

УДК 699.86:519.85

Е.В. Кресова¹, С.П. Кундас²**ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА**

Предлагается трехмерная тепловая модель дома для сельской местности, которая включает конструктивную, конечно-элементную и расчетно-аналитическую модели, созданные в программных комплексах SolidWorks (конструктивная модель) и COMSOL Multiphysics (конечно-элементная и расчетно-аналитическая модели). Для моделирования процесса переноса тепла во всем объеме здания создается дополнительный объект – воздушная среда помещения. Показывается работоспособность модели и возможность ее применения для решения задач оптимизации ограждающих конструкций зданий.

Введение

Отапливаемый объект представляет собой сложную архитектурно-конструктивную систему с многообразием составляющих ее энергетически взаимосвязанных элементов: ограждений, окон, нагревательных приборов, оборудования помещений, воздушной среды (наружной и внутренней), бытовых и производственных теплопоступлений. В рассматриваемой системе протекают различные по физической сущности процессы поглощения, превращения и переноса теплоты.

При анализе теплового режима учитываются наиболее существенные характеристики конструкции и протекающие физические процессы, т. е. создается в определенной степени идеализированная тепловая модель. Основное требование к тепловой модели может быть сформулировано следующим образом: тепловая модель должна быть адекватна изучаемым явлениям и реализуема математически [1].

Одним из важных требований к математической модели является обеспечение быстродействия при ее компьютерной реализации, что может быть достигнуто упрощением модели или применением высокопроизводительных вычислительных средств. Последнее в реальных производственных условиях не всегда доступно. Поэтому целью настоящей работы было создание прикладной тепловой модели здания с использованием возможностей доступных коммерческих программных средств, которая обеспечивает проведение вычислений с достаточной для практического применения точностью [2], и ее применение для анализа и оптимизации теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций зданий на этапе их проектирования.

1. Методика создания тепловой модели здания

Процесс переноса тепла в теле с учетом конвекции можно описать уравнением теплопроводности [3, 4]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} Q + \rho c_p \vec{u} \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T) + Q, \quad (1)$$

где c_p – теплоемкость материала при постоянном давлении, Дж/(кг · °С);

ρ – плотность материала, кг/м³;

T – температура, °С;

u – поле скоростей, м/с;

Q – мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³;

λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м · °С;

τ – время, с.

Выражение (1) устанавливает связь между временным и пространственным изменениями температуры в любой точке тела, в котором происходит процесс теплопроводности. Это уравнение описывает процесс, протекающий в телах, которые обладают следующими свойствами [3]:

– тело однородно и изотропно;

– деформация рассматриваемого объема, связанная с изменением температуры, очень мала по сравнению с самим объемом;
– внутренние источники теплоты в теле, которые в общем случае могут быть заданы как $q_{\text{вн}} = f(x, y, z, \tau)$, распределены равномерно [5].

Уравнение (1) является основой тепловой математической модели, реализованной в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Для практического использования указанной модели были дополнительно разработаны конструктивная, конечно-элементная и расчетная модели анализируемого дома, сформулированы начальные и граничные условия.

Конструктивная модель. В качестве объекта исследований выбран строящийся энергоэффективный дом учебно-научного комплекса (УНК) «Волма» Международного государственного экологического университета им. А.Д. Сахарова [6].

Для заполнения стен в качестве внутреннего утеплителя в типовом проекте дома использовалась специально приготовленная смесь из глины, щепы и воды. Эта смесь производится непосредственно на строительной площадке. По своим теплофизическим характеристикам она приближается к арболиту с плотностью около 500 кг/м^3 . Арболит представляет собой разновидность легкого бетона, изготавливаемого из подобранной смеси цемента, органических заполнителей, химических добавок и воды. Физико-технические показатели стеновых блоков из арболита согласно СТБ 1105–98 [7]:

средняя плотность в сухом состоянии – не более 550 кг/м^3 ;
класс по прочности на сжатие – В 0,35;
теплопроводность – $0,11 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Конструктивная модель типового дома (рис. 1) разработана в программном комплексе SolidWorks и отображает пространственные геометрические соотношения между элементами конструкции объекта.



Рис. 1. Конструктивная модель дома

В предложенной модели был введен дополнительный объект – воздушная среда внутри здания, что позволяет избежать задания фиксированной температуры на внутренней границе ограждающей конструкции как граничного условия.

Конечно-элементная модель. На основе конструктивной модели в программном комплексе COMSOL Multiphysics разработана конечно-элементная модель дома, которая состоит из сетки тетраэдров. При построении сетки учитывалось, что между любыми двумя границами будет не меньше 10 конечных элементов.

