

УДК 628.81:004.94

В.О. Давыдов, канд. техн. наук, доц.,
О.Б. Максимова, математик,
Одес. нац. политехн. ун-т

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

В.О. Давыдов, О.Б. Максимова. Комп'ютерне моделювання теплових режимів житлових приміщень. Розроблено динамічну модель житлового приміщення, опалюваного теплою підлогою та стінами. Досліджено можливість акумуляції тепла у внутрішніх стінах приміщень із метою підтримки комфортної температури в період пікового і базового навантажень при відключеній системі теплопостачання.

В.О. Давыдов, О.Б. Максимова. Компьютерное моделирование тепловых режимов жилых помещений. Разработана динамическая модель жилого помещения отапливаемого теплым полом и стенами. Исследована возможность аккумуляции тепла во внутренних стенах помещений с целью поддержания комфортной температуры в период пиковой и базовой нагрузок при отключенной системе теплообеспечения.

V.O. Davydov, O.B. Maksimova. Computer simulation of inhabited rooms' heat regimes. The dynamic model of a living space heated by a warm floor and walls is developed. The possibility of heat accumulation in internal walls of rooms for the purpose of maintaining comfortable temperature in peak and base loadings at the disconnected system of heat supply is investigated.

В последнее время осуществлен переход к рыночным отношениям в жилищно-коммунальном секторе, фактически ликвидированы государственные дотации населению на оплату энергоносителей. Одно из направлений снижения затрат первичных энергоресурсов в жилищно-коммунальном секторе — приведение в соответствие к новыми строительным нормам тепловой изоляции сооружаемых зданий. Сопротивление теплопередачи внешних непрозрачных ограждающих конструкций должно составлять $2,0 \dots 2,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ [1]. Для сокращения финансовых затрат на энергоносители, а также обеспечения отопления необходимо рассмотреть два принципиально возможных подхода для реализации новых нормативов. Первый — сооружение новых зданий с применением высокотехнологических строительных материалов, в которых тепловые потери будут отвечать заданной величине, это долгий и бесперспективный путь с точки зрения инвестиционных возможностей населения. Второй связан с доработкой поверхности существующих зданий советской постройки, в которых фактически проживает 90 % населения, у которых сопротивление теплопередаче стеновой конструкции составляет $0,2 \dots 0,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Нанесение на стеновые, как правило, железобетонные конструкции утеплительных материалов может довести значение сопротивления теплопередаче до требуемого нормативами.

Уменьшение финансовых затрат на отопление имеет существенные резервы, которые сегодня почти не используются. Во-первых, это применение тепловых насосов, когенерационных технологий и т.д., и во-вторых, использование дифференцированных тарифов на электрическую энергию в пиковом и провальном режимах.

Поэтому актуальным является исследование возможности рационального теплоснабжения жилых помещений за счет аккумулирования тепловой энергии во внутренних строительных конструкциях (теплые панели и полы) во время ночного провала электрической нагрузки с дальнейшей возможностью отдачи тепла от этих конструкций в периоды базовой и пиковой электрической нагрузки.

В качестве объекта исследования была выбрана угловая комната жилого здания с двумя оконными проемами во внешних стенах. Отопление осуществлялось посредством теплого пола и стен. Нагреваемая часть стены по высоте занимала 1,5 м. Источником тепла являлась тепло-

наносная установка мощностью 30 кВт по теплу. Исходная температура объекта исследования во всех точках 15 °С.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующий ряд задач:

— разработать динамическую модель объекта исследования, позволяющую получить суточный ход температуры воздуха внутри жилого помещения при различных значениях толщины внутренних стен и физических свойств объекта и окружающей среды;

— провести анализ влияния на суточный ход температуры внутри комнаты таких факторов, как температура окружающей среды, толщина внутренних стен, расположение во внутренних стенах труб с теплоносителем, материал внешних стен, заданная температура воздуха внутри комнаты;

— приняв режим отопления “6 ч нагрев, 18 ч остывание”, оценить запас по времени, в течение которого температура воздуха внутри комнаты остается выше 18 °С.

Для синтеза динамической модели объекта исследования был применен метод тепловых балансов, позволяющий построить температурное поле обогреваемого объекта.

