

Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов

*Д.т.н., профессор Т.А. Дацюк;
инженер Ю.П. Ивлев;*

к.т.н., доцент В.А. Пухкал,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Ключевые слова: микроклимат; отопление; вентиляция; жилые помещения; моделирование

Снижение энергопотребления зданиями и системами отопления в них является актуальной задачей при проектировании и эксплуатации. Об этом свидетельствует принятие федерального закона Российской Федерации №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Под энергосбережением, в частности, понимается реализация технических мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования.

Современные требования к системам отопления заключаются в том, что температура в помещениях с длительным пребыванием людей должна постоянно поддерживаться на комфортном уровне с незначительными отклонениями, а затраты тепловой энергии – точно соответствовать потребностям в любой момент времени.

Расчетные потери теплоты, возмещаемые отоплением, определяются из уравнения стационарного теплового баланса. Тепловой баланс здания в целом и баланс каждого отапливаемого помещения жилого здания находятся из зависимости [1]:

$$Q_{m.n} = Q_{огр} + Q_u - Q_{быт}, \text{ Вт},$$

где $Q_{m.n}$ – тепловые потери помещения, возмещаемые системой отопления, Вт;

$Q_{огр}$ – тепловые потери через ограждения здания (помещения), Вт;

Q_u – затраты теплоты на нагрев наружного воздуха в объеме инфильтрации или санитарной нормы, Вт;

$Q_{быт}$ – суммарные теплопоступления за счет всех внутренних источников теплоты, за исключением системы отопления (к бытовым условно относятся тепловыделения от электробытовых и осветительных приборов, кухонных плит, разводки трубопроводов горячего водоснабжения и непосредственно потребляемой горячей воды; людей, находящихся в помещении), Вт.

В жилых зданиях и помещениях предусматривается естественная вентиляция: приток воздуха выполняется через неплотности ограждающих конструкций, форточки, клапаны; вытяжка – естественная, из мест наибольшего загрязнения в квартире через вытяжные вентиляционные каналы.

Для повышения энергоэффективности систем отопления возможно использование прерывистого режима подачи теплоносителя [1]. В целях экономии тепловой энергии согласно работе [1] допускается снижение температуры воздуха в жилых помещениях до +15 °С при отсутствии людей. Эффективность применения метода прерывистого отопления для жилых зданий массовой застройки показана в работе [2].

Существенными факторами, от которых зависит самочувствие человека в помещении, являются распределения температуры и скорости движения воздуха в объеме помещения. Однако сведения о таких исследованиях очень ограничены.

Поля температуры и скорости воздуха в жилых помещениях при подаче наружного воздуха через вентиляционные клапаны неоднородны. При открытых клапанах вблизи наружной поверхности наблюдаются зоны пониженной температуры, где четко прослеживаются границы факела холодного воздуха. Особенности формирования поля температуры и скорости в помещении в значительной степени зависят также от типа отопительного прибора и его размещения. Многообразие типов отопительных приборов, предлагаемых отечественными и зарубежными производителями, приводит к необходимости проведения сравнительных исследований по оценке их эффективности. Такие исследования, направленные на изучение формирования температурного поля отапливаемых жилых помещений с учетом естественной вентиляции, представляют интерес как для проектировщиков, так и для производителей отопительных приборов.

Обзор литературы

Отопительные приборы следует размещать, как правило, под световыми проемами [1]. Рекомендуемая длина отопительного прибора – не менее 75% длины светового проема (в жилых зданиях – не менее 50%).

Производительность по воздуху (воздухообмен) систем естественной вентиляции жилых зданий зависит от температуры наружного воздуха. С понижением температуры наружного воздуха увеличивается расход удаляемого и приточного воздуха [3, 4]. В работе [3] сделан вывод об экономической целесообразности ограничения и стабилизации расхода воздуха естественной вытяжной вентиляции жилых зданий. Приточные вентиляционные устройства также должны применяться с регулированием расхода воздуха [4, 5]. Поэтому расчет систем вентиляции следует выполнять для одного расчетного расхода воздуха.

Основным направлением в исследовании микроклимата, а также систем отопления и вентиляции жилых помещений следует считать применение математических методов [6–14]. В ряде работ [8, 12, 14, 15] для частных случаев определены температурные и скоростные поля в объеме помещения. В наибольшей степени задачам исследования соответствуют результаты математического моделирования, приведенные в работе [15] и представленные на рисунках 1–5.

В качестве критерия качества в приведенных ниже ситуациях, смоделированных в Дрезденском техническом университете, был выбран риск возникновения сквозняка DR (Draft-Risk). В зоне пребывания людей он не должен превышать 15%, то есть, только от 15 человек из 100 можно ожидать жалоб на то, что в этом месте в помещении имеется сквозняк. Для моделирования принята температура наружного воздуха, равная $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Дискомфорт из-за сквозняка может быть выражен с помощью прогнозируемого процента людей, недовольных наличием сквозняка (DR) [16]:

$$DR = (34 - t)(\bar{v} - 0,05)^{0,62} (0,37\bar{v} \cdot Tu + 3,14), \text{ Вт},$$

где t – локальная температура воздуха; $^{\circ}\text{C}$;

\bar{v} – локальная средняя скорость движения воздуха, м/с;

Tu – локальная интенсивность турбулентности, %.

По величине фактора DR выделены три категории помещений (рисунки 1–5): А, В, С.

