

УДК 697.1:536.25

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА
ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

Асп. ЗАХАРЕВИЧ А. Э.

Белорусский национальный технический университет

Обеспечение требуемых параметров микроклимата в помещениях различного назначения является важной и актуальной задачей. От ее решения зависят самочувствие и работоспособность людей, а также качество производимой продукции.

Распределение параметров микроклимата в объеме отапливаемых помещений – результат взаимодействия множества факторов, среди которых: теплотехнические характеристики ограждений; режим погоды; геометрия помещений с размещенной внутри мебелью, оборудованием и т. п.; температурный режим сопряженных помещений; тип, мощность и расположение отопительных приборов; параметры системы вентиляции; наличие внутренних стоков и источников теплоты и т. д. Большое количество параметров, оказывающих влияние на формирование микроклимата, определяет ее сложность и системность, а также многообразие путей решения.

Применяемые нормативные методики теплотехнических расчетов и проектирования систем отопления основаны главным образом на использовании осредненных значений расчетных величин, рассматриваемых для установившихся режимов. Реальные процессы переноса являются нестационарными и переменными в пространстве. В итоге численное значение локальных и мгновенных параметров микроклимата остается за рамками анализа.

Наиболее эффективно и глубоко изучить данную проблему можно на основе численных экспериментов, основанных на решении дифференциальных уравнений, описывающих поведение изучаемой системы. Применение численного моделирования позволяет учесть все нюансы конкретной задачи и найти оптимальное решение. Достоверность получаемых таким образом результатов доказана опытом исследований в различных областях науки и техники.

Основные дифференциальные уравнения, описание разработанной численной модели отапливаемого помещения, а также некоторые функциональные возможности созданной программы представлены в [1].

В данной статье освещаются результаты некоторых расчетов, проведенных в ходе работы над грантом Министерства образования Республики Беларусь [2]. Цель проведения расчетов – определение влияния вида системы отопления на распределение параметров микроклимата в отапливаемых помещениях, расположенных на нижнем, среднем и верхнем этажах здания.

Проведены три серии расчетов полей распределения параметров микроклимата в помещении. Серия № 1 расчетов соответствует случаю, когда помещение располагается на нижнем этаже здания; серия № 2 – помещение на среднем этаже; серия № 3 – помещение на верхнем этаже. Размеры помещения: высота $H = 2,5$ м; длина $L = 6$ м. Расчетная область размером и формой представляет собой вертикальный разрез по окну ограждающих конструкций и воздушной среды помещения. Мебель, люди, стоки и источники теплоты отсутствуют.

На границе «ограждение – воздух помещения» используются граничные условия третьего рода. При этом коэффициент теплообмена в каждом узле определяется на основе локальных характеристик воздушного потока. Теплообмен внешних поверхностей ограждающих конструкций с наружным воздухом и воздухом смежных помещений задан с помощью граничных условий третьего рода. Температура наружного воздуха задана минус 24 °С с суточными колебаниями ± 6 °С. Температура воздуха в смежных помещениях составляет 20 °С, а в подвале определена на уровне 5 °С. Коэффициенты теплообмена приняты: 23 Вт/(м²·К) – на границе с наружным воздухом и $8,7$ Вт/(м²·К) – на поверхностях смежных помещений.

Теплофизические характеристики материалов ограждающих конструкций, начальные параметры заданы одинаково для всех серий расчетов и соответствуют реальным условиям.

Наружная стена представляет собой трехслойную панель. Материал наружного и внутреннего слоя – железобетон, теплоизоляционный слой – из пенополистирола. Материал оконной рамы и подоконника – древесина. Камеры стеклопакета представлены материалом с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Материал стены, расположенной справа, –

железобетон. Во всех сериях расчетов материал перекрытий, отделяющих рассматриваемое помещение от других помещений с температурой воздуха 20 °С, – железобетон. В серии № 1 при расчете помещения, расположенного на нижнем этаже, материал нижнего перекрытия (над подвалом) имеет более низкий средний коэффициент теплопроводности, отражающий наличие дополнительной теплоизоляции для того, чтобы поддерживать температуру поверхности пола в пределах не ниже нормируемого значения 16 °С. В серии № 3 расчетов для материала совмещенного покрытия использован эквивалентный коэффициент теплопроводности, который при данной толщине покрытия позволяет получить нормативное значение сопротивления теплопередаче.