Суть метода заключается в следующем. Объект разбивается на элементарные объемы $V = \delta \times \delta \times l = \delta^2$, где δ — размер элементарного объема (рис. 1).

Полагаем, что удельная теплоемкость c , коэффициент теплопроводности λ и плотность ρ в пределах элементарного участка постоянны. Для каждого элемента составляется уравнение теплового баланса и определяется новое значение температуры через конечное приращение времени $\Delta\tau$. В случае одномерной нестационарной задачи теплопроводности (рис. 1) уравнение теплового баланса примет вид

$$Q_{21} + Q_{31} = \frac{c\rho V}{\Delta\tau}(t'_1 - t_1)$$

или

$$\frac{\lambda}{\delta}(t_2 - t_1)\delta l + \frac{\lambda}{\delta}(t_3 - t_1)\delta l = \frac{c\rho V}{\Delta\tau}(t'_1 - t_1).$$

Решая последнее уравнение относительно неизвестной температуры t'_1 , получаем

$$t'_1 = \frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho V} \left(t_2 + t_3 + \frac{t_1}{\frac{\lambda\Delta\tau}{c\rho V}} - 2t_1 \right). \quad (1)$$

Если учесть, что $\frac{\lambda}{c\rho} = a$ — коэффициент температуропроводности вещества, $V = \delta^2$ и

$\frac{\Delta\tau a}{\delta^2} = Fo$ — число Фурье, то выражение (1) принимает вид

$$t'_1 = Fo \left[t_2 + t_3 + t_1 \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) \right]. \quad (2)$$

Уравнение (2) является основой численного метода расчета нестационарной теплопроводности, при этом выбор Fo ограничен условием [2]

$$Fo \leq \frac{1}{2}. \quad (3)$$

Отметим, что данный подход также был применен и для решения задачи конвективной теплопередачи. Предположим, что между элементами 2 и 1 (см. рисунок 1) осуществляется теп-

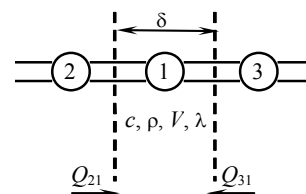


Рис. 1. Разбиение и числовая сетка для нестационарной одномерной задачи

лообмен с коэффициентом теплопередачи α , а через элементы 3 и 1 осуществляется теплообмен за счет теплопроводности, тогда температура t'_1 будет определяться из выражения

$$t'_1 = t_1 + \frac{\alpha \Delta \tau}{c \rho \delta} (t_2 - t_1) + \frac{\lambda \Delta \tau}{c \rho \delta^2} (t_3 - t_1). \quad (4)$$

Выражение (4) легко обобщить на n -мерную задачу для объекта с переменными по объему модели теплофизическими свойствами

$$t'_i = t_i + \sum \frac{\alpha_j \Delta \tau}{c_j \rho_j \delta} \Delta t_{\text{пер}} + \sum \frac{\lambda_k \Delta \tau}{c_k \rho_k \delta^2} \Delta t_{\text{пров}}, \quad (5)$$

где $\Delta t_{\text{пер}}$, $\Delta t_{\text{пров}}$ — температурные напоры между элементами объекта, через которые осуществляются теплопередача и теплопроводность, соответственно.

Выражение (5) позволяет построить температурное поле объекта исследования в любой момент времени, учитывая как процессы теплопроводности, так и теплопередачи. В данном исследовании для моделирования было выделено по одному характерному сегменту внутренних и внешних стен и пола. Элементарные объемы, на которые разбивались сегменты, представляли собой кубы со стороной $\delta = 1$ см. Шаг по времени моделирования $\Delta \tau = 1$ с.

Расчет температуры воздуха внутри помещения также базируется на методе тепловых балансов. Для каждого элемента поверхности внутренних и внешних стен и пола уравнение теплового баланса имеет вид

$$\alpha F (t_i - t_b) \Delta \tau = m_b c_b \Delta t_b = m_i c_i \Delta t_i, \quad (6)$$

где $F = \delta^2$ — площадь элемента поверхности пола или стены;

t_b — температура воздуха в комнате;

Δt_b — изменение температуры воздуха в комнате;

m_b — масса воздуха в комнате;

c_b — теплоемкость воздуха в комнате;

t_i — температура i -го элемента поверхности пола или стены;

Δt_i — изменение температуры i -го элемента поверхности пола или стены;

c_a — теплоемкость i -го элемента поверхности пола или стены;

m_i — масса i -го элемента поверхности пола или стены.