Проведены исследования различных вариантов взаимного расположения отопительных приборов и устройств подачи воздуха (УПВ). При моделировании систем температура наружного воздуха принималась $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Первый вариант (рисунок 1): УПВ встроено над отопительным прибором под окном (оптимальный вариант); в качестве отопительного прибора принят радиатор. Поступающий снаружи воздух нагревается конвективным потоком от отопительного прибора. Ожидать возникновения сквозняка в зоне нахождения людей (зона ограничена белой рамкой на плане помещения) не приходится. Разница между 0,25-кратным ($n=0,25\text{ ч}^{-1}$) и 0,5-кратным ($n=0,25\text{ ч}^{-1}$) воздухообменом в зоне нахождения людей практически неразличима.

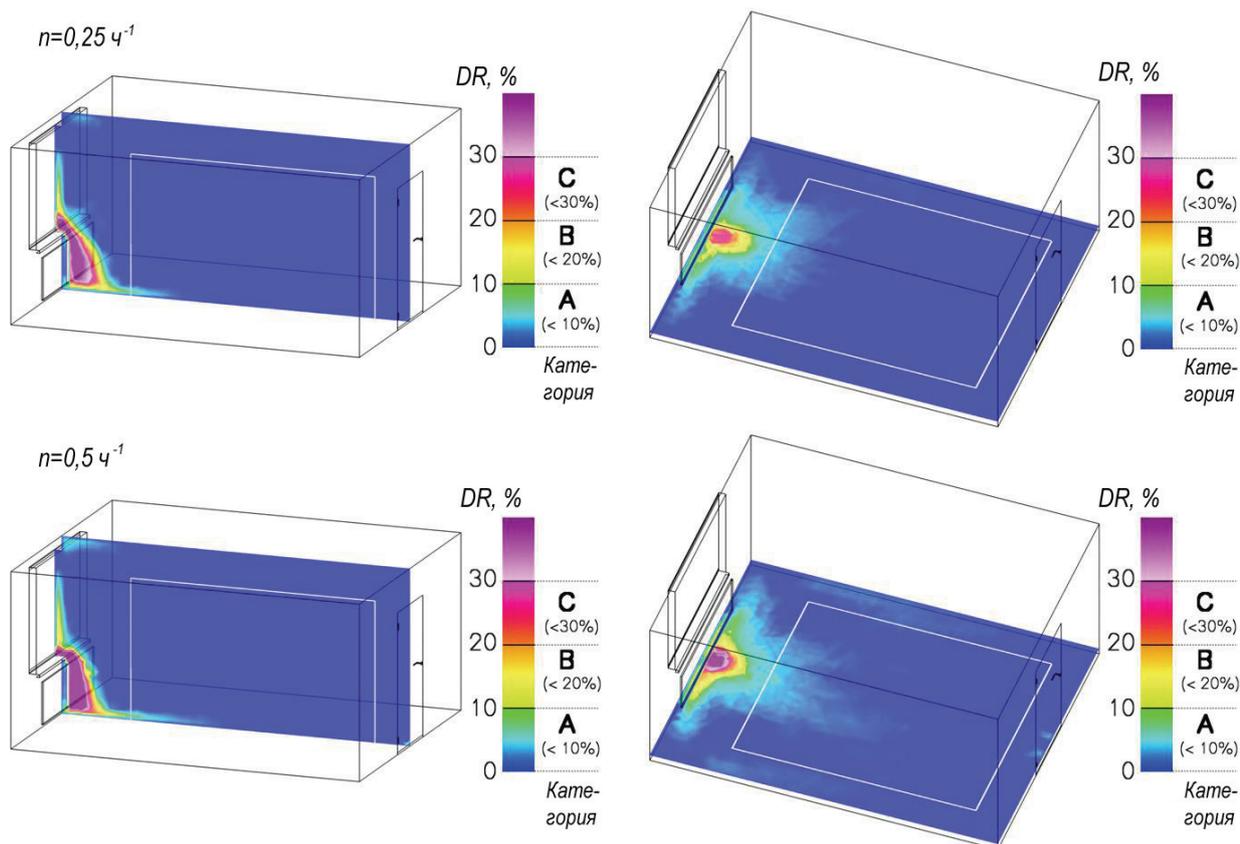


Рисунок 1. Распределение риска возникновения сквозняка в помещении для первого варианта

Второй вариант (рисунок 2): расположение УПВ над отопительным прибором сверху над окном; отопительный прибор – радиатор. Этот вариант также вполне допустим. Свежий воздух поступает в помещение над окном, опускается вниз и, прежде чем достичь зоны нахождения людей, нагревается восходящим конвективным потоком от отопительного прибора. На уровне пола наблюдается очень малая вероятность возникновения сквозняка (<5%). Здесь разница между 0,25-кратным и 0,5-кратным воздухообменом в зоне нахождения людей также практически незаметна. Только непосредственно под УПВ при 0,5-кратном воздухообмене имеется более существенный риск образования сквозняков (до 20%).

Третий вариант (рисунок 3): расположение УПВ сбоку сверху над отопительным прибором, рядом с окном; отопительный прибор – радиатор.

