

**Как создать условия комфортного пребывания человека в помещении?  
Как спроектировать систему отопления?  
Какие параметры микроклимата необходимо задать?**

Одним из основных условий комфортного пребывания человека в помещении является изучение и системный анализ процессов теплообмена в отапливаемом помещении.

Применяемые в настоящее время методики теплотехнических расчетов и проектирования систем отопления основаны на использовании осредненных значений расчетных величин, рассматриваемых для установившихся режимов.

Авторами статьи рассматриваются требования действующих нормативно-технических правовых актов, рекомендации «Обеспечение теплового комфорта в отапливаемых помещениях жилых и общественных зданий. Рекомендации по выбору вида отопительного прибора» (Р1.02.091.11), практический и научный опыт, эксперименты, математическое моделирование. Материалы, представленные в публикации, получены в ходе анализа результатов расчетов распределения параметров микроклимата в помещениях с разнообразными характеристиками в условиях применения различных отопительных приборов.

**П.И. ДЯЧЕК,**

д. т. н, проф., проф. кафедры  
«Теплогасоснабжение и вентиляция» БНТУ

**А.Э. ЗАХАРЕВИЧ,**

магистр т. н, ассистент кафедры  
«Теплогасоснабжение и вентиляция» БНТУ

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТА В ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Наиболее эффективно, глубоко и оперативно изучить проблемы формирования микроклимата и поддержания требуемого температурного режима можно на основе численных экспериментов, основанных на решении дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса. Применение численного моделирования позволяет учесть основные особенности конкретной задачи и найти оптимальное проектное решение, обеспечивающее требуемые микроклиматические условия при минимально возможных затратах энергии.

Для проведения компьютерного моделирования была разработана математическая модель, алгоритм и программный комплекс для расчета процессов переноса в отапливаемых помещениях, учитывающий три вида теплообмена: теплопроводность, конвекцию и излучение.

### Особенности теплообмена в помещениях в условиях применения различных отопительных приборов

Результаты исследований показывают, что теплообмен на внутренних поверхностях ограждений во многом определяется видом применяемого отопительного прибора и расположением ограждений, а также тепловыми условиями на их внешних поверхностях. В таблице 1 представлены доли конвекции  $\beta_k$  и радиации  $\beta_p$  в составе общего теплообмена на внутренних поверхностях ограждений, рассчитываемые по формуле:

$$\beta_{k(p)} = \frac{\sum |Q_{ik(p)}|}{\sum |Q_k| + \sum |Q_p|}, \quad (1)$$

где  $\sum |Q_k|$  и  $\sum |Q_p|$  — соответственно суммы абсолютных значений конвективных и радиационных тепловых потоков на поверхностях граничных областей, из которых состоят поверхности ограждений.

В условиях применения конвектора и радиатора теплоперенос в помещении происходит преимущественно конвективным путем. При использовании подоконной отопительной панели и напольного отопления характерно преобладание лучистого переноса теплоты.

Доли конвекции и радиации на внутренних поверхностях ограждений

Этаж	Доли конвективного и радиационного теплового потока на внутренних поверхностях ограждений ( $\beta_k$ и $\beta_p$ соответственно) в зависимости от вида отопительного прибора							
	радиатор		конвектор		подоконная отопительная панель*		напольное отопление	
	$\beta_k$	$\beta_p$	$\beta_k$	$\beta_p$	$\beta_k$	$\beta_p$	$\beta_k$	$\beta_p$
Нижний	0,51	0,49	0,58	0,42	0,39	0,61	0,37	0,63
Средний	0,58	0,42	0,64	0,36	0,49	0,51	0,44	0,56
Верхний	0,54	0,46	0,65	0,35	0,33	0,67	0,31	0,69
Среднее значение	0,54	0,46	0,62	0,38	0,40	0,60	0,37	0,63

\* Здесь и далее имеется в виду встроенная в ограждение подоконная отопительная панель.

Распределения параметров, определяющих теплообмен на поверхностях всех ограждений, характеризуются значительной неравномерностью. К примеру, максимальная интенсивность теплопереноса на поверхности пола формируется в месте установки приборов.

Различная интенсивность аэродинамических процессов в помещениях определяет значительные различия средних значений коэффициентов теплообмена  $a_0$ . Средние значения  $a_0$  находятся в диапазоне от 2 до 4 Вт/(м<sup>2</sup>·К) для большинства внутренних поверхностей наружных ограждений и внутренних перегородок, имеющих современные нормативные значения  $R_v$ , приведенные в [2]. Традиционно используемое нормативное значение  $a_0 = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) завышено.