Выражение (6) также было применено для построения модели системы вентиляции, в которой предполагается использовать регенерацию тепловой энергии уходящего воздуха для предварительного нагрева приточного воздуха. Ряд предварительных вычислительных экспериментов позволил для выбранной геометрии теплообменника системы вентиляции получить простую зависимость для изменения температуры $\Delta t_{\text{пр}}$ приточного воздуха:

$$\Delta t_{\text{пр}} = 0,21(t_b - t_{\text{пр}}). \quad (7)$$

Выражение (7) позволило в дальнейшем существенно уменьшить объем вычислений, т.к. исключается необходимость в расчете температурного поля.

Таким образом, если пренебречь в объекте исследования явлениями конвективного теплообмена и теплообмена излучением, совокупность уравнений (5), (6) и (7) полностью описывают объект и представляют его динамическую модель.

*Результаты моделирования первой группы экспериментов
(нагрев до заданной температуры и остывание до 18 °С)*

Исходные данные					Результаты	
Глубина прокладки труб, мм	Заданная температура, °С	Толщина внутренних стен, мм	Температура окружающей среды, °С	Материал внешней стены	Время нагрева, ч	Время остывания, ч
20	20	160	-10	Железобетон	5,04	7,13
				Пенобетон	4,98	8,05
			-20	Железобетон	6,19	5,05
		Пенобетон		6,06	5,81	
		290	-10	Железобетон	5,36	5,23
				Пенобетон	5,28	5,82
	-20		Железобетон	6,63	3,58	
		Пенобетон	6,45	4,09		
	24	160	-10	Железобетон	7,19	14,65
				Пенобетон	7,06	16,46
			-20	Железобетон	8,60	10,69
		Пенобетон		8,33	12,03	
290		-10	Железобетон	7,88	12,54	
			Пенобетон	7,66	14,23	
	-20	Железобетон	9,75	9,21		
Пенобетон		9,29	10,37			
80	20	160	-10	Железобетон	5,57	9,96
				Пенобетон	5,48	11,15
			-20	Железобетон	6,83	7,36
				Пенобетон	6,65	8,27
	24	160	-10	Железобетон	7,90	17,90
				Пенобетон	7,74	20,07
			-20	Железобетон	9,50	13,25
				Пенобетон	9,17	14,92
145	20	290	-10	Железобетон	6,74	13,10
				Пенобетон	6,60	14,75
			-20	Железобетон	8,35	9,95
				Пенобетон	8,05	11,16
	24	290	-10	Железобетон	9,93	24,52
				Пенобетон	9,63	27,78
			-20	Железобетон	12,30	18,61
				Пенобетон	11,66	21,05

В дальнейшем был поставлен ряд вычислительных экспериментов по определению хода температуры внутри жилого помещения, в которых параметры объекта исследования варьировались следующим образом: толщина внутренних стен — 160, 290 мм; глубина пролегания труб во внутренних стенах — 20, 145 мм; основной материал внешних стен — железобетон, красный кирпич, пенобетон; температура окружающей среды — -10, -20 °С; заданная температура в комнате — 20, 22, 24 °С. В случае использования пенобетона слой минеральной ваты не учитывался.

Следует отметить, что моделирование одних суток на ЭВМ с процессором тактовой частотой 2,4 ГГц занимало от 15 до 25 мин.

Все вычислительные эксперименты были разделены на две группы. В первой моделировался нагрев воздуха в комнате до заданной температуры. После этого система отопления отключалась, и моделировалось остывание воздуха до температуры 18 °С. Результаты моделирования приведены в таблице.

Целью первой группы экспериментов было определение значений параметров объекта исследования, при которых температура воздуха в комнате понижалась до $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ за время не менее 18 ч. Анализ полученных результатов показал, что такая ситуация потенциально возможна, даже для самого холодного периода года. Для этого трубы с теплоносителем необходимо располагать в глубине внутренних строительных конструкций, что позволяет аккумулировать большее количество тепловой энергии по сравнению с поверхностным вариантом прокладки.