При базовом воздухообмене $n = 0,25 \text{ ч}^{-1}$ воздух из приточного отверстия в основном опускается вниз. Незначительная его часть скапливается под потолком. Нагревание воздуха происходит вне пределов зоны нахождения людей так, что в этой зоне риск образования сквозняка составляет менее 15%. При 0,5-кратном воздухообмене критическая с точки зрения образования сквозняков область по-прежнему находится вне зоны нахождения людей. Риск образования сквозняка в зоне нахождения людей составляет менее 15% и ограничивается небольшой частью помещения.

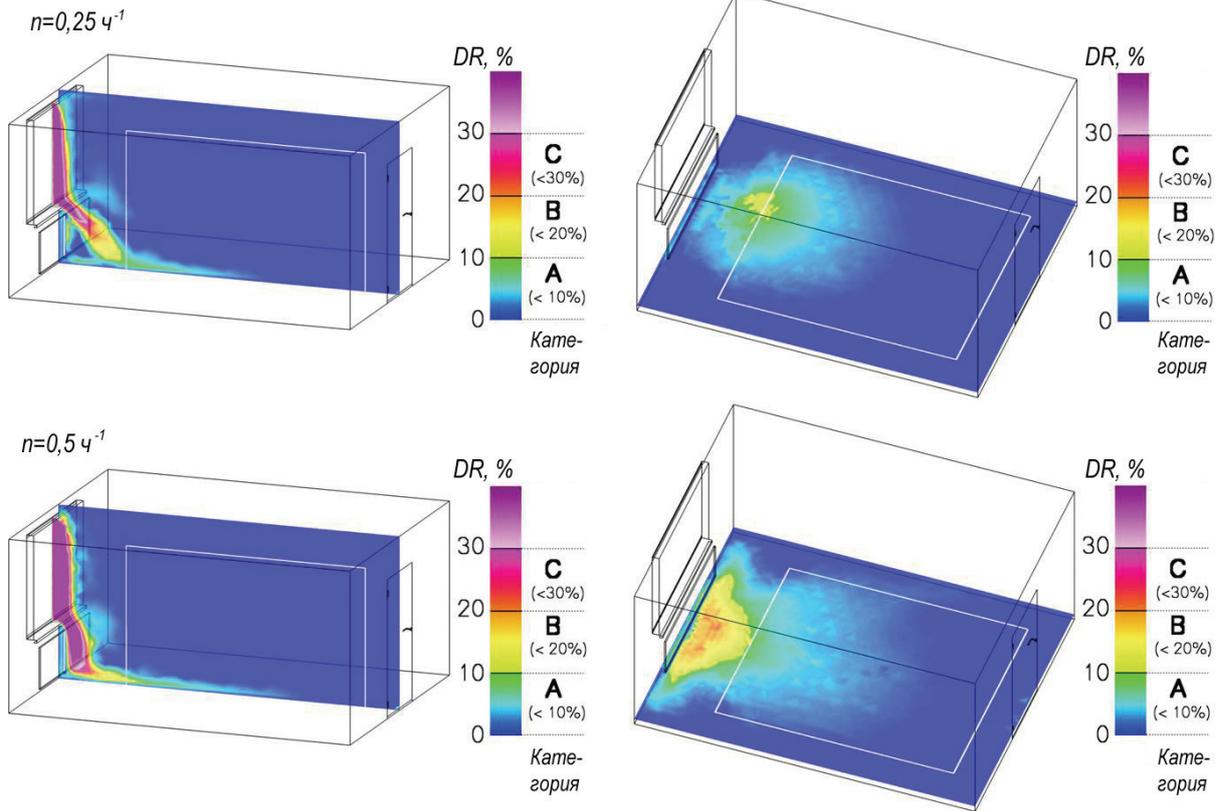


Рисунок 2. Распределение риска возникновения сквозняка в помещении для второго варианта