В расчетах учитывается лучистый теплообмен поверхностей внутри помещения, оконных стекол и окружающей среды. Степень черноты деревянных поверхностей задана 0,9; конвектора и радиатора – 0,95; стекла и остальных поверхностей внутри помещения – 0,94. Средняя степень черноты наружной среды, включающей в себя землю, близкорасположенные здания и сооружения, небо, составляет для холодного периода года 0,85 [3].

Используются четыре вида отопительных приборов: подоконная отопительная панель, напольное отопление, конвектор и радиатор. Первые два вида отопительных приборов условно показывают в ограждениях с помощью линий. Подразумевается, что отопительные элементы равномерно расположены вдоль данных линий. Конвектор и радиатор располагают под окном и схематично изображают прямоугольниками.

Во всех расчетах мощность отопительных приборов Q_{tot} задана одинаковой – 400 Вт на 1 м длины вдоль оси z , перпендикулярной плоскости, в которой лежит расчетная область (т. е. на $dz = 1$ м). Теплоотдача конвектора и радиатора состоит из лучистой и конвективной частей. При этом конвективная доля у конвектора составляет 93 %, а у радиатора – 70 %.

Результаты расчетов. Поля температуры и скорости для рассматриваемых четырех вариантов отопительных приборов мощностью $Q_{tot} = 400$ Вт/м, используемых в помещении нижнего, среднего и верхнего этажей, представлены на рис. 1–3, на которых сплошные тонкие линии показывают границы ограждений и отдельных материалов, а утолщенные линии являются изотермами. Числовые значения 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, находится в верхней части рисунков.

Качественный анализ полученных результатов. Проведем качественное сопоставление результатов, используя рисунки графического представления полей температуры и скорости в отапливаемых помещениях (рис. 1–3).

В случае применения радиатора, конвектора и подоконной отопительной панели наблюдаются сходные картины движения воздуха. Это связано с относительной компактностью данных приборов и сходным расположением – под окном. Заметно отличается характер поля скоростей при использовании напольного отопления, особенности которого будут отмечены несколько ниже.

Рассмотрим особенности формирования потоков воздуха при использовании компактного прибора, размещенного под окном, на примере подоконной отопительной панели. Воздух, нагреваясь у поверхности панели, поднимается вверх и встречается с охлажденным у поверхности окна потоком воздуха, который опускается вниз. Поток смеси далее движется в глубь комнаты. В отапливаемом помещении формируются два основных вихря. Первый вихрь закручен против часовой стрелки и образован воздухом, охлажденным на поверхности окна. Второй вихрь – с циркуляцией по часовой стрелке – индуцирован теплотой, поступающей от подоконной отопительной панели. Вопрос о том, какой вихрь будет обладать большей интенсивностью и соответственно займет большую часть пространства помещения, зависит от соотношения количества движения теплой и холодной струй, образующих данные вихри [4]. В условиях естественной конвекции гравитационные силы определяют не только импульсы, которыми обладают теплый и холодный поток воздуха в месте их встречи, но и дальнейший путь результирующего потока.

По результатам некоторых вариантов расчета (рис. 2а, 3а, 3б) зона действия отопительного прибора, установленного под окном, ограничена. Вихрь теплого воздуха от нагревателя не достигает противоположной стены.

Положение изотерм в месте примыкания пола к наружной стене свидетельствует о том, что его поверхность нагревается излучением отопительного прибора. Более ярко данное явление выражено при использовании подоконной отопительной панели, в меньшей степени – у радиатора и конвектора.

Качественно иной характер формирующейся картины движения воздуха в условиях использования напольного отопления обусловлен распределением отопительной мощности в полу практически по всей длине помещения. В данном случае воздух, охлаждаемый окном и наружной стеной, не встречает препятствия в виде нагретого отопительным прибором потока воздушной среды. Подогрев холодной воздушной массы осуществляется далее поверхностью теплого пола, температура поверхности которого, к тому же, имеет ограничения. Таким образом, в помещении формируется только один вихрь с циркуляцией против часовой стрелки.

Во всех вариантах расчетов подвижность воздуха имеет низкое значение, характерное для естественной конвекции в помещениях рассмотренных типов.