Далее во второй группе экспериментов моделировался режим отопления “6 ч нагрев, 18 ч остывание”. Отметим, что процесс нагрева мог длиться меньше 6 ч в случае, если температура воздуха в помещении достигала заданной. Процесс моделировался до тех пор, пока объект исследования не выходил на стационарный режим. Результаты моделирования для заданной температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены на рис. 2.

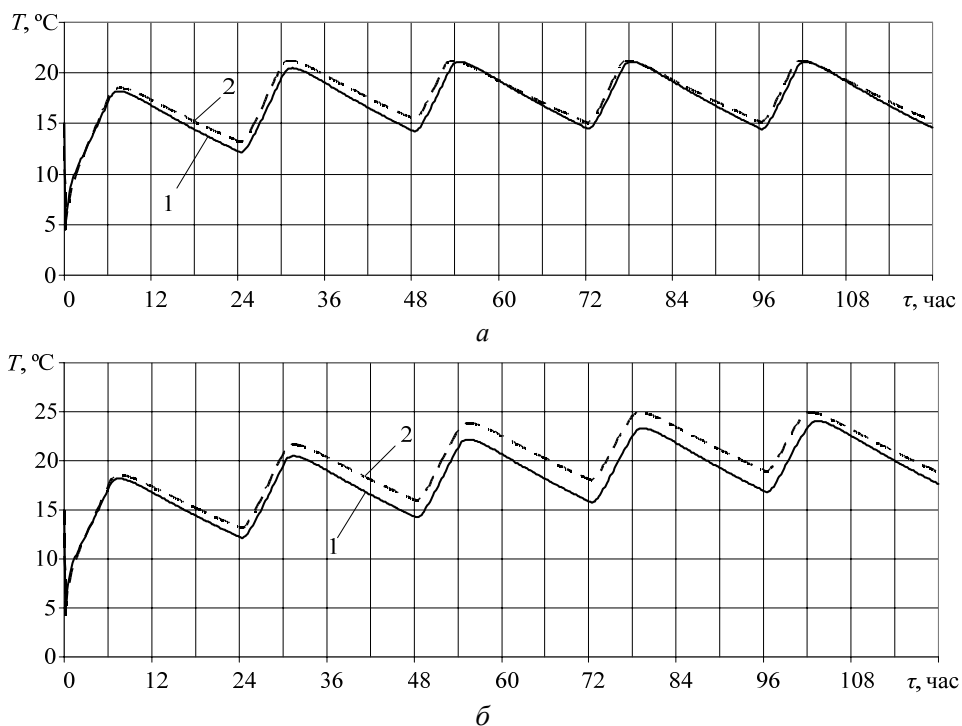


Рис. 2. Ход температуры внутри помещения при заданной температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б): внешние стены из железобетона с утеплителем (1) и пенобетона (2)

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

— Увеличение толщины внутренних строительных конструкций при прочих равных условиях существенно увеличивает инерционность процесса остывания и снижает его темп.

— В домах советской постройки, выполненных из железобетона, после проведения мероприятий по утеплению внешних ограждающих конструкций потенциально возможно приблизиться к требуемому тепловому режиму нагрева и остывания. При этом суточные колебания температуры воздуха в комнате будут в диапазоне $17\text{...}24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выход на стационарный режим займет 4 суток. Повышение заданной температуры в данном случае не эффективно, так как за 6 ч комната просто не успеет прогреться.

— При использовании современных строительных материалов и технологий возможно получение суточных колебаний температуры в диапазоне $18\text{...}24\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае выход на стационарный режим займет чуть более 3 суток.

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о перспективности аккумулирования тепловой энергии во внутренних строительных конструкциях помещений. В дальнейшем при возведении внутренних стен и конструкций целесообразно оценить применение материа-

лов с высокой теплоемкостью или даже применение специальных химических аккумуляторов тепла, использующих фазовый переход вещества.

Литература

1. ДБН В.2.6-31:2006. Державні будівельні норми України. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель. — К.: Мінбуд України, 2006.
2. Исаченко, В.П. Теплопередача: Учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. — 4-е изд. перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 416 с.

Рецензент д-р техн. наук Одес. нац. политехн. ун-та Королев А.В.

Поступила в редакцию 27 марта 2009 г.