Неравномерная тетраэдрическая сетка в физическом пространстве должна сгущаться в тех областях, в которых перенос тепла представляет наибольший интерес, и у искривленных поверхностей, чтобы лучше повторять их геометрию.

В расчетно-аналитической модели к граням или к узлам конечно-элементной сетки элементов прикладываются нагрузки и устанавливаются ограничения. Также в данной модели описываются свойства применяемых материалов.

2. Компьютерная реализация предложенной модели

Компьютерная реализация модели осуществлялась в программе COMSOL Multiphysics. Использован модуль *Heat Transfer*, который описывает процессы переноса тепла в одно-, двух- и трехмерной реализации, т. е. математической модели.

Процедура расчета включает следующие этапы:

– импорт созданной в SolidWorks конструктивной модели дома в программу COMSOL Multiphysics;

– наложение на конструктивную модель неравномерной тетраэдрической конечно-элементной сетки;

– приложение к конечно-элементной модели нагрузок и установление ограничений;

– проведение расчетов.

Для анализа тепловых режимов дома с учетом всех заданных параметров (изменения температуры атмосферного воздуха, конвекции воздуха в помещении) необходим большой объем оперативной памяти. Предварительные исследования показали, что при использовании доступных вычислительных средств (*HP Pavilion*) для проведения анализа тепловых режимов дома требуется большой объем оперативной памяти. Поэтому для ускорения процесса вычислений в качестве объекта моделирования была выбрана одна комната анализируемого дома.

Для решения нестационарного переноса тепла в программе COMSOL Multiphysics был выбран модуль Direct (SPOOLES), Time Dependent.

3. Результаты моделирования и их анализ

Для конструкции утепления стеновых панелей (рис. 2 и таблица) с помощью разработанной модели выполнен расчет изменения температуры внутри дома и в сечении стены дома. При проектировании теплоизоляционной оболочки здания на основе многослойных конструкций учитывалось, что слои из тех материалов, которые имеют более высокую теплопроводность и теплоемкость, располагаются с внутренней стороны конструкции, а слои из материалов, которые имеют более низкие соответствующие показатели, – с внешней [8].

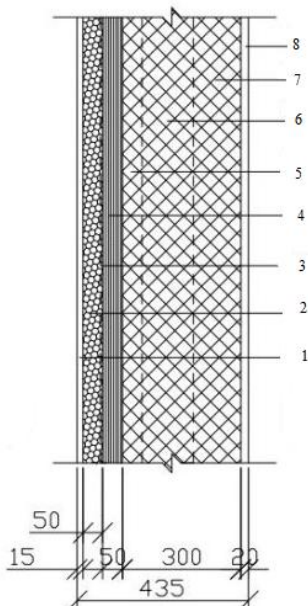


Рис. 2. Конструкция стены дома: 1) армированная штукатурка смесями «Забудова»; 2) плита тростниковая 50 мм (горизонтальное расположение стебля); 3) пароизоляционная пленка; 4) плита тростниковая 50 мм (вертикальное расположение стебля); 5) брусок 50х50 выносной (сосна); 6) заполнение смесью глины и щепы (300 мм); 7) стойка каркаса 120х120 мм (сосна); 8) штукатурка глиняным раствором

Для упрощения модели было рассчитано, какой процент занимают деревянные стойки каркаса от всего объема ограждающей конструкции. Вычисления показали, что эта величина составляет примерно 4 %. Это свидетельствует о незначительном влиянии стоек на тепловое сопротивление ограждающих конструкций и позволяет не учитывать их при моделировании.

Характеристики материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м °С	Теплоемкость c_p , Дж/кг °С	Плотность ρ , кг/м ³
Тростник	0,067	2300	120
Древесина (сосна)	0,35	2300	500
Щепа и глина	0,11	1200	500
Цементно-песчаный раствор	0,58	840	1800
Минеральная вата	0,044	840	125

Рассмотрим результаты моделирования динамики изменения температуры внутри комнаты при включении отопления. Комната, площадь которой 13,332 м², ограничивается внутренними стенами, внешней стеной с окном и имеет источник тепла (батарею), мощность которого остается постоянной на протяжении всего периода моделирования ($Q = \text{const}$). Мощность батареи принималась из условий, что на 1 м³ необходим 41 Вт тепловой мощности [9].

