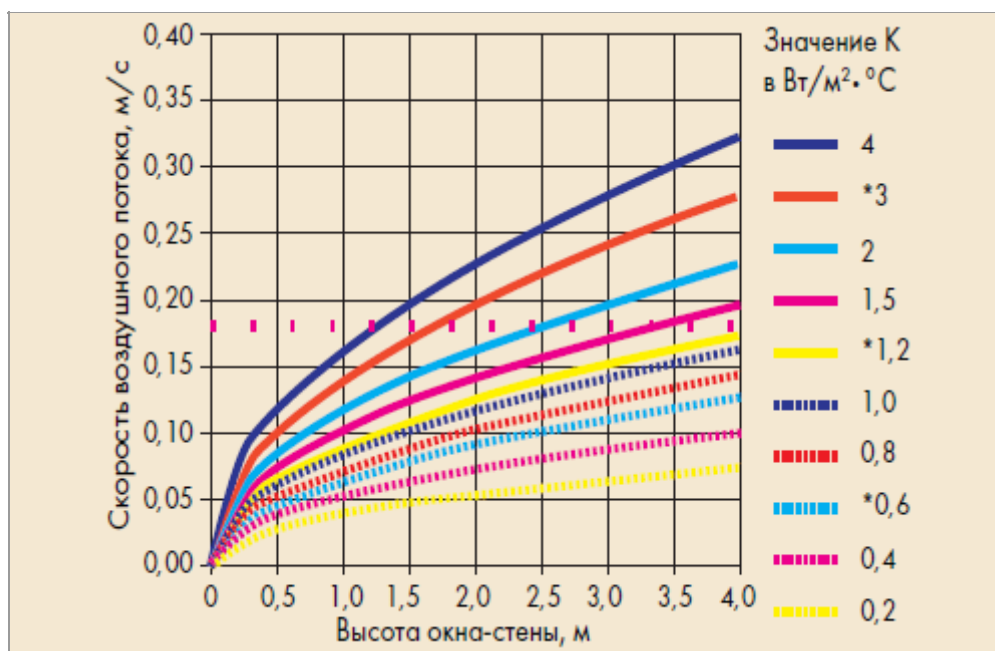


Рисунок 1.

На графике отображена максимальная скорость воздушного потока вдоль пола на расстоянии 1 м от охлажденной стены как функция высоты окна-стены и значения K_w при наружной температуре $-12\text{ }^\circ\text{C}$

4. Температура поверхности пола

Температура поверхности пола напрямую влияет на комфорт ног. Рекомендации по температуре поверхности пола зависят от того, будут ли люди носить в помещении обувь или ходить босиком. Международные стандарты рекомендуют температуру поверхности пола в диапазоне $19\text{--}29\text{ }^\circ\text{C}$ для помещений, где люди проводят время стоя или сидя и носят обычную обувь. Это является ограничивающим фактором для производительности напольных систем. Максимальная температура поверхности пола для отопления составляет $29\text{ }^\circ\text{C}$. Если температуре воздуха равна $20\text{ }^\circ\text{C}$, то мощность отопления около 100 Вт/м^2 . Это значение является средним для сидящих и стоящих людей. Сидящие люди предпочитают температуру поверхности пола на $\sim 1\text{ }^\circ\text{C}$ выше, а стоящие на $\sim 1\text{ }^\circ\text{C}$ ниже. Стандарт EN15377-1 [7] допускает расчетную температуру пола в $35\text{ }^\circ\text{C}$ за пределами зоны, занятой людьми, то есть на расстоянии не более 1 м от периметра помещения. В помещениях, где люди могут ходить босиком (ванные комнаты, бассейны, раздевалки), оптимальная комфортная температура зависит от типа покрытия.