Применение  $a_0 = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) определяет более интенсивный теплообмен на поверхности. При определении теплотерь условие  $a_0 = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) повышает значения расчетных потерь теплоты и позволяет обеспечить запас при определении мощности отопительного прибора. В то же время при проверке условия выпадения конденсата на внутренней поверхности ограждения завышенное значение  $a_0$  имеет негативный эффект, поскольку приводит к получению завышенной расчетной температуры поверхности относительно реального значения.

На рис. 1 и 2 представлены поля температуры и скорости воздуха в помещении, расположенном на нижнем этаже. Расчетная область представляет собой вертикальный разрез помещения, проходящий по середине окна. Внешняя поверхность трехслойной панели, расположенной слева, омывается наружным воздухом (минус 24 °С). Снизу находится подвал с температурой воздуха плюс 5 °С, сверху и справа — помещения, в которых поддерживается температура воздуха плюс 20 °С.

На упомянутых рисунках, а также последующих аналогичных изображениях, сплошные цветные линии являются изотермами. Числовые зна-

чения изотерм показаны в легенде справа от расчетной области. Стрелки отражают поле скорости, их длина пропорциональна абсолютному значению скорости. Масштабная стрелка, соответствующая скорости 1 м/с, указана в верхней части рисунка.

В случае применения радиатора, конвектора и подоконной отопительной панели наблюдаются подобные картины движения воздуха. Это связано с компактностью данных приборов и одинаковым расположением — под окном. Заметно отличается распределение параметров микроклимата при использовании напольного отопления.

При использовании радиатора (рис. 1) воздух, нагретый прибором, поднимается вверх и встречается с охлажденным у поверхности окна потоком воздуха, который опускается вниз. Поток смеси далее движется вглубь комнаты. В отапливаемом помещении формируется два основных вихря. Первый вихрь закручен против часовой стрелки и формируется воздухом, охлажденным на поверхности окна. Второй вихрь — с циркуляцией по часовой стрелке — индуцирован конвективной теплотой, поступающей к воздуху от радиатора.

Качественно иной характер формирующейся картины движения воздуха в условиях использования напольного отопления (рис. 2) обусловлен распределением отопительной мощности в полу практически по всей ширине помещения и ограничением температуры поверхности пола по санитарно-гигиеническим соображениям. В данном случае воздух, охлаждаемый окном и наружной стеной, не встречает препятствие в виде нагретого отопительным прибором потока воздушной среды. Подогрев настилающейся холодной струи воздуха осуществляется далее теплым полом. Таким образом, в помещении формируется только один вихрь с циркуляцией против часовой стрелки.