Для моделирования были заданы начальные и граничные условия. Начальная температура воздуха в помещении задавалась равной 5 °С, стен, окна и батареи – 12 °С. Температура с внешней стороны комнаты, находящейся внутри дома, условно принималась постоянной и равной 14 °С, температура на внешней стороне ограждающей конструкции и на внешней поверхности окна принималась равной усредненному изменению температуры в течение суток в зимний период в течение всего времени численных исследований (рис. 3, а), пол и потолок изолированы:

$$\begin{cases} t_B = 5 \text{ °С}; \\ t_{CT} = 12 \text{ °С}; \\ t_O = 12 \text{ °С}; \\ t_{BAT} = 12 \text{ °С}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} t_c(0, y, z) = \text{const}, 0 \leq y \leq c, 0 \leq z \leq b; \\ t_c(a, y, z) = \text{const}, 0 \leq y \leq c, 0 \leq z \leq b; \\ t_c(x, y, 0) = \text{const}, 0 \leq x \leq a, 0 \leq z \leq b; \\ t_c = f(x, y, z, \tau); \\ \delta Q = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где a – длина комнаты, м; b – ширина комнаты, м; c – высота комнаты, м; t_{CT} – температура стен, °С; t_c – температура поверхности ограждающей конструкции, °С; t_{BAT} – температура батареи, °С; t_O – температура окна, °С.

Были заданы значения теплового потока для каждой точки поверхности стен и любого момента времени как граничное условие второго рода:

$$q_n = -\lambda \text{ grad } t, \quad (4)$$

где q_n – плотность теплового потока на поверхности ограждающей конструкции, т. е. количество теплоты, переданное через изотермическую поверхность в единицу времени; значения λ представлены в таблице.

Граничное условие третьего рода (теплообмен между поверхностью и окружающей средой в процессе охлаждения и нагревания ограждающей конструкции) задавалось с помощью закона Ньютона – Рихмана. Согласно закону Ньютона – Рихмана количество теплоты, отдаваемое еди-

ницей поверхности ограждающей конструкции в единицу времени, пропорционально разности температур поверхности ограждающей конструкции t_c и окружающей среды t_{oc} ($t_c > t_{oc}$):

$$q = \alpha(t_c - t_{oc}),$$

где α – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для зимних условий, 23 Вт/(м²·°С) [8].

Равенство температур и плотностей теплового потока на границах соприкасающихся слоев ограждающих конструкций принималось граничным условием четвертого рода:

$$t_i = t_j;$$

$$q_i = q_j.$$

Скорость движения воздуха в жилой комнате принималась согласно нормам, которые установлены ГОСТ 30494–96 [10].

Из графика на рис. 3, б видно, что температура воздуха в центре комнаты составит примерно 8,3, 14,8, 18 и 23,5 °С через 1, 3, 6 и 12 ч соответственно, т. е. для заданных условий в течение 6 ч после включения источника тепла температура в помещении становится близкой к комфортной (18 °С). Результаты расчета температуры во всем объеме комнаты показаны на рис. 4.

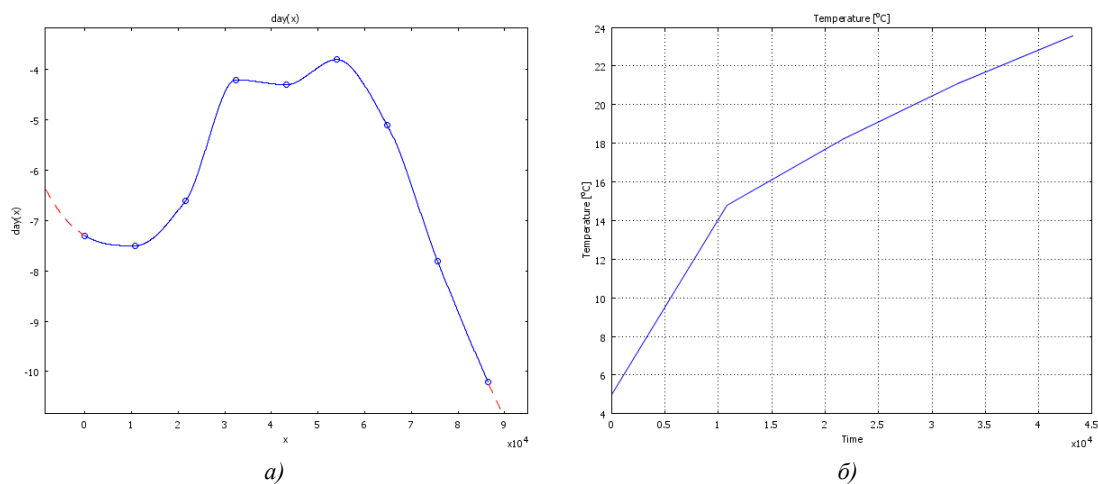


Рис. 3. Трафики изменения температуры: а) в течение суток в зимний период; б) центре комнаты при нагреве