Проанализируем состояние ограждающих конструкций в третьей серии расчетов (помещение расположено на верхнем этаже). Обратим внимание на узел сопряжения совмещенного покрытия, наружной стены и парапета. На рис. 3 видно, что при любых видах отопительных приборов нулевая изотерма практически выходит на внутреннюю поверхность ограждений. Негативным последствием пониженной температуры поверхности будет конденсация на ограждении водяных паров из воздуха помещения. При систематическом повторении данного явления произойдет повреждение отделки, появление грибков и плесени.

Особенности различных видов отопительных приборов. Проведем анализ, используя сочетания средней температуры воздуха $T_{в.ср.}$, средней

подвижности воздуха w_{cp} и средней температуры поверхностей, обращенных в помещение, $T_{рад.ср}$ (рис. 4–6). Параметры $T_{в.ср}$ и $w_{ср}$ определялись в воздушной области помещения в пределах 0–2 м от пола.

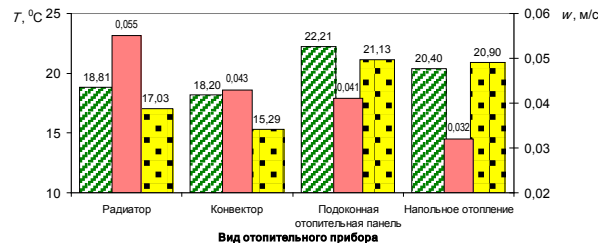


Рис. 4. Средние значения параметров микроклимата (нижний этаж):

■ $T_{в.ср}$; ■ $T_{рад.ср}$; ■ $w_{ср}$

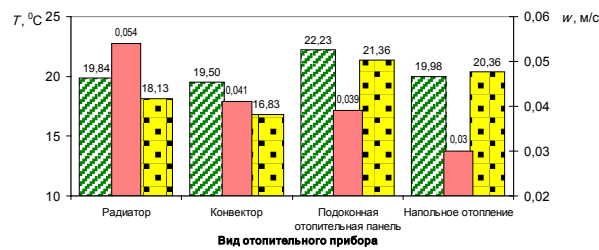


Рис. 5. Средние значения параметров микроклимата (средний этаж):

■ $T_{в.ср}$; ■ $T_{рад.ср}$; ■ $w_{ср}$

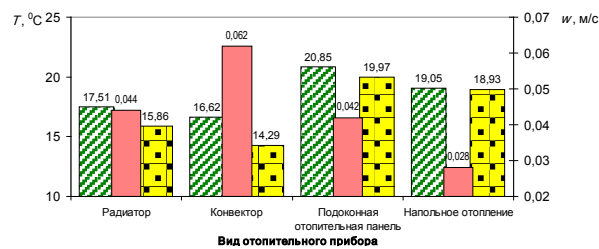


Рис. 6. Средние значения параметров микроклимата (верхний этаж):

■ $T_{в.ср}$; ■ $T_{рад.ср}$; ■ $w_{ср}$

Более низкие значения $T_{в.ср}$ и $T_{рад.ср}$ наблюдаются в случае применения радиатора и конвектора, более высокие – у подоконной отопительной панели и напольного отопления.

Причиной, по которой подоконная отопительная панель прогревает воздух до более высокой температуры, является то, что она имеет большую высоту по сравнению с радиатором и особенно – с конвектором. Следовательно, воздух дольше находится в контакте с панелью при сопоставимых скоростях обтекания рассматриваемых приборов. Радиатор и конвектор при той же мощности имеют более развитую поверхность теплоотдачи, что способствует контакту с большим количеством воздуха, который нагревается до менее высокой температуры.

Следует сказать, что характер циркуляции воздуха при использовании напольного отопления отличается от других рассматриваемых видов при-

боров. Воздух, двигаясь вдоль поверхности пола, имеющей более низкую температуру по сравнению с другими отопительными приборами, успевает в достаточной мере прогреться по причине длительного контакта с греющей поверхностью пола.

Превышение $T_{в.ср}$ над $T_{рад.ср}$ менее ощутимо при использовании подоконной отопительной панели и напольного отопления и более выражено в случае радиатора и конвектора. Объясняется это тем, что в первом случае воздух нагревается поверхностями ограждений, в которые встроены нагревательные элементы. Во втором случае – наоборот: сначала приборы греют воздух, а затем теплый воздух отдает теплоту ограждениям, имеющим более низкую температуру.