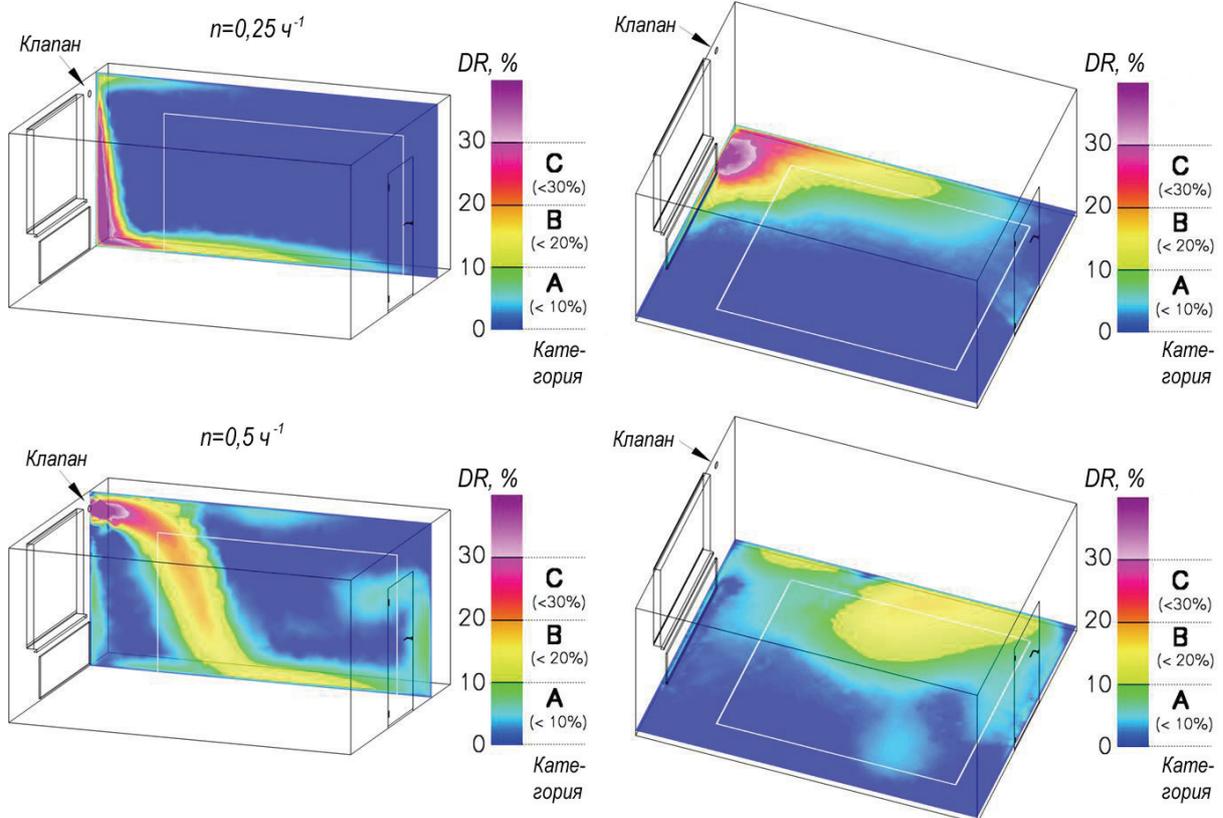


Рисунок 3. Распределение риска возникновения сквозняка в помещении для третьего варианта

Дацюк Т.А., Ивлев Ю.П., Пужкал В.А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов

Четвертый вариант (рисунок 4): система отопления «теплый пол»; расположение УПВ под окном. При таком расположении УПВ поступающий наружный воздух опускается вниз. Его нагрев и в этом случае происходит вне зоны нахождения людей.

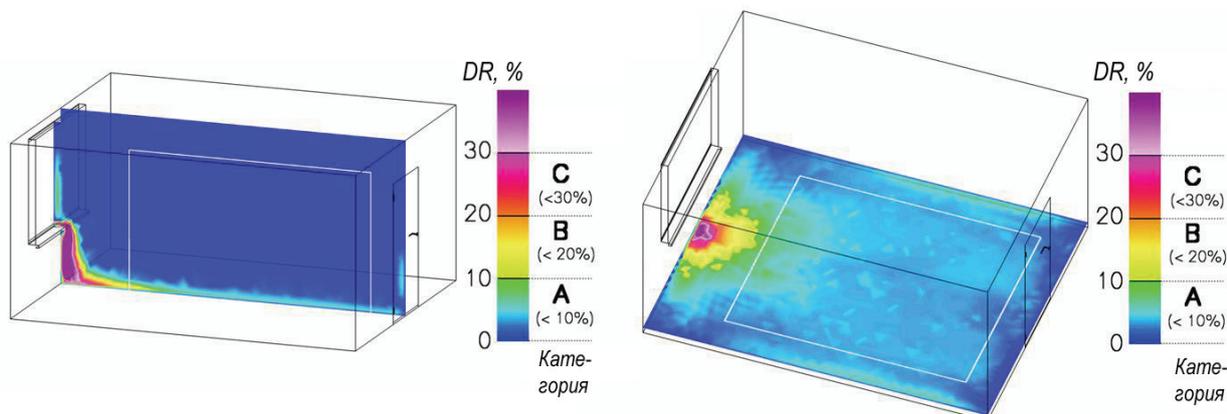


Рисунок 4. Распределение риска возникновения сквозняка в помещении для четвертого варианта

Пятый вариант (рисунок 5): система отопления «теплый пол»; расположение УПВ сверху сбоку над окном. В этом случае складывается менее благоприятная ситуация по сравнению с предыдущим вариантом. Вблизи пола в углу зоны нахождения людей имеется риск возникновения сквозняков, который составляет до 20%.

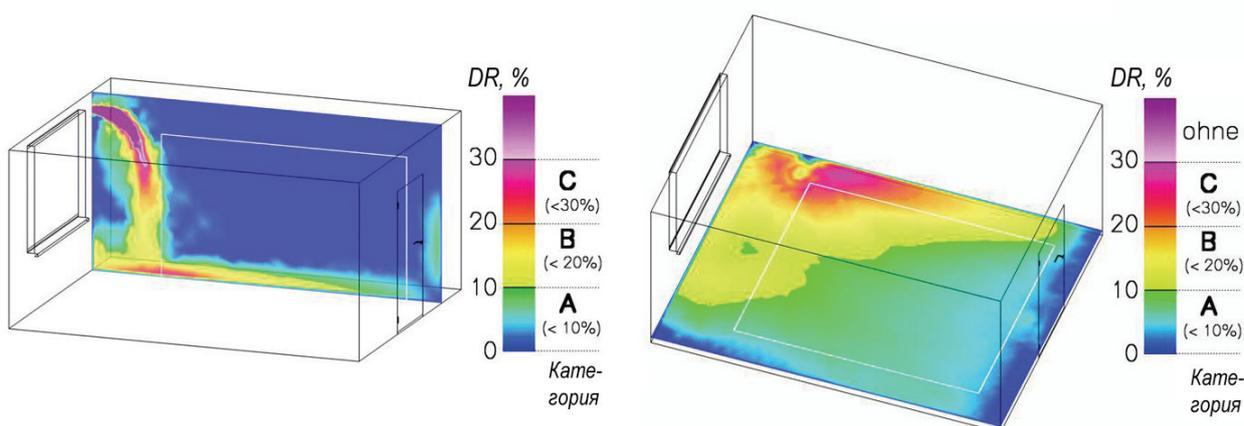


Рисунок 5. Распределение риска возникновения сквозняка в помещении для пятого варианта