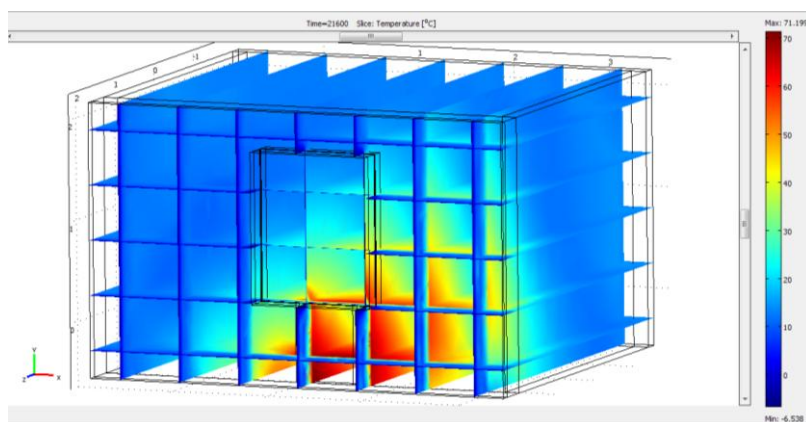


Рис. 4. Распределение температуры внутри комнаты через 6 ч

Рассмотрим моделирование распределения температуры в поперечном сечении стен и крыши дома в течение суток при отключении отопления. Начальная температура на внут-

ренной стороне ограждающих конструкций принималась равной $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на внешней границе – в соответствии с усредненным изменением температуры в течение суток в зимний период (рис. 5 в координатах системы (1, 1, b)). Исследовалась конструкция утепления стен тростник – щепа и глина.

На рис. 5 видно, что применение тростника в качестве теплоизоляционного материала оказывает положительное влияние на тепловой режим дома: тепловой ноль (рис. 6) находится внутри тростникового теплоизоляционного слоя. Это позволяет демпфировать тепловые расширения и конденсацию влаги, дает возможность стене оставаться сухой, благоприятно отражается на состоянии конструкции и способствует формированию благоприятного климата внутри здания. Таким образом, утепление снаружи препятствует появлению известной проблемы внутренней теплоизоляции, когда в холодное время года на внутренних поверхностях образуется конденсат, а также защищает от деструктивного влияния снегопадов, атмосферных осадков, капиллярной влаги, ледовых образований и температурных перепадов. Все это повышает долговечность постройки. Стена внутри теплоизоляционной «шубы» перестает подвергаться температурным перепадам и, оставаясь постоянно нагретой изнутри, становится своеобразным аккумулятором тепла, способствуя сохранению комфортной температуры.

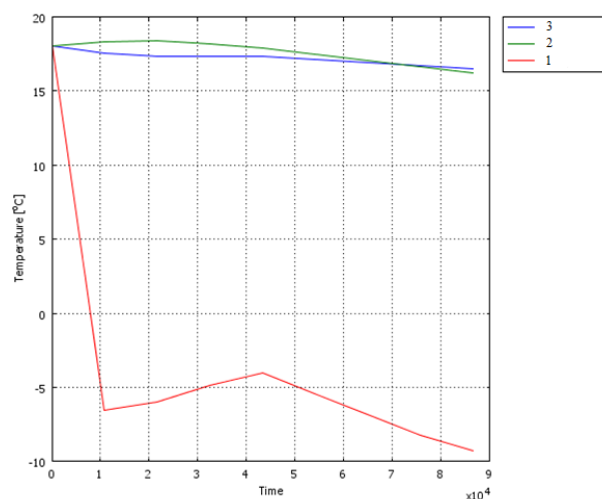


Рис. 5. Изменение температуры в сечении стен дома: 1) на внешней границе первого слоя (изменение температуры атмосферного воздуха); 2) на границе тростник – щепа и глина; 3) на внутренней границе ограждающей конструкции (time – время в секундах)