При расположении помещения на среднем или верхнем этаже (рис. 5, 6) видно, что по уровню значений $T_{в.ср}$ и $T_{рад.ср}$ эффект от применения напольного отопления более близок к вариантам с конвектором и радиатором, чем с подоконной отопительной панелью, в то время как в серии № 1 расчетов (нижний этаж) этого не наблюдается. Причина заключается в том, что перекрытие нижнего этажа, отделяющее помещение от подвала, имеет повышенное сопротивление теплопередаче по сравнению с междуэтажными перекрытиями. Напольное отопление через перекрытие отдает часть теплоты в расположенное ниже помещение. Чем ниже будет температура в нижнем помещении, тем более явной будет потеря теплоты. В условиях все большего распространения поквартирных систем отопления с регулированием теплоотдачи приборов требуется разработать методику учета возможных последствий, возникающих при переводе систем отопления смежных квартир на дежурный режим работы.

Рассмотрим среднюю подвижность воздуха $w_{ср}$ при применении различных отопительных приборов. Однозначно прослеживается, что варианты с напольным отоплением всегда имеют более низкое значение $w_{ср}$. Объясняется это принципиально отличающейся картиной течения. Для остальных трех типов приборов $w_{ср}$ зависит от того, какое направление будет иметь поток воздуха, создаваемый при взаимодействии теплого воздуха, подымающегося от прибора и холодного воздуха, опускающегося от окна.

В таблицах температурных зон комфорта, составленных в соответствии с [5] для жилого помещения (табл. 1–3), отражается та же тенденция, которая имеет место на рис. 4–6 со средними значениями параметров микроклимата.

Таблица 1

Температурные зоны (нижний этаж)

Температурная зона (в соответствии с ГОСТ 30494–96)		Доля сечения (%) в пределах 0–2 м от пола, занимаемая температурной зоной, в расчете с данным видом отопительного прибора			
Наименование зоны	Диапазон T воздуха, °С	Радиатор	Конвектор	Подоконная отопительная панель	Напольное отопление
Пониженная T	$T < 18$	7,77	13,45	0,16	0,54
Допустимая T (1)	$18 \leq T < 20$	82,82	85,91	0,41	29,37
Оптимальная T	$20 \leq T \leq 22$	9,07	0,53	16,95	67,97
Допустимая T (2)	$22 < T \leq 24$	0,33	0,11	81,44	0,67
Повышенная T	$T > 24$	0	0	1,04	1,45

Таблица 2

Температурные зоны (средний этаж)

Температурная зона (в соответствии с ГОСТ 30494–96)		Доля сечения (%) в пределах 0–2 м от пола, занимаемая температурной зоной, в расчете с данным видом отопительного прибора			
Наименование зоны	Диапазон T воздуха, °С	Радиатор	Конвектор	Подоконная отопительная панель	Напольное отопление
Пониженная T	$T < 18$	0,75	0,87	0,16	0,7
Допустимая $T(1)$	$18 \leq T < 20$	74,17	96,77	0,41	45,05
Оптимальная T	$20 \leq T \leq 22$	22,27	1,88	13,02	52,3
Допустимая $T(2)$	$22 < T \leq 24$	2,78	0,42	85,6	0,79
Повышенная T	$T > 24$	0,03	0,05	0,81	1,16

Таблица 3

Температурные зоны (верхний этаж)

Температурная зона (в соответствии с ГОСТ 30494–96)		Доля сечения (%) в пределах 0–2 м от пола, занимаемая температурной зоной, в расчете с данным видом отопительного прибора			
Наименование зоны	Диапазон T воздуха, °С	Радиатор	Конвектор	Подоконная отопительная панель	Напольное отопление
Пониженная T	$T < 18$	96,34	97,92	0,51	4,44
Допустимая $T(1)$	$18 \leq T < 20$	3,17	1,73	2,98	92,9
Оптимальная T	$20 \leq T \leq 22$	0,46	0,34	94,49	1,09
Допустимая $T(2)$	$22 < T \leq 24$	0,03	0,02	1,53	1,56
Повышенная T	$T > 24$	0	0	0,5	0

Диаграммы комфорта Фангера. Степень комфортности среды обитания человека в общем случае определяется следующими параметрами микроклимата: температурой и влажностью воздуха; температурой внутренних поверхностей, обращенных в помещение; скоростью движения воздуха. Для небольших помещений жилых и общественных зданий, характеризующихся отсутствием существенных влаговывделений, в большинстве случаев не предусматривается устройство систем кондиционирования воздуха и механических систем вентиляции. В этом случае средствами поддержания теплового комфорта остаются только два фактора: температура воздуха и средняя радиационная температура.