Температурные и скоростные поля в жилых помещениях необходимо рассчитывать на основе представления здания как единой энергетической системы, включающей, кроме ограждающих конструкций, системы отопления и вентиляции. Анализ литературных сведений показал, что проведенные исследования распределения температурных и скоростных полей в помещении основаны на следующих предпосылках:

- температурные и скоростные поля воздуха в помещении стационарные;
- теплообмен между отопительным прибором и ограждающими конструкциями, а также между отопительным прибором и воздухом помещения описывается без разделения на лучистую и конвективную составляющие.

В действительности же во многих случаях формирование температурных и скоростных полей в помещении имеет сложную природу [9, 13, 17, 18, 20–25]. На них также оказывает влияние режим работы отопительных приборов, а он для современных систем отопления, характеризующихся применением индивидуального регулирования теплового потока отопительных приборов с помощью терморегулирующих клапанов, нестационарный. Кроме того, применяются приборы с различными видами преобладающей теплоотдачи. В жилых помещениях отопительные приборы выполняют также функции системы вентиляции: используются для подогрева приточного наружного воздуха.

Дацюк Т.А., Ивлев Ю.П., Пухкал В.А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов

Расчетные условия наружного воздуха и кратность воздухообмена в помещении, при которых выполнялся анализ, не соответствуют требованиям российских строительных норм и правил [1].

Постановка задачи

Для изучения особенностей формирования микроклимата в помещениях с притоком через вентиляционные клапаны и отопительными приборами разного типа (конвектор и радиатор) использован метод численного моделирования, который в последнее время получил широкое распространение. Решение уравнений гидродинамики в сочетании с начальными и граничными условиями позволяет получить информацию о распределении температуры и скорости воздушного потока в изучаемом объеме. Особый интерес представляет решение нестационарной задачи, которое позволяет оценить временные закономерности изменения температуры и скорости воздуха в различных зонах отапливаемых помещений.

Условия моделирования работы отопительных приборов (конвектора и радиатора) в жилом помещении приведены в работе [19]. Отметим основные из них:

- $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ – расчетная температура наружного воздуха;
- $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – расчетная температура внутреннего воздуха;
- $95/70\text{ }^{\circ}\text{C}$ – параметры теплоносителя для отопительного прибора (применительно к двухтрубной системе водяного отопления).

Конвектор моделировался в виде прямоугольного блока. На верхней грани блока имитировалась выходная решетка конвектора, через которую моделировался выход струи нагретого воздуха; поступление воздуха из помещения – через нижнюю грань блока. Принятые параметры струи соответствовали условию, что конвективная составляющая теплового потока – 94%. Остальная часть теплового потока, излучаемая нагретым кожухом прибора, моделировалась как радиационная составляющая (6% от общего теплового потока). При распределении составляющих теплового потока за основу были приняты результаты экспериментальных исследований конвектора типа «Atoll Pro» производства ОАО «Фирма Изотерм» (Санкт-Петербург).

Радиатор моделировался в виде прямоугольного блока, заполненного условным материалом со специально подобранными характеристиками, чтобы имитировать теплоемкость массивной металлической конструкции радиатора. Полный тепловой поток радиатора был распределен следующим образом: 50% – конвективная составляющая и 50% – радиационная составляющая.

Поступление приточного воздуха в помещение осуществлялось через два приточных щелевых вентиляционных клапана, расположенных в верхней части оконного блока. Удаление воздуха из комнаты выполнялось через щель, имитирующую зазор под закрытой дверью, расположенной в стене напротив окна. В помещении обеспечивался однократный воздухообмен.

Описание исследования

Приведенные ниже результаты иллюстрируют влияние работы системы отопления при прерывистом режиме с отопительными приборами разного типа (радиаторы и конвекторы) на параметры микроклимата жилого помещения с естественной вентиляцией, полученные методом численного моделирования.

Расчет проводился с использованием пакета «STAR-CD». Системы уравнений аэродинамики и теплопереноса решались в нестационарной постановке с шагом по времени, который варьировался от 1 до 10 с. Начальная температура воздуха в помещении перед включением отопительных приборов была принята равной $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В ходе расчета контролировались температуры воздуха в четырех контрольных точках:

- точки 1 и 3 были расположены на высоте 1,7 м от пола и на расстоянии от окна, соответственно, 2 и 4 м;
- точки 2 и 4 были расположены на высоте 0,5 м от пола и на расстоянии от окна, соответственно, 2 и 4 м.

Для двух типов отопительных приборов были получены поля модулей скорости и температуры в объеме жилого помещения в фиксированные моменты времени.