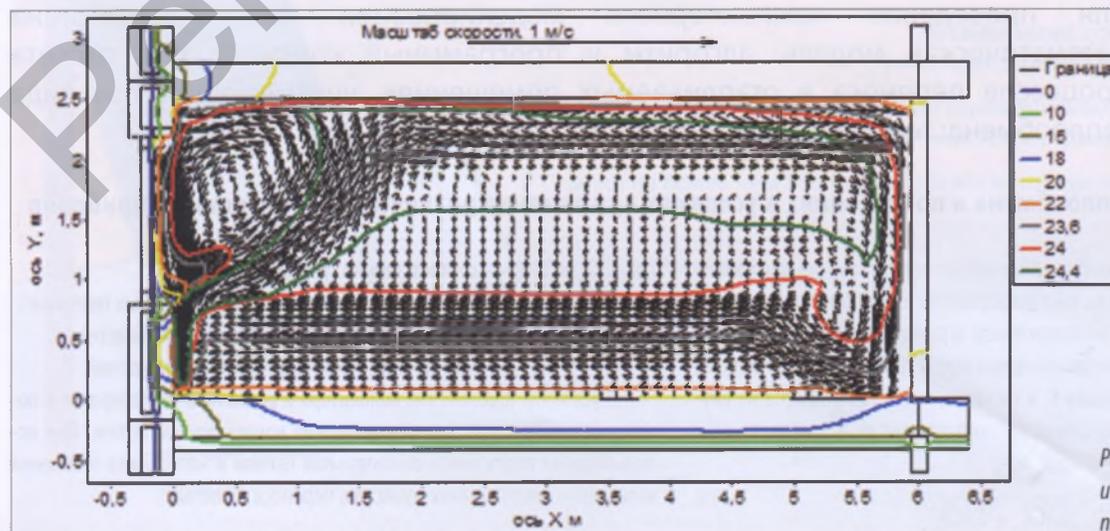


Рис. 1. Поля температуры и скорости. Отопительный прибор — радиатор

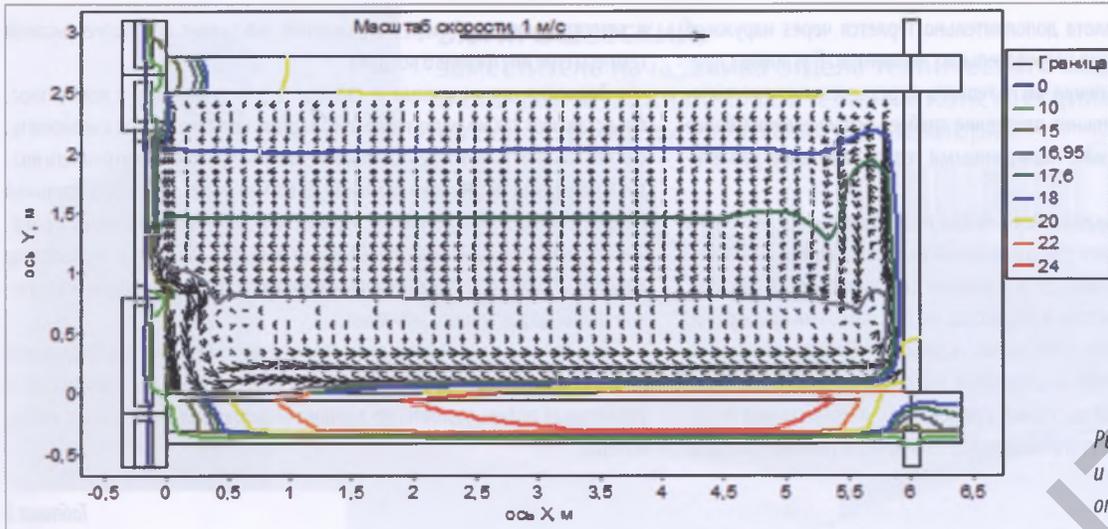


Рис. 2. Поля температуры и скорости. Напольное отопление

### Выбор вида отопительного прибора

Вид отопительного прибора определяет особенности формирования полей параметров микроклимата в отапливаемом помещении и уровень теплового комфорта.

Не следует использовать напольное отопление в области размещения постоянного рабочего места, а также мебели (особенно вблизи окна), поскольку охлажденный поток воздуха ввиду отсутствия подоконных отопительных приборов беспрепятственно опускается вниз и движется вдоль пола или настигается на поверхность мебели. Повышение мощности напольного отопления вблизи окна не позволяет решить данную проблему, поскольку приводит к превышению допустимой температуры поверхности пола. Для обеспечения требуемых параметров воздуха вблизи наружного ограждения следует использовать компактные приборы с преимущественно конвективной теплоотдачей (конвекторы, радиаторы и т. п.).

Отопительные приборы, размещенные под окном, обеспечивают более равномерное распределение температуры в объеме отапливаемого помещения. Для напольного отопления характерна тенденция к возникновению температурной стратификации воздуха, когда в верхней зоне помещения скапливается более теплый воздух.

При одинаковой мощности различных видов отопительных приборов

при прочих равных условиях более высокие значения средней температуры воздуха в помещениях обеспечивают конвекторы и радиаторы. Применение панельно-лучистого отопления (подоконной панели и напольного отопления) гарантирует более низкие температуры воздуха. Причина заключается в различных значениях фактических теплопотерь.

В таблице 2 указаны значения относительного отклонения температуры внутреннего воздуха  $\varepsilon$ , %, в условиях применения различных отопительных приборов в помещениях нижнего, среднего и верхнего этажей (при определении их мощности в соответствии с традиционной методикой). Значения  $\varepsilon$  рассчитаны по формуле:

$$\varepsilon = \frac{T_{в.ф} - T_{в}}{T_{в} - T_{н}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $T_{в.ф}$  — фактическая средняя температура внутреннего воздуха;  
 $T_{в}$  — расчетная температура внутреннего воздуха;  
 $T_{н}$  — расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы отопления.

Таблица 2

Доли конвекции и радиации на внутренних поверхностях ограждений

Этаж	Значения параметра $\varepsilon$ , %, определенного по формуле, в зависимости от вида отопительного прибора			
	радиатор	конвектор	подоконная отопительная панель	напольное отопление
Нижний	8,8	11,5	-3,3	-5,7
Средний	5,4	7,9	-4,8	-7,9
Верхний	8,3	11,2	-4,2	-9,3

Данные таблицы 2 показывают, что конвектор и радиатор обеспечивают более высокую температуру воздуха в помещении по сравнению с расчетным значением  $T_{в}$ . Приборы панельного отопления при той же мощности обеспечивают более низкое значение температуры внутренней среды при одинаковых прочих условиях (теплозащитных характеристиках ограждений и т. п.).

Основные факторы, определяющие отличие последствий применения различных отопительных приборов, в процессе формирования параметров микроклимата в помещении:

1) место расположения нагревательных элементов;

2) особенности теплообмена внутри помещения.