Комфортное сочетание показателей микроклимата соответствует таким оптимальным метеорологическим условиям, при которых сохраняется тепловое равновесие, отсутствует напряжение в процессе терморегуляции [6]. В зависимости от физиологического и эмоционального состояния человека, его одежды, возраста, вида выполняемой работы и индивидуальных особенностей организма количество теплоты, теряемой в окружающую среду, может быть различным. В литературе имеются различные по виду, но подобные по характеру варианты теплового баланса. Фангеру удалось составить подробную математическую модель теплообмена человека, ре-

шение которой удовлетворяло результатам как его собственных, так и зарубежных экспериментальных исследований [7]. Причем решение было доведено до инженерного использования в виде диаграмм комфорта.

Проанализируем комфортность параметров микроклимата, используя диаграммы комфорта Фангера (рис. 7). Рассмотрим четыре варианта расчетов с различными отопительными приборами для помещения, расположенного на нижнем этаже. Средние значения параметров микроклимата указаны на рис. 4. В нашем случае можно использовать диаграммы, составленные для тепловой изоляции одежды $k = 0,5$ кло, теплопродукции человека q , соответствующей состоянию покоя или средней физической активности (т. е. от 60 до 120 Вт/м²).

На рис. 7 видно, что точки, характеризующие микроклимат для вариантов № 1 и № 2, находятся вне линии полного теплового комфорта (в рассматриваемой группе расчетов такой линией является $u < 0,1$ м/с). Данные точки лежат в области пониженных сочетаний радиационной температуры и температуры воздуха как для состояния покоя (рис. 7а), так и при средней физической активности (рис. 7б). Таким образом, эти варианты не обеспечивают комфорта ни в одном из рассматриваемых состояний. Разумеется, ощущение холода будет более сильным в состоянии покоя.

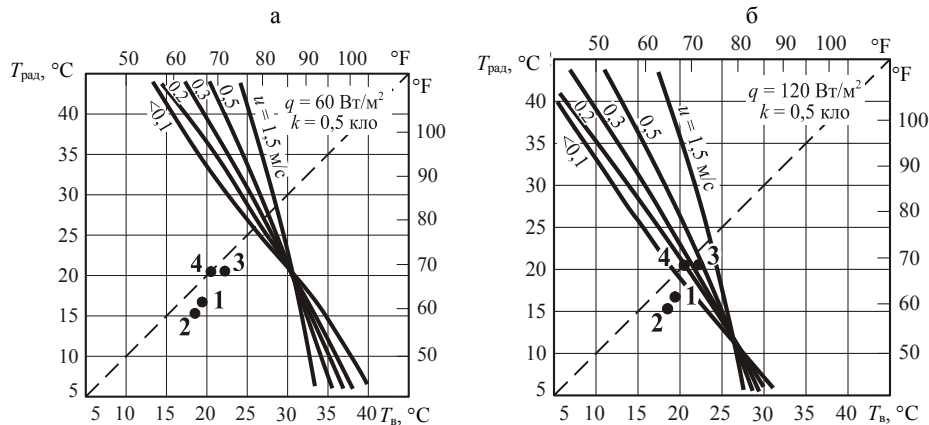


Рис. 7. Диаграммы комфорта Фангера: а – $q = 60$ Вт/м²; б – 120 Вт/м²; $T_{\text{рад}}$ – радиационная температура; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха; q – теплопродукция тела; u – скорость воздуха; 1 – радиатор; 2 – конвектор; 3 – подоконная отопительная панель; 4 – напольное отопление

На рис. 7а точки, характеризующие микроклимат для вариантов № 3 и 4, находятся вне линии полного теплового комфорта ($u < 0,1$ м/с) в зоне пониженных сочетаний $T_{\text{рад}}$ и $T_{\text{в}}$. Эти варианты не обеспечивают комфорта в состоянии покоя. Человек при этом испытывает ощущение холода.

При средней физической активности точки для вариантов № 3 и 4 находятся вне линии $u < 0,1$ м/с уже в зоне повышенных параметров микроклимата (рис. 7б), т. е. человек может испытывать легкий перегрев. При значительном снижении физической активности будет достигнут полный тепловой комфорт.