Предварительный нагрев помещения выполнялся при закрытых приточных клапанах:

- после включения конвектора температура в верхних контрольных точках (1 и 3) достигла 28 °С за 10 минут; в нижних точках (2 и 4) температура достигла 23 °С за 12–14 минут;
- при нагревании воздуха в комнате радиатором температура в верхних точках достигла 28 °С за 30 минут; в нижних контрольных точках (2 и 4) при работе радиатора температура была выше, чем для конвектора, на 3 °С и достигла значений 26 °С также за 30 минут.

В режиме нагрева помещения при работе конвектора температура в верхних контрольных точках устанавливалась в 3 раза быстрее, чем при работе радиатора. При сравнении процесса нарастания температуры в нижних точках, где в меньшей степени сказывается влияние конвективной струи конвектора, видно, что прогрев воздуха при работе конвектора также происходит быстрее. Например, в точке 2 температура 23 °С при работе конвектора достигается за 12 мин, а при работе радиатора – за 20 мин.

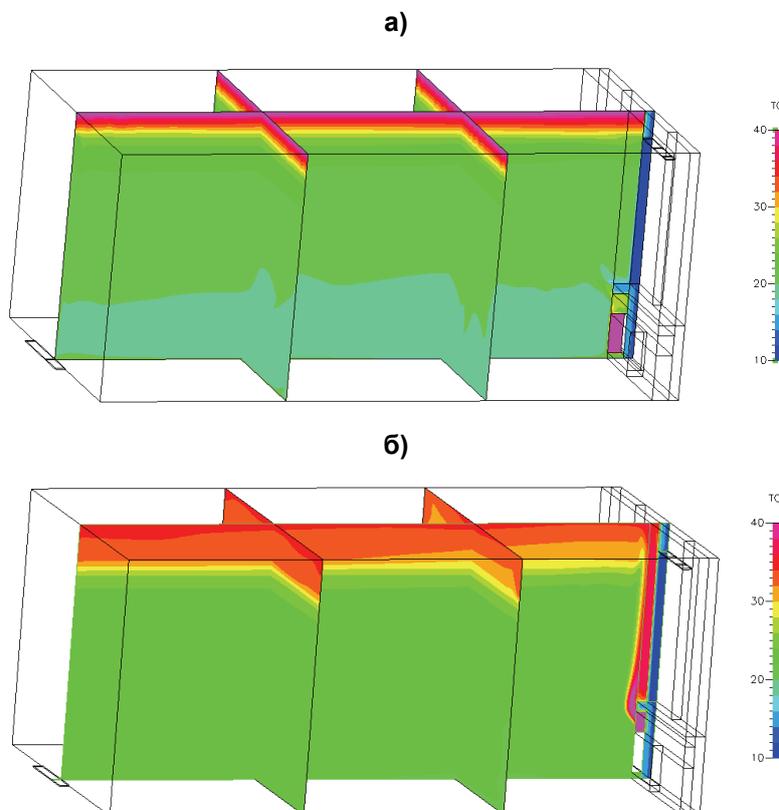
Открытие приточных клапанов проводилось при достижении температуры воздуха в верхних точках 28 °С.

Через 10 мин после открытия клапанов температура воздуха в контрольных точках снижалась до +22–24 °С для обоих приборов. Далее с течением времени температура во всех контрольных точках продолжала снижаться. Однако характер падения температуры (во всех контрольных точках) при работе радиатора был более резкий, чем для конвектора. Это объясняется большей подвижностью воздуха в помещении при работе конвектора, которая связана с взаимодействием более мощной конвективной струи нагретого воздуха с холодным приточным воздухом.

Через 50 минут после открытия клапана минимальная температура в контрольных точках при работе конвектора – 22–23 °С, а при работе радиатора – 19,5–21 °С, т. е. на 2 °С ниже.

В качестве иллюстрации работы отопительных приборов приведем расчетные поля температуры и модуля скорости через 49 минут счета от момента включения приборов – при достижении стационарного режима для конвектора (рисунки 6–9).

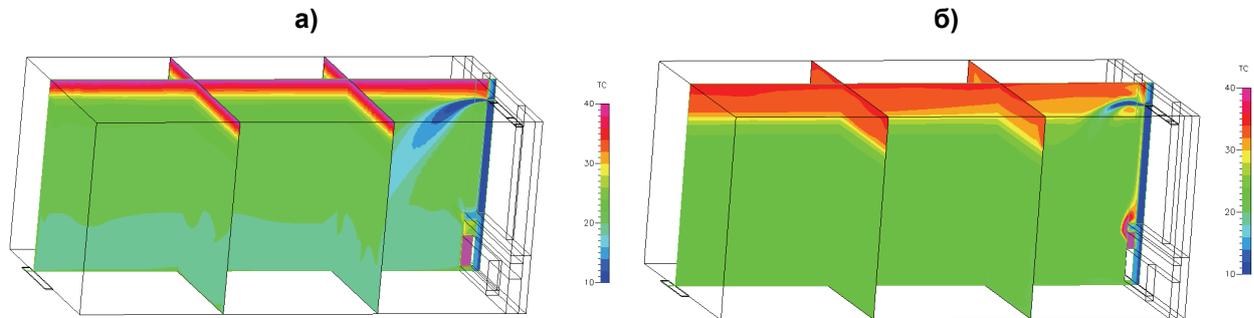
При работе конвектора поле температуры в комнате более равномерное по сравнению с радиатором. Четко прослеживается конвективная струя от конвектора, препятствующая проникновению холодного воздуха в нижнюю зону комнаты. Поле температуры однородно – температура во всех точках равна 22 °С. Зона с модулем скорости 0,2 м/с локализована в середине комнаты. В течение 10 минут поступления холодного воздуха в комнату при работе конвектора изменений в распределении температуры не наблюдается. Поле скорости за это время выравнивается.