5. Температура поверхности стен

Для отопительных панелей, встроенных в стены, максимум температуры находится в диапазоне $35\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$. Максимум может зависеть от того, где используются такие системы, например, если они используются в местах, где люди могут легко дотронуться до стены, или если в помещении присутствуют дети или пожилые люди. Риск ожогов и болевых ощущений появляется при температуре кожи в $42\text{--}45\text{ }^\circ\text{C}$ и зависит от

теплопроводности поверхностного покрытия стены. Температура поверхности радиаторов также может быть ограничена; в некоторых странах она ограничивается 55 °С.

6. Температура поверхности потолка

Требования к температуре поверхности потолка не должны приводить к слишком большой асимметрии эквивалентной температуры излучения. Асимметрия зависит от коэффициента облученности между небольшим участком плоскости и потолком и температуры потолка. На графике (рис. 2) показана допустимая температура поверхности потолка с учетом геометрии комнаты, когда температура всех остальных поверхностей равна комнатной, то есть 20 °С.

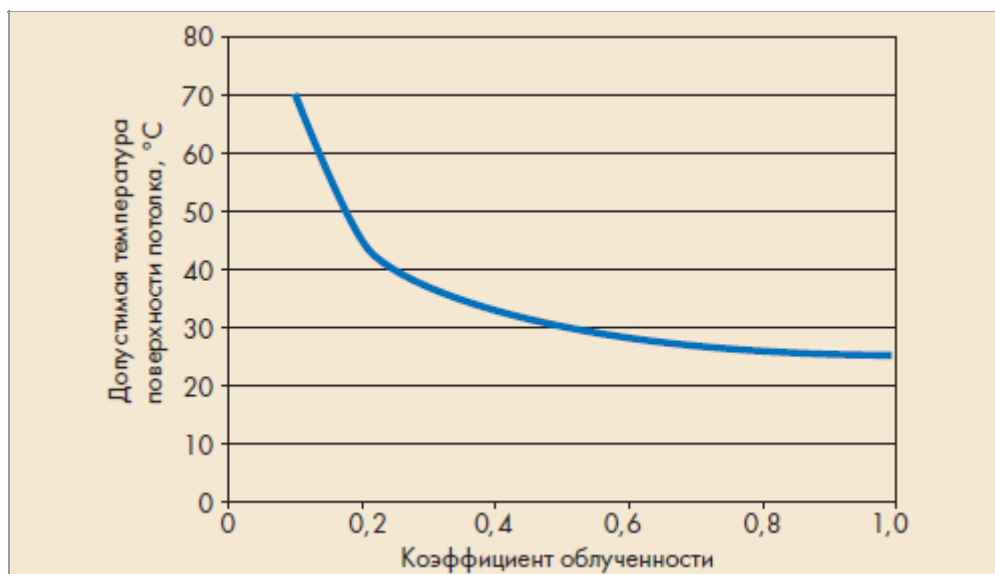


Рисунок 2.
Связь между допустимой температурой потолка и коэффициентом облученности

Для помещения 2,4 x 4,8 м с высотой потолков 2,7 м коэффициент облученности между потолком и человеком, сидящим в центре комнаты, составляет 0,42. Для отопления предполагается, что температура всех остальных поверхностей, кроме потолка, равна расчетной комнатной температуре 20 °С. Асимметрия излучения от отопляемого потолка должна быть меньше, чем

$$0,42 \times \text{потолок} + (1 - 0,42) \times 20 \text{ °С} - 20 \text{ °С} < 5 \text{ °С}.$$

Это означает, что максимальная средняя температура поверхности потолка ограничена 32 °С.

Неустойчивые тепловые условия

Рассмотренные методы применимы для устойчивых условий. Однако тепловая среда часто оказывается неустойчивой, и возникает вопрос: можно ли тогда применять эти методы? Возможны три вида неустойчивых условий.

1. Температурные циклы

Температурные циклы могут появляться в результате алгоритмов управления температурой в помещении. Если разница между двумя противоположными пиками не превышает 1 °С, это никак не затронет уровень комфорта и можно будет применять рекомендации, приведенные для устойчивых условий. Более высокие вариации могут уменьшить комфорт.