Влияние первого фактора заключается в том, что нагревательные элементы конвектора (радиатора) передают основную часть выделяемой теплоты непосредственно воздушной среде помещения. Локальный перегрев внутренней поверхности наружных ограждений (расположенных в районе установки прибора) мал, что минимизирует дополнительные потери теплоты, поэтому обеспечивается более высокая температура внутреннего воздуха. Применение приборов панельно-лучистого отопления менее эффективно по причине формирования существенных дополнительных потерь теплоты. Например, при использовании подоконной

отопительной панели теплота дополнительно теряется через наружную стену в области размещения нагревательных элементов. В условиях применения напольного отопления часть теплоты переходит в нижерасположенное помещение. Панельное отопление требует использования более дорогостоящих ограждений с повышенными теплозащитными характеристиками.

Второй фактор, выражающийся в более низких реальных значениях  $a_6$  для внутренних поверхностей ограждений с современными значениями  $R_{\Sigma}$  указанными в [2], приводит к усилению действия первого фактора. При использовании конвектора и радиатора воздух, нагретый приборами, отдает меньшее количество теплоты ограждениям, чем рассчитанное по завышенному нормативному  $a_6$ . Реальные теплотопотери ниже, чем определенные по нормативной методике, приведенной в приложении Ж [3]. Поэтому баланс между поступлением теплоты от конвективных приборов

и теплотой, уходящей через ограждения, наступает при более высокой температуре внутреннего воздуха.

Значения, приведенные в таблице 2 для радиатора и конвектора, представляют также долю тепловой энергии, которую можно сэкономить, снизив мощность прибора, для понижения температуры внутреннего воздуха до уровня расчетного значения. В случае подоконной отопительной панели и напольного отопления абсолютные значения из таблицы 2 показывают, на какую величину необходимо повысить полезную теплоотдачу прибора, чтобы обеспечить увеличение температуры внутренней воздушной среды до расчетного значения.

В таблице 3 дана оценка доли теплоты, непродуктивно расходуемой на нагрев ограждений, прилегающих к нагревательным элементам, и увеличение потерь теплоты во внешнюю среду (сверх расчетных теплотопотерь).

Таблица 3

**Оценка доли теплоты**

Этаж	Непродуктивно расходуемая часть тепловой нагрузки отопительного прибора, %, в зависимости от вида отопительного прибора			
	радиатор	конвектор	подоконная отопительная панель	напольное отопление
Нижний	4,8	2,9	28	20
Средний	4,8	3,2	29	31
Верхний	5,6	3,1	28	26

По данным таблицы 3 видно, что в условиях применения конвектора и радиатора наиболее рационально используется тепловая энергия. При этом радиатор осуществляет несколько больший нагрев прилегающей области наружной стены, что обуславливается повышенным по сравнению с конвектором уровнем радиационной теплоотдачи. Доля непродуктивно

затрачиваемой теплоты для подоконной отопительной панели и напольного отопления выше по сравнению с конвектором и радиатором.

Данные таблицы 4 предоставляют возможность сопоставить различные виды приборов.

Таблица 4

**Таблица сравнения отопительных приборов**

Параметры сравнения	Вид отопительного прибора			
	радиатор	конвектор	подоконная отоп. панель	напольное отопление
Эффективность <sup>1)</sup>	+	+	—	—
Необходимость дополнительного утепления ограждений <sup>2)</sup>	—	—	+	+
Ремонтопригодность <sup>3)</sup>	+	+	—	—
Применимость для переменного режима работы <sup>4)</sup>	+	+	—	—
Перехват холодных потоков воздуха от остекления <sup>5)</sup>	+	+	+	—
Использование в атриумах <sup>6)</sup>	—	+	—	—
Поддержание комфортной температуры поверхности пола	—	—	—	+

- 1) Показывает сопоставимость приборов по количеству затрачиваемой тепловой энергии для поддержания заданной температуры воздуха в помещении при одинаковых условиях.
  - 2) Касается ограждающих конструкций, в которых располагаются нагревательные элементы.
  - 3) Показывает возможность ремонта или замены отопительного прибора в случае его выхода из строя (без демонтажа ограждений, включая их отдельные слои).
  - 4) Определяется учетом тепловой инерции отопительного прибора.
  - 5) Относится к случаю установки отопительных приборов в помещении высотой до 3 м.
  - 6) Отражает возможность применения приборов данного вида для зонального отопления (то есть при размещении приборов возле остекления на различных отметках).
- Примечание. Знак «+» в ячейке отражает наличие характеристики, указанной в соответствующей строке, у данного прибора. Знак «—» указывает на отсутствие рассматриваемой характеристики.

В помещениях жилых и общественных зданий следует применять приборы с преимущественно конвективной теплоотдачей (конвекторы и радиаторы различных модификаций).

Напольное отопление предпочтительнее использовать совместно с радиаторами или конвекторами, размещенными под окнами. При этом

основная задача напольного отопления — обеспечение комфортной температуры поверхности пола в местах возможного пребывания человека.

Продолжение следует.