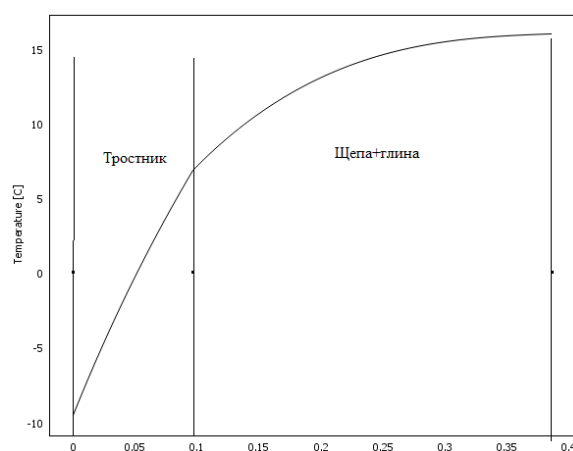


Рис. 6. Изменение температуры в ограждающих конструкциях стены при расположении тростниковой теплоизоляции с внешней стороны стены

Для обоснованного применения разработанных моделей осуществлена их экспериментальная верификация с использованием результатов экспериментальных исследований, проведенных фирмой «ЭкоДом» [11]. Контролировалось изменение температуры внутри дома после его прогрева до температуры 25 °С с последующим отключением отопления и естественным охлаждением (температура окружающей среды составляла –30 °С). В качестве утепляющего материала использовались тростниковые маты.

В течение трех суток температура внутри дома снизилась с 25 до 16 °С. Результаты моделирования изменения температуры внутри дома для аналогичной конструкции и начальных условий показали, что через трое суток температура снизилась до 14,5 °С. Полученное значение ниже, чем экспериментальное. Это можно объяснить тем, что реальные теплотехнические характеристики материалов могут отличаться от справочных данных. Погрешность результатов моделирования не превышает 10 %, что позволяет использовать ее для решения задач анализа тепловых режимов зданий.

Заключение

Разработана трехмерная тепловая модель индивидуального жилого дома для сельской местности, которая включает конструктивную, конечно-элементную и расчетно-аналитическую модели. В качестве объекта анализа выбрана типовая конструкция дома фирмы «ЭкоДом» с применением в качестве утеплителя местных материалов (тростник, щепа и глина). Конструктивная модель создана в программном комплексе SolidWorks. Конечно-элементная и расчетно-аналитические модели и непосредственно расчеты выполнены в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Проведенные с помощью разработанной интегрированной модели исследования энергоэффективного дома УНК «Волма» МГЭУ им. А.Д. Сахарова подтвердили ее работоспособность и возможность использования для решения задач анализа тепловых режимов зданий и оптимизации ограждающих конструкций.

Список литературы

1. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование технологических систем / С.П. Кундас, Т.А. Кашко. – Минск : БГУИР, 2002. – 164 с.
2. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах / С.П. Кундас [и др.]. – Минск : ИТМО НАН Беларуси, 2007. – 292 с.
3. Четкин, А.В. Теплотехника / А.В. Четкин. – М. : Высшая школа, 1986. – 344 с.
4. Лыков, А.В. Теория теплопроводности : учебное пособие / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.
5. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 427 с.
6. Энергоэффективный дом УНК «Волма»: применение возобновляемых источников энергии в системе энергоснабжения / С.П. Кундас [и др.] // Возобновляемые источники энергии: потенциал, достижения, перспективы : материалы Междунар. семинара экспертов. – Минск : Ин-т энергетики НАН Беларуси, 2013. – С. 68–78.
7. Блоки стеновые из арболита для малоэтажного строительства. Технические условия : СТБ 1105–98. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1998.
8. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-2.04-43–2006 (02250). – Минск : Стройтехнорм, 2006. – 56 с.
9. Строительные нормы и правила. Отопление, вентиляция и кондиционирование : СНиП 2.04.05–91. – Введ. 01.01.92. – М. : Промстройпроект, 1992. – 81 с.
10. Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях : ГОСТ 30494–96. – Введ. 01.03.99. – М. : Госстрой России, 1999. – 7 с.

11. ForumHouse. Строительство, ремонт, стройматериалы / Строительство дома, бани, коттеджа. Дома из органического сырья [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.forumhouse.ru>. – Дата доступа : 24.11.2014.

Поступила 17.09.2014

¹*Международный государственный
экологический университет им. А.Д. Сахарова,
Минск, ул. Долгобродская, 23
e-mail: elena-kresova@mail.ru*

²*Белорусский национальный
технический университет,
Минск, пр. Независимости, 65
e-mail: kundas@tut.by*

E.V. Kresova, S.P. Kundas

THERMAL MODEL OF ENERGY EFFICIENT BUILDING

Thermal 3-D model of a rural area building is proposed. The model includes constructive, finite element, analytical and computational models which are created using SolidWorks software (constructive model) and COMSOL Multiphysics software (finite element, analytical and computational models). An additional object was created for modeling heat transfer process in the whole volume of building. Studies have shown model efficiency and possibility of its application for optimizing building isolation.