2. Температурный дрейф, или диапазон изменения

Разные критерии установлены для дрейфов, или диапазонов изменения температуры, в стандартах ISO EN7730 [2] и ASHRAE-55 [8]. В ISO указано, что если скорость изменения температуры при дрейфе не превышает 2,0 °С в час, можно применять методы, используемые для стационарных условий.

В табл. 2 стандарта ASHRAE-55 [8] указаны максимальные допустимые изменения рабочей температуры во времени. Для любого заданного периода времени используются самые жесткие требования из табл. 2.

Например, рабочая температура не должна меняться более чем на 2,2 °C в течение 1 часа и не должна меняться более чем на 1,1 °C в течение любых 0,25 часа из 1-часового периода. Если изменения происходят в результате регулировок, сделанных оператором, указанные ограничения могут быть расширены.

Таблица 1
Изменение температуры во времени по ASHRAE-55

Время	0,25 ч	0,5 ч	1 ч	2 ч	4 ч
Максимальное допустимое изменение рабочей температуры	1,1 °C	1,7 °C	2,2 °C	2,8 °C	3,3 °C

Однако результаты новых исследований показали, что уравнения для стационарных условий можно использовать, если температурный дрейф не превышает 4 °C/ч.

В этом случае рекомендуемый комфортный диапазон не зависит от дрейфов температуры, то есть вы можете допустить изменения комнатной температуры в пределах комфортного диапазона, но нельзя допустить превышение этого диапазона. Это можно использовать для снижения пиковых нагрузок системы, снижения энергопотребления и, используя теплоемкость самого здания, перевода части отопительной или холодильной нагрузки на ночное время. Из-за теплоемкости здания средний дрейф рабочей температуры будет ниже 2 °C /ч, в большинстве случаев даже ниже 1 °C/ч.

3. Переходные условия

В целом о переходных условиях можно сказать следующее:

- Скачкообразные изменения рабочей температуры ощущаются мгновенно.
- После скачка рабочей температуры новые стационарные тепловые условия ощущаются мгновенно, то есть для прогнозирования комфорта можно использовать индексы по Фэгнеру: индекс комфортности (PMV) и ожидаемый процент неудовлетворенных степенью комфорта (PPD).
- После падения рабочей температуры ощущаемая температура сначала будет ниже уровня, предсказанного PMV, затем увеличится и приблизительно через 30 минут достигнет устойчивого уровня, то есть предсказания по индексам PMV-PPD в течение первых 30 минут будут завышены. Время, необходимое для достижения новых устойчивых условий, зависит от начальных условий.

Заключение

Учесть большую часть критериев комфортности можно еще на стадии проектирования систем и здания. Это делается через относительно простые расчеты вручную или используя специальное программное обеспечение. Исходными данными являются результаты расчетов тепловых нагрузок, параметры здания (значения K_v) и расчетная наружная температура. Критерии теплового комфорта указаны в существующих европейских стандартах.

Если позволить комнатной температуре меняться в течение дня, вы сможете уменьшить пиковые нагрузки и энергопотребление, если такие изменения не выходят за пределы комфортного диапазона.

Литература

1. EN12828, 2002. Heating systems in buildings – Design for water based heating systems.
2. ISO EN 7730, 2005. Moderate thermal environments – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort.
3. EN15251, 2006. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings – addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
4. EN12831, 2003. Heating systems in buildings. Method for calculation of the design heat load.
5. ISO EN7730, 2004. Moderate thermal environments. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.
6. REHVA Guide book no 7. Low temperature heating and high temperature cooling. Jan Babiak, Bjarne W. Olesen and Dusan Petras, 2007. ISBN 2-9600468-6-6.

7. EN 15377-1. Heating systems in buildings. Design of embedded water based surface heating and cooling systems. Determination of the design heating and cooling capacity.

8. ASHRAE. 2004. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, USA.

Материал предоставлен журналом **REHVA JOURNAL**.

Научное редактирование выполнено канд. техн. наук **Е. О. Шилькротом**.