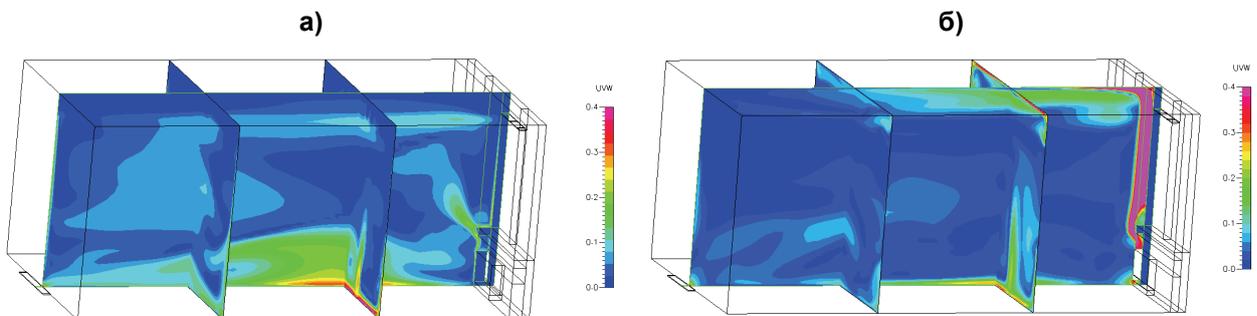
**Рисунок 6. Поле температуры в вертикальном сечении по центру комнаты:
а – при работе радиатора; б – при работе конвектора**

При работе конвектора струя холодного воздуха не достигает пола. Скорость струи на высоте подоконника составляет 0,2 м/с.

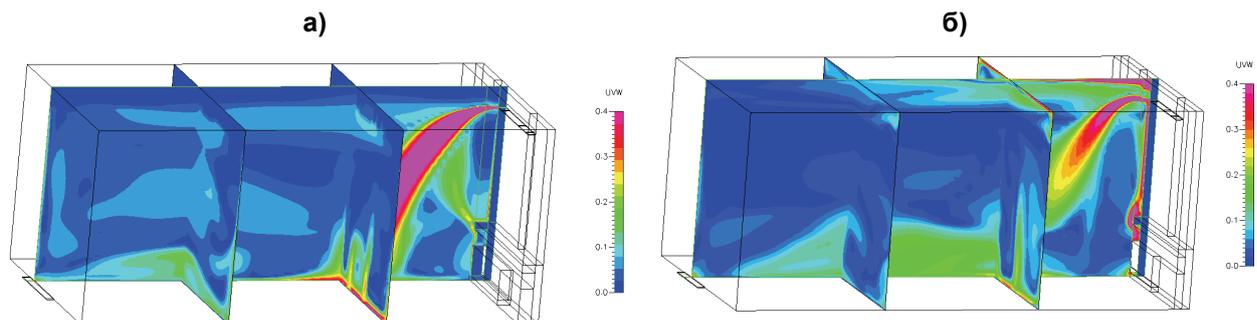
При работе радиатора холодный воздух от клапана опускается в нижнюю зону; температура в нижней части комнаты по всей длине ниже 20 °С. В нижней зоне комнаты по всей длине (высота 1 м и ниже) наблюдается большая, чем для конвектора, подвижность воздуха, модуль скорости равен 0,2–0,3 м/с. Для радиатора зона более высоких значений скорости локализована в центре нижней части комнаты.



**Рисунок 7. Поле температуры в вертикальном сечении комнаты по клапану:
а – при работе радиатора; б – при работе конвектора**



**Рисунок 8. Поле модуля скорости воздуха в вертикальном продольном сечении комнаты по
центру окна (комнаты):
а – при работе радиатора; б – при работе конвектора**



**Рисунок 9. Поле модуля скорости воздуха в вертикальном продольном сечении комнаты по
центру клапана:
а – при работе радиатора; б – при работе конвектора**

Факел холодного воздуха из клапана при работе радиатора достигает пола и захватывает почти всю 2-метровую зону, прилегающую к окну. Скорость потока воздуха у пола достигает 0,4 м/с. Струя достигает пола в пределах 2-метровой зоны вблизи окна. В случае конвектора нагретая конвективная струя препятствует опусканию холодного воздуха; в нижней зоне комнаты поддерживается более высокая температура.

Сравнение полей температуры в объеме помещения при работе конвектора и радиатора позволяет сделать вывод о том, что при работе конвектора поле температуры в комнате более однородно вследствие преобладания конвективной составляющей теплообмена. Распределение модуля скорости потока по объему комнаты при работе конвектора также более равномерно.

Заключение

1. Поля температуры и скорости воздуха в жилых помещениях при подаче наружного воздуха через вентиляционные клапаны неоднородны. Формирование поля температуры и скорости воздуха в помещении в значительной степени зависит от типа отопительного прибора.

2. Изучение особенностей формирования полей температуры и скорости в объеме жилой комнаты, выполненное методом численного моделирования, показало, что конвектор, имеющий более мощную конвективную струю по сравнению с радиатором, обеспечивает более стабильное и равномерное температурное и скоростное поле в объеме помещения при открытых приточных вентиляционных клапанах.