С помощью диаграмм комфорта Фангера (рис. 7а, б) и балльной системы установим, как соотносятся рассматриваемые варианты расчетов с точ-

ки зрения обеспечения максимально комфортного теплоощущения. Вариант, точка которого наиболее близко расположена к линии полного комфорта ($u < 0,1$ м/с), получает 4 балла, следующий – на балл меньше и т. д. Оценку проводим и для состояния покоя (рис. 7а), и для случая средней физической активности (рис. 7б). Результат является средним значением баллов, выставленных в двух упомянутых случаях. Данный сравнительный анализ приведен в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение вариантов с точки зрения обеспечения теплоощущения, максимально близкого к полному комфорту

№ варианта	Прибор	Оценка (в баллах) при теплопродукции тела q , Вт/м ²		Результат
		60	120	
1	Радиатор	2	2	2
2	Конвектор	1	1	1
3	Подоконная отопительная панель	4	3	3,5
4	Напольное отопление	3	4	3,5

Добиться ощущения полного теплового комфорта в рассматриваемых вариантах можно, применив средства индивидуального автоматического регулирования, которые могли бы по заданному алгоритму изменить теплоотдачу отопительного прибора.

Следует заметить, что предельно допустимое значение температуры поверхности пола, обусловленное санитарно-гигиеническими требованиями, составляет 26 °С. Данное значение уже достигнуто в варианте с напольным отоплением. Долговременная эксплуатация системы отопления с более высокой температурой поверхности пола может привести к патологическим изменениям в системе кровоснабжения ног у пользователей помещения. По этой причине, напольное отопление мало пригодно для обеспечения теплового комфорта в отапливаемых помещениях, если человек находится в состоянии покоя.

ВЫВОД

Анализ результатов расчетов свидетельствует о том, что вид отопительного прибора оказывает значительное влияние на распределение параметров микроклимата (температуры и подвижности воздуха, температуры поверхностей) и уровень теплового комфорта в помещении.

Применение программ, моделирующих процессы переноса между отопительными приборами, ограждениями, человеком и оборудованием, для решения проблем обеспечения теплового комфорта и (или) требуемых технологических условий является перспективным направлением научных исследований и практики проектирования [8]. Использование программ такого рода на этапе проектирования позволит учесть все особенности конкретной задачи и с минимальными затратами подобрать эффективный и экономичный способ обеспечения микроклимата и оценить состояние ограждающих конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дячек, П. И. Моделирование микроклимата отапливаемых помещений / П. И. Дячек, А. Э. Захаревич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 2. – С. 34–47.
2. Разработка программного продукта и численное исследование распределения параметров микроклимата в отапливаемых помещениях в условиях естественной конвекции [Электронный ресурс]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. П. И. Дячек; исполн. А. Э. Захаревич. – Минск, 2008. – 80 с. – № ГР 20080666.
3. Табунщиков, Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
4. Сотников, А. Г. Процессы, аппараты и системы кондиционирования воздуха и вентиляции / А. Г. Сотников // Теория, техника и проектирование на рубеже столетий: в 2 т. – СПб: АТ-Publishing, 2007. – Т. 2, ч. 2. – 512 с.
5. Задания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: ГОСТ 30494–96. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 1999. – 20 с.
6. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов / В. Н. Богословский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1982. – 415 с.
7. Банхиди, Л. Тепловой микроклимат помещений: расчет комфортных параметров по теплоощущениям человека / Л. Банхиди; пер. с венг. В. М. Беляева; под ред. В. И. Прохорова и А. Л. Наумова. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с.
8. Nilsson, H. O. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models / H. O. Nilsson, I. Holmer // Indoor Air. – 2003. – Vol. 13. – P. 28–37.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 25.05.2009

УДК 621.561

ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА КОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Инж. ЗДИТОВЕЦКАЯ С. В., докт. техн. наук, проф. ВОЛОДИН В. И.

Белорусский государственный технологический университет

Перспективным направлением в области энергосбережения является использование в системах теплоснабжения низкопотенциальной теплоты с температурой до 50 °С с помощью компрессионных тепловых насосов. Для прогнозирования их работы и проектирования новых систем требуется инструмент, позволяющий проводить совместный анализ параметров цикла, теплообменников контура и элементов обвязки данных устройств с учетом необратимых потерь, в том числе при нестационарном режиме работы. Предлагаемые методы анализа не отвечают этому требованию [1–3]. В отличие от них в данной работе поставленная задача решается на основе разработанных сопряженной модели и пакета прикладных программ для анализа компрессионных тепловых насосов.