3. Наличие конвективной струи от конвектора позволяет поддерживать постоянной температуру в нижней зоне комнаты в течение более длительного промежутка времени после открытия приточных клапанов по сравнению с радиатором.

4. Использование конвекторов в качестве отопительных приборов предпочтительнее, чем радиаторов, т. к. они более динамичны.

5. В нормативных документах для жилых помещений в целях повышения энергоэффективности систем отопления путем применения прерывистого режима подачи теплоносителя необходимо установить длительность периода восстановления температуры внутреннего воздуха до расчетного значения.

Литература

1. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М.: Госстрой России, 2004. 56 с.
2. Мишин М.А. Исследование процессов остывания теплоносителя при прерывистом регулировании отопления // Ползуновский вестник. 2010. №1. С. 146–152.
3. Бройда В.А. Экономия тепловой энергии за счет стабилизации расхода естественной вытяжной вентиляции // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. №10(646). С. 54–58.
4. Кривошеин А.Д. Прогнозирование работы систем естественной вентиляции жилых зданий с организованным притоком воздуха // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. №4. С. 43–52.
5. Ливчак И.Ф., Наумов А.Л. Вентиляция многоэтажных жилых зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. 136 с.
6. Давыдов В.О., Максимова О.Б. Компьютерное моделирование тепловых режимов жилых зданий // Труды Одесского политехнического университета. 2009. №1. С. 67–72.
7. Дячек П.И., Макаревич С.А., Захаревич А.Э., Ливанский Д.Г. Математические методы в отоплении, вентиляции и кондиционировании воздуха // Вестник МГСУ. 2011. Вып. 7. С. 143–147.
8. Захаревич А.Э. Формирование параметров микроклимата в отапливаемых помещениях в условиях естественной конвекции: автореферат диссертации канд. техн. наук. Минск, 2012. 23 с.
9. Костин В.И. Здание как единая энергетическая и аэродинамическая система. Проблемы внедрения концепции // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. №12. С. 101–104.
10. Кувшинов Ю.Я. Теоретические основы обеспечения микроклимата помещения. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. 184 с.
11. Мамедов Н.Я., Жила В.А., Соловьева Е.Б. Применение современных информационных технологий для регулирования режима потребления тепловой энергии в зданиях // Вестник МГСУ. 2010. №2. С. 52–58.
12. Яковлев П.В., Яковлева Е.П. Математическое моделирование процессов формирования микроклимата в помещениях // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. №2. С. 77–81.

13. Bjarne W. Olesen. Radiant floor heating in theory and practice // ASHRAE Journal. 2002. Vol. 44. No.7. Pp. 19–24.
14. Gendelis S., Jakovičs A. Mathematical Modelling of Living Room with Different Type of Heating // Proceedings of the 4th WSEAS Int. Conf. on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT, Elounda, Greece, August 21–23, 2006. Pp. 248–253.
15. LUNOS Catalogue for residential Ventilation Climate for a Feeling of Wellness with LUNOS Ventilation Systems. URL: www.lunos.de/?wpfb_dl=305 (дата обращения: 31.08.2013).
16. ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта (ISO 7730: 2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (IDT)). М.: Стандартинформ, 2011.
17. Костин В.И., Мухин А.И. Влияние лучисто-конвективного теплообмена внутри помещения на температурные поля ограждающих конструкций/научное издание // Известия вузов. Строительство. 2003. №6(534). С. 55–59.
18. Фролов А.А. Бетонные отопительные приборы // Инженерно-строительный журнал. 2009. №7(9). С. 22–25.
19. Дацюк Т.А., Таурит В.Р. Моделирование микроклимата жилых помещений // Вестник гражданских инженеров. 2012. №4(33). С. 196–198.
20. Allocca C., Chen Q., Glicksman L.R. Design analysis of single-sided natural ventilation // Energy and Buildings. 2003. No.35(8). Pp. 785–795.
21. Costolaa D., Etheridge D.W. Unsteady natural ventilation at model scale – Flow reversal and discharge coefficients of a short stack and an orifice // Building and Environment. 2008. Vol. 42. Issue 9. Pp. 1491–1506.
22. Fitzgerald S.D., Woods A.W. The influence of stacks on flow patterns and stratification associated with natural ventilation // Building and Environment. 2008. Vol. 43. Issue 10. Pp. 1719–1733.
23. Fitzgerald S.D., Woods A.W. Natural ventilation of a room with vents at multiple levels // Building and Environment. 2004. Vol. 39. Issue 5. Pp. 505–521.
24. Guohui Gan Effective depth of fresh air distribution in rooms with single-sided natural ventilation // Energy and Buildings. 2000. Vol. 31. Issue 1. Pp. 65–73.
25. Livermore S.R., Woods A.W. Natural ventilation of a building with heating at multiple levels // Building and Environment. 2007. Vol. 42. Issue 3. Pp. 1417–1430.

*Тамара Александровна Дацюк, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)9441013; эл. почта: tdatsuk@mail.ru*

*Юрий Павлович Ивлев, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)7337249; эл. почта: pva1111@rambler.ru*

*Виктор Алексеевич Пухкал, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)5750531; эл. почта: pva1111@rambler.ru*

© Дацюк Т.А., Ивлев Ю.П., Пухкал В.А., 2013